

Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong nông nghiệp cây lương thực

Luật sư Kim Kyung-jin

Cuốn sách này được sắp xếp và biên soạn bằng trí tuệ nhân tạo. Tư liệu bằng các ngôn ngữ chính trên thế giới đã được thu thập và tổng hợp.

<https://notebook.google.com/notebook/96fac57b-0c9e-495f-a778-dcd3daec88db>

Liên kết trên mở NotebookLM công khai lưu trữ các tài liệu được tham khảo khi biên soạn cuốn sách. NotebookLM không giới hạn ngôn ngữ câu hỏi theo ngôn ngữ của nguồn. Trong mục Cài đặt, hãy chọn Ngôn ngữ đầu ra mong muốn để tiếp tục đặt câu hỏi, nhận câu trả lời và tạo nội dung bằng ngôn ngữ đó.

Mục lục

Chương 1	Hạ tầng nông nghiệp số và nền tảng AI
1.1	Hạ tầng công cộng số (DPI) và nền tảng AI dành cho nông nghiệp
1.2	Cảm biến IoT và giám sát bằng AI biên
1.3	Quản trị dữ liệu và quản lý tài nguyên
Chương 2	Giám sát cây trồng và chẩn đoán hình ảnh trong nông nghiệp chính xác
2.1	Phân tích viễn thám bằng máy bay không người lái (UAV) và vệ tinh
2.2	Thị giác máy tính và phân tích kiểu hình sinh trưởng (Phenomics)
2.3	Chẩn đoán sớm sâu bệnh và cỏ dại dựa trên học sâu
Chương 3	Dự báo sinh trưởng và tối ưu hóa tài nguyên
3.1	Mô hình dự báo năng suất bằng học máy và học sâu
3.2	Kiểm soát tưới chính xác và bón phân biến đổi liều lượng (VRA)
3.3	Mô phỏng dự báo giai đoạn phát triển của cây trồng (DVS/DVI)

Mục lục (tiếp theo)

Chương 4	Hệ gen học và chọn giống phân tử bằng AI
4.1	Dữ liệu lớn về hệ gen cây trồng và xây dựng hệ gen toàn loài (Pan-genome)
4.2	Chỉnh sửa gen (CRISPR) và chọn giống chính xác
4.3	Phát triển giống chống chịu để ứng phó với biến đổi khí hậu
Chương 5	Ra quyết định bằng AI và tự động hóa
5.1	Mô hình ngôn ngữ lớn đa phương thức chuyên biệt cho nông nghiệp (Agri-LLM)
5.2	Robot nông nghiệp và tự động hóa công việc
5.3	Sử dụng công cụ AI phù hợp với nông hộ quy mô nhỏ
Chương 6	Nông nghiệp thông minh thích ứng khí hậu và hệ sinh thái bền vững
6.1	Nông nghiệp thông minh thích ứng khí hậu (CSA) và quản lý hệ sinh thái đất
6.2	Quản trị ESG tại nông hộ và liên kết cộng đồng địa phương
6.3	An ninh lương thực toàn cầu và tương lai chuyển đổi số nông nghiệp

Chương 1

Hạ tầng nông nghiệp số và nền tảng AI

1.1

Hạ tầng công cộng số (DPI) và nền tảng AI dành cho nông nghiệp

Những cánh đồng ở xã Haeje, huyện Muan, tỉnh Jeolla Nam hiện chỉ là bãi đất bỏ trống mọc đầy cỏ dại. Vài năm nữa, các nhà kính bằng kính và một trung tâm phân loại lớn sẽ mọc lên trên 21,6 hecta đất này. Tháng 4 năm 2026, Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn Hàn Quốc đã chọn liên danh Jeolla Nam làm đối tượng ưu tiên đàm phán cho dự án Nền tảng AX Nông nghiệp Quốc gia. Tổng vốn dự án là 254,6 tỷ won.

Số người làm nông đang giảm, còn những người ở lại thì ngày một già đi. Thời tiết mỗi năm một thất thường hơn. Hạn hán và mưa lớn nay xuất hiện vào những thời điểm khác trước, khiến kinh nghiệm dùng tay cảm nhận đất không còn đủ để quyết định khi nào tưới nước và khi nào thu hoạch. Chính phủ nhiều nước gần như đồng thời đi đến cùng một kết luận. Một nông hộ hay một doanh nghiệp riêng lẻ không thể tự mình ứng phó với biến động này, vì vậy nhà nước phải xây dựng trước nền móng để dữ liệu có thể lưu chuyển.

Khi các nhà kính hoàn thành, nơi này sẽ tạo ra nhiều thứ hơn rau diếp và cà chua. Cảm biến trên mái nhà kính, vệ tinh và điện thoại di động của nông dân sẽ liên tục trao đổi dữ liệu. Nền móng do nhà nước xây dựng trước để dữ liệu đến đúng nơi cần thiết được gọi là hạ tầng công cộng số, hay Digital Public Infrastructure (DPI). Một lá thư dù hay đến đâu cũng không thể đến tay người nhận nếu phong bì không có địa chỉ. Hạ tầng công cộng số là hệ thống địa chỉ do nhà nước tạo ra. Đó là tập hợp những quy tắc được định trước để dữ liệu từ nhiều cơ quan có thể lưu chuyển theo cùng một quy ước.

Cấu trúc này gồm bốn tầng. Ở tầng thấp nhất, cảm biến cắm trong đất đo nitơ, photpho, kali và độ ẩm; trạm khí tượng đo gió và mưa; drone và vệ tinh chụp màu sắc của ruộng lúa. Có loại cảm biến đất đo cùng lúc bảy chỉ số: nitơ, photpho, kali, độ ẩm, nhiệt độ, độ axit và độ dẫn điện. Vì vậy, người làm việc ngoài đồng gọi nó là cảm biến bảy trong một. Một ảnh do vệ tinh Sentinel của Cơ quan Vũ trụ châu Âu hoặc vệ tinh Landsat của Hoa Kỳ chụp có thể bao trọn cả một ngôi làng. Ở tầng

thứ hai, các giá trị này truyền qua mạng vô tuyến công suất thấp như LoRaWAN hoặc mạng di động thế hệ thứ năm.

Một cổng biên, tức máy tính nhỏ đặt ngay cạnh ruộng, lọc nhiễu, thống nhất đơn vị và làm sạch dữ liệu. Tầng thứ ba lưu trữ và tính toán dữ liệu đã thu thập. Khi các giá trị tích tụ trong kho lớn gọi là hồ dữ liệu, những mô hình kết hợp nhiều cây quyết định và chọn đáp án theo đa số, cùng các mạng nơ-ron, sẽ đọc dữ liệu để phát hiện bệnh và tính sản lượng. Các mô hình ngôn ngữ lớn chuyên biệt cho nông nghiệp, hay LLM, cũng được kết nối tại đây, tìm kiếm dữ liệu và tạo câu trả lời khi nông dân đặt câu hỏi bằng lời nói. Tầng trên cùng gồm những màn hình và thiết bị mà con người trực tiếp sử dụng.

Trợ lý giọng nói trên điện thoại thông minh hiểu phương ngữ địa phương, còn van tưới tự đóng mở.

Trước khi dựng bốn tầng này, phải làm một việc khác. Công việc ấy giống như lập danh sách học sinh trước khi trường khai giảng năm học mới. Mỗi nông dân phải được cấp một mã số riêng, ruộng và đồng mà người đó canh tác phải được vẽ chính xác trên bản đồ vệ tinh, còn cây trồng trên mảnh đất ấy phải được ghi lại. Sổ đăng ký nông dân, bản đồ đất đai và hồ sơ cây trồng phải ăn khớp với nhau thì người ta mới xác định được các số đo cảm biến và phán đoán của AI tích lũy ở tầng trên thuộc về ai. Nếu thiếu những hồ sơ này, ngay cả mô hình tinh vi nhất cũng không thể đưa ra chỉ dẫn phù hợp với một nông hộ cụ thể.

Vai trò của dữ liệu không dừng ở đó. Khi đặt trọng lượng hạt thu hoạch vào mùa thu cạnh con số dự báo mà mô hình đưa ra vào mùa xuân, người ta biết dự báo chính xác đến đâu. Nếu dự báo sai, người phụ trách lần theo nguyên nhân rồi đưa kết quả ấy trở lại mô hình. Sau mỗi năm canh tác, mô hình lại học thêm từng chút một. Nếu quá trình này dừng lại, phán đoán của mô hình sẽ ngày càng xa rời điều kiện ngoài đồng.

Cần có quy tắc để dữ liệu di chuyển lên xuống qua bốn tầng này. Đạo luật Bảo vệ Dữ liệu Cá nhân Số năm 2023 của Ấn Độ đang được thi hành theo từng giai đoạn, và các điều khoản cốt lõi về sự đồng ý, xử lý dữ liệu và quyền của chủ thể dữ liệu dự kiến có hiệu lực vào tháng 5 năm 2027. Tách biệt với đạo luật này, AgriStack đề xuất một cơ chế trao đổi dữ liệu dựa trên người quản lý sự đồng ý. Không thể xem điều khoản của luật và quy trình vận hành nền tảng là một. Muốn các cơ quan khác cũng đọc được dữ liệu, còn cần một bộ từ vựng chung.

AGROVOC do Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc quản lý là một từ điển thuật ngữ nông nghiệp, giúp những từ như lúa gạo và ngô mang cùng một nghĩa trong các hệ thống phần mềm khác nhau.

Trước khi có hạ tầng như vậy, cộng đồng quyết định thời điểm gieo hạt và tưới nước bằng kinh nghiệm địa phương cùng việc quan sát bầu trời. Ấn Độ nay bổ sung dữ liệu công vào phán đoán ấy. Theo số liệu của Chính phủ Ấn Độ, đến tháng 7 năm 2026, AgriStack đã cấp 101,8 triệu Farmer ID. Tính đến tháng 11 năm 2025, cuộc khảo sát cây trồng đã bao phủ 235 triệu thửa đất. Bharat Vistaar, ra mắt tháng 2 năm 2026, đã có hơn 300.000 nông dân sử dụng và xử lý 7,2 triệu câu hỏi tính đến tháng 7 cùng năm.

Con số 52,8 triệu không phải là số người dùng Bharat Vistaar, mà là số nông dân nhận được dịch vụ tư vấn thời tiết và gió mùa bằng AI thuộc một chương trình khác. Ngay cả khi Farmer ID, bản đồ ruộng đất và hồ sơ tư vấn nằm trên cùng một màn hình, thành tích của từng chương trình vẫn phải được đọc riêng.

Chỉ nhìn vào các con số, chương trình có vẻ thành công. Tuy vậy, các tổ chức xã hội dân sự vẫn chưa rút lại quan ngại. Nếu Aadhaar, mã định danh sinh trắc học cấp cho mọi người dân Ấn Độ, được gộp tại một nơi với hồ sơ đất đai và dữ liệu vị trí vệ tinh, thiệt hại khi toàn bộ khối thông tin ấy bị rò rỉ sẽ lớn hơn nhiều so với một vụ lộ dữ liệu riêng lẻ.

Hàn Quốc mới chỉ bắt đầu. Nền tảng AX Nông nghiệp Quốc gia dự kiến xây dựng trên những cánh đồng ở Muan sẽ được vận hành từ năm 2026 đến năm 2030 thông qua một công ty có mục đích đặc biệt, hay SPC, do khu vực công và tư cùng góp vốn. Kế hoạch đặt mục tiêu nổi khâu canh tác, phân loại và phân phối thành một dòng dữ liệu, nhưng hệ thống chưa từng được vận hành trên thực tế. So với AgriStack của Ấn Độ, nơi đã xử lý dữ liệu thực từ hàng chục triệu nông hộ trong hơn năm năm, dự án của Hàn Quốc vẫn ở giai đoạn thiết kế. Khoảng cách giữa kế hoạch và thực thi là bài toán mà AI nông nghiệp Hàn Quốc đang đối diện.

Những nỗ lực này không diễn ra hoàn toàn tách biệt giữa các quốc gia. Tháng 4 năm 2025, Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc tổ chức cuộc đối thoại toàn cầu đầu tiên về nông nghiệp số và trí tuệ nhân tạo, nơi các bên thảo luận nguyên tắc phát triển và quản trị AI trong nông nghiệp. Các trung tâm đổi mới nông nghiệp số tại Dominica, Grenada, Ethiopia và Morocco thuộc một chương trình khác đã triển khai từ năm 2021.

Cuộc đối thoại toàn cầu và các trung tâm đổi mới có liên hệ với nhau, nhưng chưa có lộ trình chính thức nào quy định một kiến trúc kỹ thuật cụ thể theo đó dữ liệu gốc phải ở trong biên giới quốc gia và chỉ giá trị tóm lược mới được gửi ra nước ngoài. Do mỗi nước có luật dữ liệu, mạng truyền thông và bộ máy quản lý nông nghiệp khác nhau, cần phân biệt các nguyên tắc chung với dự án triển khai ngoài thực địa.

Nhật Bản kết nối dữ liệu đất và thời tiết với dự báo sâu bệnh thông qua WAGRI, nền tảng dữ liệu công do Bộ Nông Lâm Ngư nghiệp và các viện nghiên cứu trực thuộc xây dựng. Zero-Agri kết nối với WAGRI không phải là thiết bị quản lý mực nước ruộng lúa. Đây là hệ thống điều khiển tưới và phân bón lỏng cho cây trồng trong nhà kính như cà chua, dâu tây và dưa chuột. Cảm biến mực nước và van cấp nước tự động cho ruộng lúa đã được thử nghiệm trong một hệ thống quản lý nước khác do Tổ chức Nghiên cứu Nông nghiệp và Thực phẩm Quốc gia phát triển.

Cả hai đều có thể là nông nghiệp dựa trên dữ liệu, nhưng van dung dịch dinh dưỡng trong nhà kính bằng kính và cửa lấy nước của ruộng lúa là hai thiết bị khác nhau. Tên của chúng có thể xuất hiện quanh cùng một nền tảng, song không thể mô tả chúng như một cỗ máy duy nhất.

Một nền tảng dù tinh vi đến đâu cũng vô ích nếu không có người vận hành được nó. Trong khảo sát năm 2025 của Diễn đàn Kinh tế Thế giới, 68 phần trăm người sử dụng lao động trong lĩnh vực nông nghiệp, lâm nghiệp và thủy sản cho rằng khoảng cách kỹ năng trên thị trường lao động là trở ngại đối với chuyển đổi ngành. Đây không phải là khảo sát trong đó 68 phần trăm lao động nông nghiệp nói rằng bản thân họ cảm thấy thiếu kỹ năng, cũng không đo mức độ sẵn sàng của sinh viên các trường nông nghiệp. Điều cần thiết không phải là một khóa học chỉ dạy cách dùng mô hình khổng lồ.

Việc đào tạo trên đồng ruộng và trong lớp học phải giải thích vì sao độ chính xác giảm khi nền của ảnh chụp lá thay đổi, cần nghi ngờ số đo nào trước khi cảm biến hỏng, và ai phải dùng một quyết định khi mô hình tự tin nhưng sai.

Các trường đại học nông nghiệp ở nhiều nước đang thành lập những tổ chức giáo dục và nghiên cứu kết hợp khoa học máy tính, nông học và khoa học dữ liệu. Chỉ giáo sư và sinh viên không thể nhìn thấy mọi vấn đề nảy sinh trên ruộng lúa. Chính phủ mở dữ liệu hành chính, doanh nghiệp cung cấp thiết bị và phần mềm, còn nông dân ghi lại thay đổi của đất và cây trồng. Mô hình năm vòng xoắn là một

khung lý thuyết giải thích quan hệ giữa trường đại học, chính phủ, doanh nghiệp, nông dân và cộng đồng địa phương. Nó mô tả cách năm chủ thể phân chia tri thức và trách nhiệm, chứ không phải thống kê toàn cầu về số cơ quan tham gia.

Chuyển một chỉ dẫn canh tác thẳng cho máy móc mà không qua con người kiểm tra vẫn là việc nguy hiểm. Vì vậy, một số nước yêu cầu cán bộ khuyến nông kiểm tra lại câu trả lời do AI tạo ra trước khi chuyển đến nông hộ. Trong các khu vực cấp phép tạm thời gọi là sandbox pháp lý, một dịch vụ AI mới được thử nghiệm trong thời gian và địa bàn giới hạn trước khi chính thức đưa ra thị trường. Đây là hàng rào an toàn tối thiểu để ngăn tai nạn khi mô hình đọc sai một giá trị rồi chỉ dẫn phun thuốc bảo vệ thực vật lên nhầm cánh đồng.

Câu hỏi con đường ấy thuộc về ai vẫn chưa có lời giải. Nếu nhà sản xuất máy kéo hoặc các tập đoàn điện toán đám mây khổng lồ gom dữ liệu trang trại vào trong hàng rào riêng, những nông dân tạo ra dữ liệu có thể không lấy lại và sử dụng được hồ sơ của chính mình. Ngành công nghiệp gọi tình trạng này là khóa chặt vào nhà cung cấp, hay vendor lock-in. Nó giống như giao chìa khóa cho người khác rồi không thể tự mở cửa nhà mình.

Gánh nặng lớn hơn đối với nông dân cao tuổi. Ở một làng miền núi có kết nối yếu, có thể hoàn toàn không có sóng. Ngay cả AI tinh vi nhất cũng bất lực trước người nông dân phải chỉnh lại kính để đọc những chữ nhỏ trên màn hình. Dù ở Ấn Độ hay Nhật Bản, cán bộ khuyến nông vẫn phải đi từ làng này sang làng khác, bấm nút thay nông dân và giải thích kết quả bằng lời. Việc xây dựng các hàng rào an toàn và đường dẫn dữ liệu này rất tốn kém. Nếu 254,6 tỷ won được chi cho một địa điểm duy nhất ở Muan, có thể hình dung chi phí phủ kín cả nước bằng hạ tầng công cộng số dày đặc.

Những quốc gia có ngân sách hạn hẹp có thể không bước vào cuộc đua được, làm tăng nguy cơ khoảng cách giữa nước giàu dữ liệu và nước nghèo dữ liệu ngày càng lớn.

Điểm đến tiếp theo của xu hướng này đã phần nào hiện rõ. Thay vì kéo dữ liệu gốc của mọi nông hộ về một máy chủ trung tâm lớn, học liên kết (Federated Learning) đang được thử nghiệm như một phương pháp giữ dữ liệu gốc trên máy tính của từng trang trại và chỉ trao đổi những gì đã học được tại đó. Song song với nó là các thử nghiệm ghi lịch sử trao đổi dữ liệu lên blockchain để không ai có thể sửa đổi. Nếu bổ sung AI tác tử có khả năng tự phán đoán và hành động, có thể

đến ngày AI tự kết hợp số đo thời tiết và đất, mở van và cho drone cất cánh mà không cần nông dân nhìn màn hình.

Chưa ai xác định được ai sẽ chịu trách nhiệm khi phán đoán ấy sai.

Trên những cánh đồng Muan vẫn chưa có nhà kính bằng kính hay cảm biến. Chỉ vài cọc khảo sát đứng giữa cỏ dại, đánh dấu bốn góc của các nhà kính sẽ được dựng lên. Khi dữ liệu đầu tiên xuất hiện từ mảnh đất này vài năm nữa, chúng sẽ thuộc về người nông dân nuôi trồng cây cối, hay thuộc về công ty xây con đường mà dữ liệu đi qua?

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. MDPI. (2025). Big data analytics and machine learning for smart agriculture. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-7258-4878-2>
2. Agriculture INDIA. (2026). Post budget webinar 2026: Bharat Vistaar, AI-powered digital public infrastructure for agriculture [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=H_Wfqw3lbhc
3. WBG Civil Society Engagement. (2026). CSPF: Examining how AI and digital agriculture create jobs in developing countries [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=9rRCamBUBpU>
4. Committee on World Food Security. (2026). Morning session: Harnessing AI, digitalization and data governance for food security and nutrition [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=uQ-6ZL9UtvU>
5. C-DAC. (2026). AI in agriculture: Transforming India's Krishi landscape [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=IV3_VnWiBpM
6. University of Agricultural Sciences, Dharwad. (2026). National conference on next-gen farming: Artificial intelligence, automation and digital transformation [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=BbcYxst1MFc>
7. MIT College of Management, Pune. (2026). AgriTech, AI, and digital transformation in agriculture [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=hEwX3Bj_M6o
8. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Digital agriculture and AI: Innovation at FAO. <https://www.fao.org/innovation/digital-agriculture-and-ai-innovation/en>
9. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). The global network of digital agriculture innovation hubs. <https://www.fao.org/in-action/global-network-digital-agriculture-innovation-hubs/en>
10. Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn Hàn Quốc. (2026). Hướng dẫn cuộc thi thành lập SPC Nền tảng AX Nông nghiệp Quốc gia. Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn Hàn Quốc. <https://www.mafra.go.kr/bbs/home/791/594309/download.do>
11. Press Information Bureau, Government of India. (2026). Bharat Vistaar and AI-based agricultural advisory: Official progress figures. <https://www.pib.gov.in/PressReleaselframePage.aspx?PRID=2289031>

1.2

Cảm biến IoT và giám sát bằng AI biên

Lúc năm giờ sáng, một thanh màu xám dày chừng hai ngón tay cắm trong bùn ở bờ ruộng. Đèn xanh ở đầu thanh nháy ba lần rồi tắt. Những nhịp sáng báo rằng thiết bị đang đo lượng nước ngầm vào đất suốt đêm và nhiệt độ đất đã hạ thấp đến đâu. Chủ ruộng vẫn còn trong chăn khi lần đầu bật điện thoại. Một biểu đồ đường trên màn hình hiển thị mực nước và tình trạng đất của ba thửa ruộng trong đêm trước.

Thanh màu xám ấy là cảm biến Internet vạn vật, hay IoT. Khi cắm trong đất, nó đo mức độ dẫn điện của đất rồi chuyển số đo thành ước tính độ ẩm. Thiết bị thường được lắp cùng cảm biến dinh dưỡng đo nồng độ nitơ, photpho và kali theo phần triệu, cảm biến pH đo độ axit, cùng cảm biến thời tiết đo nhiệt độ và độ ẩm không khí. Một camera nhỏ cũng có thể được treo phía trên ruộng. Cứ vài giây, nó chụp lá lúa để tìm vùng úa vàng hoặc côn trùng trên hạt. Đi bộ khắp một cánh đồng lớn để kiểm tra từng nơi có thể mất cả ngày. Vài cảm biến đặt trong mỗi thửa ruộng có thể làm công việc ấy suốt đêm.

Các thiết bị đo đất, không khí và lá này truyền tín hiệu theo những tuyến khác nhau. Ở khoảng cách ngắn, mạng vô tuyến ZigBee chuyển tiếp tín hiệu. Mạng gửi xác nhận rằng giá trị đã được nhận và truyền lại khi kết nối thất bại. Các giá trị thu thập đổ về một cổng nhỏ trên bờ ruộng. Chỉ sau khi tính toán, cổng mới điều khiển thiết bị vật lý như van hoặc vòi phun. Ngay cả lúc đó, nó chỉ chọn kết quả đã rút gọn để tải lên đám mây khi có kết nối internet. Trên đồng bằng rộng, khoảng cách lắp đặt có thể được xác định theo mức khoảng một cảm biến cho mỗi 50 đến 100 mẫu Trung Quốc (mu) ruộng lúa.

Ở nơi địa hình gồ ghề hoặc đất biến đổi mạnh, người ta phân tích thông tin địa lý trước để quyết định chỗ nào cần đặt cảm biến dày hơn.

Vấn đề là các con số này nên được tính ở đâu. Hệ thống gửi số đo cảm biến đến máy chủ xa rồi chờ trả lời sẽ có độ trễ khác nhau tùy chất lượng kết nối và kích thước dữ liệu. Độ trễ tăng vào ngày núi che tín hiệu hoặc mưa lớn làm gián đoạn trạm gốc. Vì vậy, AI biên được dùng để máy tính nhỏ cạnh ruộng thu nhỏ ảnh, loại

giá trị bất thường và chỉ gửi kết quả cần thiết. Những bo mạch như Raspberry Pi và Jetson Nano đảm nhiệm công việc này. Thiệt hại mà cây trồng chịu do nóng và thiếu nước phụ thuộc vào giống, giai đoạn sinh trưởng và thời gian phơi nhiễm, nên cảm biến không thể phán đoán chỉ dựa trên một ngưỡng nhiệt độ.

Một mô hình lớn khó chạy nguyên vẹn trên máy tính nhỏ. Kỹ sư dùng lượng tử hóa để biểu diễn giá trị tính toán bằng ít bit hơn; cắt tỉa để loại các kết nối ít ảnh hưởng; và chưng cất tri thức để chuyển phán đoán của mô hình lớn sang mô hình nhỏ. Nghiên cứu TinyWeedNet năm 2026 báo cáo độ chính xác 97,26 phần trăm trên bộ dữ liệu kiểm thử công khai DeepWeeds, thời gian suy luận dưới 90 mili giây trên bo mạch STM32H7 và kích thước mô hình khoảng 1,815 megabyte. Tuy vậy, kết quả đến từ một phép chuẩn dùng dữ liệu ảnh công khai, không phải thử nghiệm dài hạn giữa ruộng lúa.

Mức tiết kiệm nước và giảm phát thải methane từ phương pháp tưới ngập khô xen kẽ phải được kiểm tra bằng thử nghiệm đồng ruộng tách biệt với mô hình phân loại ảnh này.

Ảnh do camera chụp không đi thẳng vào mô hình. Ảnh gốc có kích thước và độ sáng khác nhau, vì vậy máy tính biên trước hết cắt và đổi kích thước thành hình vuông 224 pixel mỗi cạnh. Nó dùng phép tính gọi là nội suy song tuyến tính để lấp mượt khoảng trống giữa các pixel. Giá trị màu được chuẩn hóa theo một tiêu chuẩn định trước. Chỉ sau bước chuẩn bị này, ảnh mới được đưa vào mô hình phân biệt sâu bệnh.

Một thí nghiệm thử nghiệm xe bốn bánh gắn camera chạy theo hàng cây. Khi thực hiện phát hiện biên Canny và biến đổi Hough trên Raspberry Pi, chiếc xe chạy mười lần qua đoạn ruộng ngô dài 30 mét. Sai số ngang trung bình là 6,2 centimet vào ngày nhiều mây, 8,0 centimet vào ngày nắng và 12,5 centimet lúc chạng vạng. Bài báo không có bộ lọc Kalman, chức năng hiệu chỉnh lái hai mươi lần mỗi giây, lưỡi nhỏ cỏ ruộng lúa hay chức năng quyết định lượng phân bón. Hiệu năng bám hàng cây phải được tách khỏi hiệu năng nhỏ cỏ hoặc kê lượng phân, vốn thuộc những thử nghiệm khác.

Đồng ruộng không gọn gàng như sách giáo khoa. Pin giảm hiệu năng vào mùa đông, còn núi và mưa lớn làm đứt tín hiệu vô tuyến. Cảm biến tiết kiệm điện bằng cách ở chế độ ngủ phần lớn thời gian, chỉ bật vào giờ đã định hoặc khi một giá trị thay đổi đột ngột. Đến cuối năm 2025, số thiết bị LoRaWAN triển khai trên toàn thế giới, dùng ít điện để truyền những giá trị nhỏ đi vài kilomet, đã vượt 125 triệu. Con

số hơn 25 phần trăm do LoRa Alliance công bố là tốc độ tăng trưởng kép hằng năm, không phải mức tăng của riêng một năm.

Phạm vi và tốc độ truyền thông thay đổi theo công suất phát, độ cao ăng-ten, địa hình và vật cản, nên số liệu từ một trang trại Nhật Bản không thể được trình bày như thông số phổ quát.

Các kết quả tóm lược tạo ra theo cách này cũng đi đến những nơi xa. Thiết bị di chuyển ra ngoài ruộng như drone và máy kéo dùng mạng di động thế hệ thứ tư, thứ năm cùng liên kết vệ tinh. Ở các cánh đồng miền núi xa xôi, nơi ngay cả những mạng này cũng khó vươn tới, mô-đun liên lạc cũ thiết kế cho tin nhắn văn bản vẫn được dùng để chuyển một giá trị ngắn, dù chậm. Ở nơi hoàn toàn không có internet, cổng mở một máy chủ vô tuyến cục bộ nhỏ và trao đổi giá trị trực tiếp với ứng dụng di động của nông dân mà không lên mạng. Khi có kết nối, nó tải các giá trị đã làm sạch lên cơ sở dữ liệu đám mây qua một giao thức nhắn tin nhẹ.

Những hồ sơ này được dùng khi huấn luyện mô hình tiếp theo.

Muốn so sánh tốc độ và mức tiêu thụ điện của điện toán đám mây với điện toán biên, phải dùng cùng camera, cùng mô hình và cùng mạng vô tuyến. So sánh sẽ mất giá trị nếu thời gian phản hồi, mức tiêu thụ pin và tỷ lệ mất gói lấy từ các bài báo khác nhau lại được trình bày như kết quả trước và sau của cùng một thiết bị. Thu nhỏ ảnh ngoài đồng rõ ràng làm giảm lượng dữ liệu gửi đến máy chủ và cho phép một số quyết định tiếp tục khi mất kết nối. Tuy nhiên, mức tiết kiệm phải được báo cáo như kết quả của một thử nghiệm cụ thể, nêu rõ thiết bị, nhiệm vụ và điều kiện vô tuyến.

Phát hiện một cảm biến đang báo sai cũng khó. Cảm biến dinh dưỡng nằm trong đất nhiều tháng dần mất kim loại ở điện cực do độ mặn và phản ứng hóa học. Khi ấy, màn hình có thể báo giá trị thấp như thể đất khô cằn dù vẫn đủ nước. Điều ngược lại cũng có thể xảy ra: đất bình thường luôn hiện là ướt. Nó giống chiếc nhiệt kế hỏng báo 39 độ khi người không hề sốt. Để lọc lỗi, máy tính biên chạy nhiều lớp kiểm tra mỗi khi có giá trị mới.

Phương pháp biểu đồ hộp nhận diện số đo lệch mạnh khỏi trung bình gần đây; bộ lọc trung bình trượt làm dịu đỉnh tăng nhất thời; phương pháp nội suy coi một bước nhảy không thể xảy ra về mặt vật lý trong vài giây là đáng ngờ và tạm lấp khoảng trống bằng giá trị trước đó.

Một nghiên cứu năm 2025 tiến thêm một bước, đề xuất cách nhận diện cảm biến hồng bằng phân tích cụm, gom nhiều số đo cảm biến và xem xét cả mức tương đồng lẫn độ phân tán của chúng. Lỗi cảm biến chia thành hai nhóm lớn. Một nhóm là giá trị bị lệch rồi đứng yên về một phía. Nhóm kia là giá trị trôi dần theo thời gian. Cả hai xảy ra thường xuyên hơn nhiều trong môi trường khắc nghiệt của ruộng đồng so với phòng thí nghiệm. Không hiếm trường hợp cả ruộng bị ngập bởi trận mưa mùa hè hoặc sương giá mùa đông làm đông cứng tiếp điểm trên bo mạch.

Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc khuyến nghị hiệu chuẩn cảm biến pH và EC mỗi tháng, đồng thời làm sạch đất cùng tạp chất trên bề mặt. Máy móc dù chính xác đến đâu cũng không thể thay bàn tay con người rửa đầu cảm biến sau khi làm việc trong bùn đất.

Mô hình được huấn luyện riêng trên bo mạch của từng trang trại có thể chỉ gửi đến máy chủ trung tâm các tham số thay đổi trong quá trình huấn luyện, thay vì dữ liệu gốc chứa tên người hoặc vị trí ruộng. Cách này gọi là học liên kết. Nó có lợi thế là gửi ít dữ liệu gốc ra ngoài trang trại hơn, nhưng không loại bỏ nguy cơ thông tin rò rỉ từ tham số hoặc một trang trại tham gia gửi giá trị độc hại. Cũng chưa thể nói rằng việc tuân thủ luật dữ liệu cá nhân của Ấn Độ đã được chứng minh. Học liên kết là một thiết kế có thể hỗ trợ bảo vệ quyền riêng tư. Cơ sở pháp lý, kiểm soát truy cập và kiểm toán an ninh vẫn phải được thiết lập riêng.

Các trang trại đưa AI biên vào sử dụng đã báo cáo những trường hợp giảm lượng nước, lưu lượng truyền thông, thuốc bảo vệ thực vật hoặc rút ngắn thời gian lao động. Tuy nhiên, chưa có phân tích tổng hợp nào xác lập khoảng 25 đến 50 phần trăm như mức trung bình trên nhiều loại cây. Kết quả khác nhau nhiều theo đất, khí hậu, giá thiết bị, chi phí liên lạc và khả năng có người sửa chữa. Giá ban đầu của cảm biến và robot là rào cản cao đối với nông hộ nhỏ. Chính cơ cấu chi phí này, chứ không phải một con số duy nhất, là lý do người ta bàn đến bo mạch chạy bằng năng lượng mặt trời, cho thuê chung và dịch vụ hợp đồng.

Phán đoán tạo ra có thể được truyền không chỉ bằng chữ trên màn hình mà còn bằng giọng nói hiểu phương ngữ địa phương. Đối với nông dân cao tuổi khó đọc chữ, một câu phát ra từ loa có thể đáng tin hơn một biểu đồ.

Giám sát bằng AI biên sẽ không dừng ở đây. Các hệ thống đang tiến tới việc đặt camera nhiệt độ nhiệt độ và camera siêu phổ tách những bước sóng mắt thường không thấy bên cạnh camera màu thông thường, sau đó chồng toàn bộ dữ liệu

của chúng với ảnh chỉ số thực vật từ vệ tinh ngay trên bo mạch ở bờ ruộng. Kết hợp số đo đồng thời từ nhiều thiết bị giúp phân biệt chính xác hơn thiệt hại do hạn với thiệt hại do sâu bệnh.

Công nghệ còn mở rộng theo hướng khác: khi nối với mô hình ngôn ngữ lớn chuyên biệt cho nông nghiệp, nó có thể trả lời người nông dân hỏi bằng phương ngữ xem ruộng đang có vấn đề gì, đồng thời dùng số đo cảm biến vừa thu để giải thích việc cần làm trong ngày.

Chỉ các giá trị đã lọc mới đến điện thoại của nông dân. Một thông báo nói hai thửa ruộng thiếu nước trong đêm và van đã tự mở. Thông báo khác cho biết số đo từ thửa thứ ba bị loại vì là lỗi cảm biến. Chỉ sau khi kiểm tra các tin nhắn này, người nông dân mới xử lý.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Geethanjali, S. G., & Karan, N. (2025). Vision Transformer-Assisted IoT System for Smart Agriculture and Multi Crop Disease Detection. IARJSET, 12(8).
<https://doi.org/10.17148/IARJSET.2025.12832>
2. Nezami, M., & Kumar, R. (2026). Multimodal Edge Intelligence for Crop Disease Detection and Irrigation Advisory in Precision Agriculture. International Journal of Science, Strategic Management and Technology, 2(5), 1-9.
<https://doi.org/10.55041/ijst.v2i5.232>
3. Hajirad, I. (2026). Precision and Smart Agriculture: Harnessing IoT for Enhanced Productivity and Sustainability. Intelligent Agriculture, 2(1), 84-105.
<https://doi.org/10.54963/ia.v2i1.2408>
4. Edge intelligence for smart agriculture: An artificial intelligence framework for precision farming and sustainable crop management. (2026).
<https://doi.org/10.21474/jncs01/133>
5. Hermantoro, Renjani, R. A., & Supriyanto, G. (2026). Artificial Intelligence and IoT-Based Precision Irrigation for Energy-Efficient Tropical Agriculture. International Journal of Management and Business Intelligence, 4(3), 685-698.
<https://doi.org/10.59890/ijmbi.v4i3.25>
6. AgroPest-Trust Edge : conception et audit d'un système frugal, explicable et conscient de l'incertitude pour la reconnaissance de ravageurs et stress biotiques sur smartphone. (2026).
<https://doi.org/10.61532/rime262136>
7. [Video]. (2025). [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=iqLmEFT1wZo>
8. LoRa Alliance. (2026). LoRaWAN enters its next growth phase as massive IoT scales globally.
<https://resources.lora-alliance.org/home/lorawan-enters-its-next-growth-phase-as-massive-iot-scales-globally>
9. Kavinsky, M. (2026). LoRaWAN pushes deeper into smart agriculture with satellite-backed connectivity. IoT Business News.
<https://iotbusinessnews.com/2026/07/08/lorawan-pushes-deeper-into-smart-agriculture-with-satellite-backed-connectivity/>

10. Zhang, Y., Lu, Y., Martinez-Rau, L. S., Qiu, Q., & Bader, S. (2026). Real-time on-device weed identification using a hardware-efficient lightweight CNN. *Frontiers in Plant Science*, 17, 1747863.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1747863>
11. A novel data healing framework for outlier detection and recovery approach in the internet of agriculture things sensor network. (2025). *Quality & Quantity*.
<https://doi.org/10.1007/s11135-025-02402-5>
12. Aldağ, M. C., & Eker, B. (2026). Development and Field Evaluation of an Autonomous Four-Wheel-Drive Agricultural Vehicle Tracking Crop Rows Using Computer Vision Technology. *Journal of Agricultural Production*, 7(1), 13-19.
<https://doi.org/10.56430/japro.1826810>

1.3

Quản trị dữ liệu và quản lý tài nguyên

Một buổi chiều tháng 6, nước lấp lánh trên mặt ruộng, người nông dân ngồi xổm trên bờ, đặt xẻng xuống rồi lấy điện thoại ra. Một nút màu xanh xuất hiện trên màn hình ứng dụng tưới thông minh. Ứng dụng hỏi người nông dân có đồng ý cho thu thập vị trí và thông tin canh tác hay không. Ngay khoảnh khắc nút được nhấn, lượng nước dùng trên ruộng, tình trạng đất và cả tốc độ sinh trưởng của lúa đều chảy về một máy chủ ở đâu đó.

Xác định ai sở hữu những con số đo được ngoài đồng là việc khó. Bộ Quy tắc Ứng xử về Chia sẻ Dữ liệu Nông nghiệp của Liên minh châu Âu coi nông dân là người tạo ra hoặc người cung cấp nguồn dữ liệu, đồng thời khuyến nghị để họ kiểm soát điều kiện truy cập và sử dụng bằng hợp đồng. Không nên đọc quy tắc này như một quy định trao cho nông dân quyền sở hữu pháp lý đối với mọi dữ liệu. Số đo cảm biến gốc và dự báo do doanh nghiệp xử lý có thể gắn với những quyền và bí mật kinh doanh khác nhau. Vì bộ quy tắc chỉ là khuyến nghị chứ không phải luật, quyền thực tế thay đổi theo hợp đồng dịch vụ và pháp luật từng nước.

Tháng 4 năm 2026, bang Nebraska của Hoa Kỳ trở thành nơi đầu tiên giải quyết vấn đề này bằng luật. Khi thống đốc ký Đạo luật Quyền riêng tư Dữ liệu Nông nghiệp, đạo luật tuyên bố dữ liệu về đất, khí hậu, cây trồng và vật nuôi tạo ra tại trang trại thuộc về chủ trang trại, miễn là dữ liệu chưa được công khai hoặc gộp với dữ liệu của nhiều trang trại. Doanh nghiệp phải ký hợp đồng bằng văn bản với nông dân trước khi dùng dữ liệu. Từ năm 2027, việc bán lại dữ liệu gốc mà không có sự đồng ý bằng văn bản của nông dân sẽ bị cấm.

Luật còn quy định rõ cơ quan có thẩm quyền xử phạt. Tổng chưởng lý bang Nebraska thông báo hành vi vi phạm và cho bên vi phạm bốn mươi lăm ngày để khắc phục. Nếu vẫn không sửa, mỗi hành vi vi phạm có thể bị phạt dân sự một nghìn đô la. Luật không mở đường cho nông dân trực tiếp kiện doanh nghiệp. Thay vào đó, chính quyền giữ vai trò giám sát. Tuy vậy, luật vẫn có kẽ hở. Ngay khi dữ liệu được trộn với dữ liệu của nhiều trang trại, chúng không còn thuộc riêng một nông dân, trong khi chính doanh nghiệp thu thập dữ liệu quyết định có gom chúng vào một kho lớn hay không.

Một vấn đề gần gũi hơn có thể xảy ra trước khi tranh chấp sở hữu được giải quyết: doanh nghiệp lưu dữ liệu có thể đóng cửa. Nếu một trang trại đã dùng dịch vụ nông trại thông minh nhiều năm bỗng nhận thông báo ứng dụng ngừng hoạt động, hồ sơ kiểm tra đất, lịch sử dùng phân bón và biểu đồ sản lượng hằng năm tích lũy từ lâu có thể biến mất cùng lúc. Trang trại không sao chép hồ sơ về máy tính của mình hay sổ giấy. Khoảnh khắc máy chủ tắt, ngay cả việc hỏi ai sở hữu những con số chỉ từng tồn tại trên máy chủ ấy cũng trở nên khó khăn.

Chưa nhiều nông dân hình thành thói quen thường xuyên tải dữ liệu của mình xuống và lưu một bản riêng, tức thực thi quyền di chuyển dữ liệu trong đời sống. Một quyền được viết trong luật không có nhiều giá trị nếu nó không trở thành hành vi thường ngày. Những nông dân từng trải qua cảnh dịch vụ đóng cửa thường thận trọng hơn khi giao dữ liệu cho dịch vụ tiếp theo. Có người quyết định không dùng ứng dụng nữa.

Muốn sự đồng ý là thật, quyết định phải được đưa ra không có cưỡng ép, người dùng phải được báo trước điều gì sẽ xảy ra và phải có cách rút lại quyết định về sau. Một màn hình chỉ có điều khoản dài cùng một nút bấm khó đáp ứng các điều kiện ấy. Đạo luật Dữ liệu của Liên minh châu Âu trao cho người dùng sản phẩm kết nối quyền truy cập dữ liệu do thiết bị của họ tạo ra. Ngày áp dụng chung là 12 tháng 9 năm 2025. Ngày 12 tháng 9 năm 2026 là mốc mà từ đó sản phẩm kết nối và dịch vụ liên quan đưa ra thị trường phải được thiết kế để người dùng dễ truy cập dữ liệu.

Ngày một quyền có hiệu lực và mốc tham chiếu cho nghĩa vụ thiết kế sản phẩm phải được hiểu riêng.

Khi số đo từ nhiều trang trại tích tụ trên một máy chủ, doanh nghiệp có thể nhìn thấy bức tranh khu vực mà từng nông dân riêng lẻ không thấy. Unified Farmer Service Interface (UFSI) của Ấn Độ là tiêu chuẩn trao đổi được thiết kế để kết nối dịch vụ công và tư theo định dạng chuẩn, đồng thời cho phép truy cập các sổ đăng ký cốt lõi trong phạm vi đã đồng ý. Thành tích 101,8 triệu AgriStack Farmer ID tính đến tháng 7 năm 2026 đã được xác nhận. Tuy nhiên, chưa có đánh giá chính thức nào chứng minh tuyên bố gộp rằng chỉ riêng UFSI đã tiết kiệm 20 đến 30 phần trăm nước tưới, đồng thời tăng tốc chi trả bảo hiểm và xét duyệt khoản vay.

Chức năng trao đổi dữ liệu, hiệu quả tiết kiệm nước của một công nghệ tưới cụ thể và thời gian xử lý dịch vụ tài chính phải được đánh giá riêng.

Hai loại thông tin có tính chất khác nhau bị trộn trong khối dữ liệu này. Loại thứ nhất là thông tin cá nhân. Ngay khi tên và số điện thoại của chủ đất được gắn với tọa độ xác định vị trí ruộng, dữ liệu trở thành thông tin cá nhân có thể nhận diện một người. Ảnh drone chụp cánh đồng cũng vậy nếu thấy rõ ranh giới và số thửa. Xóa tên và số chưa chắc làm dữ liệu an toàn. Trong một làng chỉ có vài thửa ruộng, hàng xóm có thể biết ruộng của ai chỉ từ vị trí, diện tích và loại cây. Nó giống như tháo nhãn tên khỏi quần áo nhưng vẫn để lộ hình dáng và kích cỡ đủ để đoán người mặc.

Gọi dữ liệu là ẩn danh không có nghĩa chúng thật sự không thể nhận diện.

Loại thứ hai là thông tin bí mật kinh doanh. Một thửa ruộng mỗi năm cho bao nhiêu sản lượng, dùng bao nhiêu phân và tốn bao nhiêu tiền công đều là thông tin kinh doanh của nông hộ. Nếu nông hộ bên cạnh hoặc nhà cung cấp vật tư biết các con số này, họ sẽ có lợi thế khi định giá trong giao dịch tiếp theo. Chỉ cần theo dõi thời điểm và lượng phân bón mua vào, người ta có thể đoán trước vụ sau sẽ trồng cây gì. Hai dạng thông tin có tính chất khác nhau nên cần cách xử lý khác nhau. Trên thực tế, chúng thường được lưu cùng nhau trên một máy chủ và trong cùng một ứng dụng.

Nền tảng AX Nông nghiệp Quốc gia do Chính phủ Hàn Quốc thúc đẩy cũng không thể tránh vấn đề này. Một liên danh của tỉnh Jeolla Nam và thành phố Gwangju được chọn làm đơn vị vận hành cuối cùng vào tháng 7 năm 2026. Kế hoạch xây nền tảng trị giá 254,6 tỷ won tại Muan, tỉnh Jeolla Nam đi kèm một điều kiện: ngay từ đầu phải có quy trình nhận diện và lọc riêng thông tin cá nhân cùng thông tin nhạy cảm trong dữ liệu thu thập. Hai nhóm phải được phân biệt từ thời điểm thu thập, không phải sau khi mọi dữ liệu đã được gom về.

Nếu dữ liệu từ nhiều nguồn được kết hợp trong một bộ máy tự động tính cách phân bổ nước tưới hoặc phân bón, chúng phải phối hợp được với nhau. Cộng đồng nghiên cứu nông nghiệp quốc tế thường viện dẫn các nguyên tắc FAIR làm chuẩn: dữ liệu phải có thể tìm thấy, có thể truy cập, có khả năng tương tác và có thể tái sử dụng. Lời lẽ dễ hiểu nhưng ngoài đồng có nhiều trở ngại. Một cơ quan ghi thành phần phân bón theo phần triệu, hay ppm, trong khi cơ quan khác dùng kilogram trên hecta, hay kg/ha. Ngay cả tên đơn vị hành chính cũng được viết hơi khác giữa các cơ quan.

Nếu đưa nguyên các con số ấy vào cùng một mô hình, mô hình nhằm đơn vị có thể tính lượng phân khác xa thực tế.

Đó là lý do có đề xuất dùng AGROVOC, bộ từ điển thuật ngữ nông nghiệp do Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc quản lý, làm tiêu chuẩn chung. Chia sẻ dữ liệu chỉ có ý nghĩa sau khi mọi người thống nhất dùng cùng một từ với cùng một nghĩa. Với hỗ trợ của Quỹ Bill & Melinda Gates, CABI, một tổ chức nghiên cứu nông nghiệp quốc tế, bắt đầu dự án hỗ trợ chia sẻ dữ liệu nông nghiệp có trách nhiệm từ năm 2025. Kết luận của dự án rất rõ.

Có thể xây tiêu chuẩn để sắp xếp dữ liệu tốt về mặt kỹ thuật, nhưng phương pháp bảo đảm lợi ích thật sự quay lại với những nông dân cung cấp dữ liệu đầu tiên phải được thiết kế lại cho từng nơi và từng hoàn cảnh.

Trong các phép tính phân bổ nước và phân bón, những thửa ruộng không có cảm biến có nguy cơ biến mất khỏi màn hình. Tình trạng thiếu nước ở ruộng có thiết bị hiện lên thành con số, còn ruộng không có thiết bị không để lại hồ sơ dù chịu cùng một đợt hạn. Thứ Chính phủ Kenya công bố tháng 3 năm 2026 không phải đạo luật cuối cùng đã có hiệu lực, mà là dự thảo chính sách dữ liệu nông nghiệp và dự thảo luật thông tin nông nghiệp số. Tham vấn công chúng diễn ra vào cuối tháng đó, sau đó văn bản tiếp tục được soạn thảo.

Thay vì nói quyền của nông hộ nhỏ đã được luật bảo đảm, sẽ chính xác hơn khi nói cuộc thảo luận về việc đưa quyền sở hữu và quyền truy cập dữ liệu vào luật đã bắt đầu.

Ra ngoài cổng trang trại, bức tranh sử dụng tài nguyên trở nên lộn xộn. Tại trang trại, cảm biến và AI được dùng để tiết kiệm từng giọt nước, từng nắm phân. Các trung tâm dữ liệu huấn luyện và vận hành AI lại đi theo chiều ngược lại. Chúng tiêu thụ lượng nước làm mát và điện đáng kể. Một trung tâm dữ liệu ở đâu đó có thể dùng lượng nước bằng, hoặc lớn hơn, lượng ruộng lúa đã tiết kiệm. Các cách giảm mâu thuẫn này đã được đề xuất: dùng AI nhẹ, hay TinyML, hoàn tất tính toán cạnh cảm biến thay vì dựa vào mô hình lớn nặng nề; và đặt ngân sách giới hạn mức tiêu thụ điện cùng nước tại trung tâm dữ liệu.

Ta trở lại bờ ruộng. Người nông dân nhấn nút. Lượng nước dùng và tình trạng đất của thửa ruộng được lưu thành một dòng trong cơ sở dữ liệu ở đâu đó. Khi hạn hán đến vào mùa xuân năm sau, dòng ấy có thể trở thành bằng chứng để quyết định ruộng này được cấp nước trước hay sau. Người nông dân chụp lại màn hình đồng ý và lưu trên điện thoại, chuẩn bị cho ngày có ai hỏi dữ liệu đã được dùng ra sao.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Sangwa, S., & Mutabazi, P. (2025). Artificial intelligence in agriculture: Ethical stewardship, responsible innovation, and governance for sustainable food systems. *Intelligent Agriculture*, 1(2), 25-45.
<https://doi.org/10.54963/ia.v1i2.1684>
2. Mole, M. (2025). Revolutionizing agricultural water management through AI-driven irrigation systems: A comprehensive framework for sustainable farming practices. *International Journal of Computing and Engineering*, 7(21), 1-11.
<https://doi.org/10.47941/ijce.3092>
3. Amar, S., Bori, N., & Cörvers, R. (2026). From collection to control: Data governance, digital technologies, and the politics of inclusion in the digitalisation of smallholder agriculture. *Outlook on Agriculture*, 55(1), 19-27.
<https://doi.org/10.1177/00307270251410944>
4. Scobey, W. (2026). Nebraska's Agricultural Data Privacy Act and similar state efforts. National Agricultural Law Center.
<https://nationalaglawcenter.org/nebraskas-agricultural-data-privacy-act-and-similar-state-efforts/>
5. European Commission. (2026). Data Act. Shaping Europe's Digital Future.
<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/data-act>
6. NewsPim. (2026). Nhà vận hành tư nhân được chọn cho Nền tảng AX Nông nghiệp Quốc gia...công ty có mục đích đặc biệt sẽ được thành lập trong năm.
<https://www.newspim.com/news/view/20260727001240>
7. Penrhys-Evans, T. (2025). Making data work better in agriculture with FAIR principles. CABI Blog.
<https://blog.cabi.org/2025/05/27/making-data-work-better-in-agriculture-with-fair-principles/>
8. Committee on World Food Security. (2026). Harnessing AI, digitalization and data governance for food security and nutrition: Morning session [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=uQ-6ZL9UtvU>
9. Agriculture INDIA. (2026). Post budget webinar 2026: Bharat Vistaar, AI-powered digital public infrastructure for agriculture [Video]. YouTube.
https://www.youtube.com/watch?v=H_Wfqw3lbhc

Chương 2

Giám sát cây trồng và chẩn đoán hình ảnh trong nông nghiệp chính xác

2.1

Phân tích viễn thám bằng máy bay không người lái (UAV) và vệ tinh

Sáng sớm, trên bờ ruộng còn phủ sương, một người cầm máy tính bảng cho máy bay không người lái cất cánh. Trên màn hình do thiết bị bay thấp trên những khóm lúa gửi về hiện một tấm bản đồ rải các vệt xanh, vàng và đỏ. Cùng một thửa ruộng, chỗ xanh đậm, chỗ vàng úa. Nhìn bằng mắt, đó chỉ là một ruộng lúa xanh đều.

Ánh sáng tạo nên khác biệt ấy. Chất diệp lục trong lá hấp thụ ánh sáng đỏ cần cho quang hợp. Ngược lại, cận hồng ngoại mà mắt người không thấy đập vào các lớp tế bào trong lá rồi bật trở lại. Lá càng khỏe, lớp tế bào càng dày và xốp, phản xạ cận hồng ngoại càng mạnh. Lá bệnh hoặc khô giảm phản xạ này. Tỷ lệ ánh sáng hấp thụ và phản xạ phân biệt lá khỏe với lá héo. Mắt người không đọc được tỷ lệ đó, nhưng cảm biến chụp tách nhiều bước sóng thì đọc được.

Chỉ số biến tỷ lệ này thành một số là chỉ số thực vật (NDVI). Nó lấy lượng phản xạ cận hồng ngoại trừ lượng phản xạ đỏ, rồi chia cho tổng hai giá trị. Một số cho biết ruộng hôm nay sung sức hay rũ xuống. Tuy vậy, nó có giới hạn. Khi lúa mọc quá rậm, phản xạ cận hồng ngoại vượt một mức nhất định thì không tăng nữa. Giống như cân đã chạm vạch cuối: vật 100 kilôgam và 150 kilôgam đều ghi 100. Chỉ số tạo ra để vượt giới hạn ấy là chỉ số rìa đỏ (NDRE). Nó đọc thay dải rìa đỏ, dải bước sóng hẹp giữa xanh và cận hồng ngoại, để phân biệt kỹ hơn nồng độ diệp lục và nitơ trong lá.

Không chỉ phản xạ ánh sáng mới là tín hiệu. Nhiệt độ bề mặt lá cũng đổi theo mức độ các khí khổng mặt sau lá mở và đóng. Lúa thiếu nước đóng khí khổng để giảm thoát hơi, khi đó nhiệt độ lá tăng nhẹ như người hơi sốt. Cảm biến nhiệt đo từ xa thay đổi nhiệt độ này và phát hiện áp lực hạn hán trước mắt người. Cảm biến lidar bắn laser hàng chục nghìn lần và đo thời gian tín hiệu đập vào tầng lá quay về để đo chiều cao và thể tích cây. Cảm biến siêu phổ tách lá thành hàng chục đến hàng trăm kênh bước sóng sát nhau, bắt được cả thay đổi màu rất nhỏ ở tế bào bị mầm bệnh xâm nhập.

Vệ tinh chụp lặp lại cùng mảnh đất từ độ cao hàng trăm kilômét. Dữ liệu Sentinel-2 miễn phí và có chu kỳ quay lại khoảng 5 ngày. Landsat 8 và 9 cũng miễn phí; mỗi vệ tinh đi qua cùng địa điểm 16 ngày một lần, kết hợp hai vệ tinh là 8 ngày.

PlanetScope quan sát gần như hằng ngày nhưng là dịch vụ thương mại. Khi xem diện tích cấp quốc gia, ảnh rộng và miễn phí hữu ích; khi nhìn vài ngày bệnh lan rộng, cần ảnh có khoảng chụp ngắn. Nông hộ luôn cân nhắc giữa giá và độ phân giải thời gian.

Hàn Quốc có thêm một vệ tinh quan sát trong năm 2026. Viện Nghiên cứu Hàng không Vũ trụ Hàn Quốc đã phóng Vệ tinh Cỡ vừa Thế hệ mới số 4 từ Căn cứ Lực lượng Không gian Vandenberg của Hoa Kỳ vào tháng 7 vừa qua. Theo thông số Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn công bố, nó nặng 514 kilôgam, có bề rộng quan sát 120 kilômét và độ phân giải cỡ 5 mét. Vệ tinh mang 5 dải phổ thích hợp phân biệt sinh trưởng của cây trồng và rừng, với mục tiêu quét toàn bộ bán đảo Triều Tiên 3 ngày một lần.

Tuy nhiên, vệ tinh này còn trong quá trình kiểm chứng hiệu năng và hiệu chỉnh ảnh, nên dịch vụ để nông hộ thực sự nhận thông tin từ vệ tinh sẽ bắt đầu vào năm sau. Giữa việc phóng vệ tinh và đọc chính xác ảnh ấy có một độ trễ như vậy.

Máy bay không người lái gần với kính lúp phóng to một góc bản đồ vệ tinh. Vì bay dưới mây nên ít bị che mây của ảnh vệ tinh hơn, nhưng mưa, sương mù, gió giật và tầm nhìn thấp cản trở cả bay lẫn chất lượng ảnh. Nó có thể chụp dày đến mức một pixel chỉ vài milimét đến vài xentimét, đổi lại diện tích xem được trong một lần không rộng. Cần pin, nhân lực điều khiển và phê duyệt bay.

Ảnh do máy bay không người lái chụp về ban đầu không phải một tấm bản đồ. Mỗi chuyến bay tích hàng trăm ảnh rời, được chụp chồng phần mép lên nhau. Kỹ thuật ảnh trắc Structure from Motion (SfM) dùng phần chồng này làm manh mối, ghép hàng trăm mảnh thành một và thêm thông tin độ cao để tạo bản đồ 3 chiều của cả ruộng. Nhưng trước đó phải qua một bước. Tại nơi chụp phải đặt tám hiệu chỉnh có phản xạ suất đã biết và đo cùng lúc cường độ ánh sáng chiếu từ trời. Không có giá trị chuẩn này, ảnh chụp ngày mây và ngày nắng được đọc bằng thước khác nhau, khiến lúa hôm qua và hôm nay thực ra như nhau vẫn trông khác.

Trong mùa mưa, vệ tinh quang học có thể bị mây che nhiều tuần. Lúc này, vệ tinh radar (SAR) đọc nước trong ruộng và cấu trúc cây bằng tín hiệu vi ba phát ra rồi trở về. Nó có ưu điểm quan sát được cả ban đêm. Một nghiên cứu khu vực phân loại vùng trồng lúa bằng cách chồng ảnh radar và quang học đã báo cáo độ chính

xác khoảng 95 phần trăm. Con số này không phải hiệu năng cố định cho mọi nước và mọi mùa. Khi thời điểm cấy, giống, địa hình và dữ liệu học thay đổi, kết quả phân loại cũng thay đổi.

Ảnh thu thập như vậy dẫn tới công việc đồng áng thực tế. Sau bão, nếu chạy mô hình học sâu trên ảnh drone, bản đồ khu lúa đổ ngã đến mức nào được vẽ nhanh và chi tiết hơn nhiều so với người đi đếm. Bản đồ này cũng được dùng ngay làm dữ liệu giám định thiệt hại để quyết định tiền bảo hiểm. Khi bệnh than hạt lúa hoặc đạo ôn lan rộng, ảnh drone siêu cận cảnh và chỉ số rìa đổ được đọc cùng nhau để tách khu bệnh khỏi khu thiếu nitơ. Thông tin ấy đổi thành bản đồ chỉ dẫn bón thêm phân và thuốc chỉ ở những khu đó, rồi đến tay nông dân.

Bệnh thay đổi đặc tính phản xạ của mô trước khi lộ ra bên ngoài. Trong nghiên cứu bệnh cháy bông lúa mì, thiết bị siêu phổ gắn trên máy kéo đã lập bản đồ tín hiệu nhiễm bệnh trong ruộng. Một nghiên cứu Remote Sensing năm 2021 về bệnh than hạt lúa đã trích xuất khu phát sinh bằng dữ liệu siêu phổ từ UAV. Một nghiên cứu riêng năm 2026 dùng YOLOv12n cải tiến để phát hiện bông bệnh, báo cáo độ chính xác trung bình 80.7 phần trăm. Một nghiên cứu vẽ khu bệnh bằng bước sóng, nghiên cứu kia tìm bông trong ảnh.

Ở ruộng lúa mì, drone đọc diện tích lá và áp lực nước để dự báo năng suất. Hệ số xác định của một nghiên cứu dao động rộng từ khoảng 0.75 đến 0.99 tùy giống và giai đoạn sinh trưởng. Thành tích vào ngày chụp lá non khác ngày chụp sau khi bông đã đứng. Mô hình đếm cá thể ngô và mô hình làm cỏ có mục tiêu cũng qua các thử nghiệm khác nhau. Đếm cá thể, dự báo năng suất và tiết kiệm thuốc cỏ phải được đo theo các tiêu chuẩn khác nhau.

Cách nâng độ chính xác hơn nữa là không khẳng định dùng một cảm biến. Trong nghiên cứu đưa đồng thời camera trên drone, cảm biến nhiệt và giá trị độ ẩm đất vào mô hình dự báo năng suất lúa mì, sai số dự báo giảm rõ rệt so với chỉ dùng một cảm biến. Dùng vệ tinh và drone cùng nhau cũng vậy. Có nghiên cứu đưa giá trị quét rộng của vệ tinh và giá trị chụp dày của drone vào một mô hình học máy để phán định tình trạng cây. Thiết bị này lấp phần thiết bị kia bỏ sót.

Cách đọc nitơ cũng đang thay đổi. Chỉ số thực vật xem độ xanh của lá để suy ra gián tiếp trạng thái nitơ. Cảm biến siêu phổ dùng các dải phản xạ hẹp hơn nhưng không phải thiết bị đếm trực tiếp phân tử nitơ. Nó ước lượng giá trị qua mô hình hiệu chuẩn ghép nồng độ nitơ đo trong phòng thí nghiệm với phổ phản xạ, và còn chịu ảnh hưởng của diệp lục, nước và cấu trúc lá. Dù giá phân tăng làm mối quan

tâm lớn hơn, bản đồ nitơ trên màn hình vẫn là giá trị dự báo đã qua hiệu chuẩn và kiểm chứng hiện trường.

Chồng khu thiếu nitơ do drone vẽ với dữ liệu đất lưu trong hệ thống thông tin địa lý sẽ tạo bản đồ chỉ dẫn bón phân theo khu. Bài Agriculture năm 2025 đề xuất và thử nghiệm hệ thống bón phân biến đổi liều lượng kết hợp UAV và GIS. Việc nghiên cứu lập bản đồ chỉ dẫn khác với việc mở đóng đầu phun của xe chở phân thương mại theo thời gian thực. Muốn mô tả việc rải thực tế cần thử nghiệm đồng ruộng có máy rải, sai số vị trí, phản ứng van và ô đối chứng.

Cây trồng đi theo trình tự đã định từ gieo đến thu hoạch. Nó không bỏ qua các giai đoạn rời ruộng mạ, đẻ nhánh, trổ bông và làm đầy hạt. Nếu xếp nối chỉ số thực vật do vệ tinh chụp cách vài ngày, ta có dao động gập ghềnh; tại đây cần tách giá trị vọt do mây che khỏi thay đổi sinh trưởng thật. Chạy tính toán làm mượt trước rồi đưa vào mô hình học sâu nhớ chuỗi thời gian, có thể đọc trước lúa hiện đi qua giai đoạn nào và hạt sau này sẽ chắc đến đâu. Ngoài ra, có cách đưa giá trị vệ tinh đo được vào các mô hình sinh trưởng dựa trên vật lý đã dùng lâu như APSIM hoặc DSSAT mỗi lần để cập nhật dự báo.

Như dự báo thời tiết nhận quan trắc mỗi rạng sáng rồi sửa dự báo hôm nay, mô hình sinh trưởng cây cũng sửa dần triển vọng năng suất mỗi khi nhận giá trị mới do vệ tinh gửi.

Nhưng không phải lúc nào cũng đọc đúng. Vào ngày mây thấp, vệ tinh quang học có thể đọc nhầm vùng bóng râm là cây héo. Nếu ruộng và đường nông nghiệp cùng nằm trong một pixel, máy tính không biết nên gọi ô đó là ruộng hay đường. Cỏ dại vừa nhú và ngô vừa nhú có màu sắc, hình dạng gần như nhau, nên cũng có báo cáo mô hình đếm nhầm cỏ là ngô hoặc ngược lại. Đưa nguyên mô hình được huấn luyện ở ruộng một vùng sang vùng có màu đất và nắng khác thì độ chính xác tụt mạnh cũng thường thấy. Ở nơi mây và bóng râm thường xuyên như vùng nhiệt đới hoặc mùa mưa, lỗi cùng cây bị tách thành cây khác, cây khác bị gộp làm một tăng rõ rệt.

Tốc độ công nghệ này bén rễ ở ruộng khác nhau theo từng nước. Trong khảo sát năm 2026 với nữ nông dân nhỏ lẻ Kenya, ngay trong số những người trả lời biết công cụ canh tác dựa trên trí tuệ nhân tạo, người thực sự dùng thử ít hơn rất nhiều. Giá dữ liệu điện thoại thông minh, gánh nặng đọc chữ và thao tác màn hình, cùng hoàn cảnh không có tiền để làm theo dù nhận được khuyến bảo, chồng lên

nhau. Dù nhận bản đồ tinh vi đến đâu, nếu không có tiền và người cho công việc tiếp theo, bản đồ vẫn nằm trên màn hình.

Giá cũng là trở ngại. Để trang bị đúng mức một drone công nghiệp gắn camera siêu phổ, cần tiền vượt xa giá một máy kéo nhỏ thông thường. Hơn nữa cần riêng người xin phê duyệt bay và xử lý ảnh. Mỗi lần cho drone bay, ảnh từ vài gigabyte đến vài chục gigabyte trút xuống; với nông hộ nhỏ, ngay cả việc có thiết bị tính toán nhỏ để lọc chúng tại hiện trường cũng quá sức. Vì thế, thay vì tự mua drone, mô hình dịch vụ drone giao việc chụp và phân tích cho hợp tác xã canh tác hoặc doanh nghiệp dịch vụ đang lan rộng ở nhiều nơi.

Cũng có thử nghiệm kỹ thuật nhằm giảm gánh nặng. Một nghiên cứu công bố trên tạp chí Agriculture năm 2023 đã đặt trực tiếp lên drone mô hình phát hiện sâu hại được giảm mạnh kích thước bằng cách kết hợp cấu trúc Transformer và kỹ thuật siêu phân giải. Thay vì gửi hết ảnh lên máy chủ đám mây rồi chờ câu trả lời, drone hoặc máy tính nhỏ tại hiện trường ra phán đoán ngay tại chỗ. Mô hình như vậy càng hữu ích ở đất nông nghiệp miền núi dễ mất liên lạc hoặc vùng Internet chậm. Về sau, khi vệ tinh chỉ trước khu có dấu hiệu bất thường, drone sẽ bay đến đó chụp chi tiết và gom cả số cảm biến cắm trên đất, tạo nên hệ thống quan trắc ba lớp.

Trở lại bờ ruộng ấy. Drone hạ cánh, một vệt đỏ trên màn hình vẫn còn. Màn hình không trả lời đó là do bệnh, bóng râm hay chỉ là chỗ đọng nước. Người đưa ra câu trả lời cuối cùng là người đi ủng vào ruộng và tự tay chạm một chiếc lá.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Integrated AI and Remote Sensing Framework for Sustainable Agriculture and Environmental Monitoring. (2026).
<https://doi.org/10.64137/3108088x/ijaes-v2i2p101>
2. Development of a UAV-based crop disease detection system using deep learning algorithms to enhance precision agriculture. (2026).
<https://doi.org/10.2478/ijssis-2026-0031>
3. Systematic Literature Review: Machine Learning and Deep Learning Approaches for Crop Yield Prediction Using Remote Sensing Data. (2026).
<https://doi.org/10.37595/mediainfo.v25i2.496>
4. CMAViT: Integrating Climate, Management, and Remote Sensing Data for Crop Yield Prediction With Multimodal Vision Transformers. (2026). IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.
<https://doi.org/10.1109/jstars.2026.3669511>

5. Trimble Geospatial. (2026). eCognition Webinar: Deep Learning, UAVs and Precision Agriculture [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=alrseDYV8Lo>
6. Solvi. (2026). Webinar: From Sensors to Science: A Research Grade Drone Imaging Workflow for Agricultural Research [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=xTXOXkABmHU>
7. Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn. (2026). Kỷ nguyên vệ tinh nông lâm nghiệp đầu tiên của Hàn Quốc mở ra, xây dựng hệ thống quan sát bán đảo Triều Tiên chu kỳ 3 ngày. Thông cáo báo chí của Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn.
<https://www.mafra.go.kr/bbs/home/792/578337/artclView.do>
8. Deep Learning Applications for Crop Mapping Using Multi-Temporal Sentinel-2 Data and Red-Edge Vegetation Indices: Integrating Convolutional and Recurrent Neural Networks. (2025). Remote Sensing, 17(18), 3207.
<https://doi.org/10.3390/rs17183207>
9. Yield Prediction of Winter Wheat (*Triticum aestivum*) Varieties Using UAV-Derived Multispectral Vegetation Indices Across Growth Stages. (2026). Agronomy, 16(9), 939.
<https://doi.org/10.3390/agronomy16090939>
10. AgTechNavigator. (2026). Fertiliser shock fuels interest in hyperspectral satellites for precision nitrogen use.
<https://www.agtechnavigator.com/Article/2026/04/07/fertiliser-shock-fuels-interest-in-hyperspectral-satellites-for-precision-nitrogen-use/>
11. Artificial intelligence (AI) adoption and its perceptions among smallholder women farmers in Kenya. (2026).
<https://doi.org/10.1007/s44279-026-00626-z>

2.2

Thị giác máy tính và phân tích kiểu hình sinh trưởng (Phenomics)

Giữa ruộng, một người ngồi xổm, cầm thước dây và sổ ướm, chọn một khóm lúa rồi đo chiều cao từ gốc đến đầu bông. Sang khóm bên cạnh, người ấy đếm bằng ngón tay số nhánh đẻ, tức số thân tách ra từ một khóm. Dù làm suốt ngày, một người nhiều lắm chỉ đo được vài chục khóm lúa. Những số đã ghi được chuyển vào bảng vào buổi tối, sáng hôm sau lại bắt đầu từ đầu.

Chiều cao, hình lá, màu sắc và số bông mà cây biểu lộ ra ngoài được gọi là kiểu hình. Kiểu hình là kết quả do gen ghi trong hạt, đất nơi hạt lớn lên, thời tiết và phân bón cùng tạo nên. Đó là lý do hai hạt từ cùng một gói, đem trồng riêng ở ruộng nhiều nước và ruộng ít nước, đến thu hai khóm cao khác nhau. Một cây lúa nổi bật vì phát triển tốt chưa chắc có hạt giống tốt. Có thể chỉ vì ruộng ấy nhiều phân hoặc nhận nước tốt. Vì vậy, để thực sự chọn gen tốt, phải trồng cùng hạt ở nhiều ruộng, loại bỏ khác biệt do môi trường tạo ra rồi tìm phần khác biệt còn lại.

Điều nhà chọn giống muốn biết là tách độc phần khác biệt do gen tạo ra với phần môi trường phủ lên ruộng. Trước đây con mắt tìm khác biệt ấy là kinh nghiệm và cảm nhận của người, nay camera và tính toán đảm nhận vai trò đó.

Thị giác máy tính thay người làm công việc mà tay và mắt không kham nổi. Camera và trí tuệ nhân tạo đi cùng nhau chụp cây, rồi tự đọc chiều cao, số lá và màu từ ảnh. Cách này gọi là phân tích kiểu hình thông lượng cao (HTP). Thiết bị TraitDiscover giới thiệu năm 2025 cho thấy rõ tổ hợp camera: camera thường chụp màu mắt thấy, camera siêu phổ chụp tách hàng trăm bước sóng mắt không thấy, camera nhiệt đo nhiệt độ mặt lá và máy quét 3 chiều đo độ sâu bằng laser cùng gắn trên một tay. Còn có cảm biến bắt tín hiệu huỳnh quang cho biết lá thực sự quang hợp bao nhiêu.

Cánh tay ấy đặt trên bộ truyền động ba trục di chuyển theo milimét, nên chụp lại chính xác cùng vị trí của lá chụp hôm qua và lá ấy hôm nay. Có thiết bị bật chiếu sáng riêng sau khi mặt trời lặn để chụp cả ban đêm, nhằm tránh nhiễu bóng do góc mặt trời thay đổi.

Những giá trị tính trước có thể lấy chỉ từ ảnh phẳng. Đếm pixel xanh che pixel màu đất bao nhiêu trong ảnh nhìn từ trên cho ra độ phủ; nhân tỷ lệ đó với mức lá chồng lên nhau cho ra chỉ số diện tích lá, biểu thị một đơn vị đất có diện tích lá phủ bao nhiêu. Chỉ số càng cao, lúa càng nhận rộng ánh nắng để quang hợp nhiều. Trước đây, để lấy chỉ một giá trị này, người ta phải tách từng lá, đặt lên máy quét và đo diện tích; cây lúa đã đo xong không thể lớn lại. Đo bằng ảnh có thể lấy lại cùng giá trị vào ngày sau mà không bẻ lúa. Tuy nhiên, ảnh phẳng chỉ đếm lá nhìn thấy từ trên, không đếm lá giấu chồng bên dưới.

Vì thế đám mây điểm 3 chiều xuất hiện ở bước tiếp theo.

Camera và lidar biến bề mặt lá, thân và bông thành điểm để tạo đám mây điểm 3 chiều. Trường bức xạ thần kinh nối nhiều ảnh và Gaussian splatting cũng được dùng để phục dựng cấu trúc lập thể của cây. Một bản in trước công bố năm 2026 báo cáo đã giảm thời gian tái tạo trung bình từ 6.52 phút xuống 1.58 giây ở 26 chuỗi ảnh cây. Cần giữ lại rằng đây là kết quả thử nghiệm giới hạn của nghiên cứu công bố trước, không phải chuẩn hiện trường đã qua phản biện.

Trong các xe đi quanh ruộng có thiết bị tìm hàng cây bằng camera và chạy theo đường ấy. Xe bốn bánh đã nêu cho sai số ngang trung bình từ 6.2 xentimét đến 12.5 xentimét trên đoạn 30 mét ruộng ngô. Thử nghiệm này đo hiệu năng bằm hàng cây, không phải thử nghiệm tách lúa và cỏ bằng pixel rồi nhổ bằng lưỡi dao. Nghiên cứu đưa mắt và tay vào một robot vẫn tiếp tục, nhưng chỉ độ chính xác chạy xe không thể thay cho hiệu năng làm cỏ và diện tích làm việc mỗi ngày.

Mạng thần kinh phân chia trong đám mây điểm đâu là thân và đâu bắt đầu là lá. Trong nghiên cứu ngô trên Agriculture năm 2025, độ chính xác phân đoạn là 92.6 phần trăm ở dữ liệu học và 86.1 phần trăm ở dữ liệu thử. Bẫy đặc tính tính từ đám mây điểm đã tách có tương quan cao với giá trị do người đo. Nhưng độ chính xác không cho biết xử lý bao nhiêu khóm mỗi ngày. Để thành thiết bị hiện trường đo hàng nghìn khóm, phải đo lại cả thời gian chụp, truyền và tái tạo đám mây điểm.

Nếu camera chụp cùng ruộng mỗi ngày ở cùng vị trí, sẽ tạo hồ sơ nối theo ngày chứ không chỉ một ảnh. Mạng thần kinh nhân tạo phân biệt chỉ bằng thay đổi màu và hình trong ảnh giai đoạn mạ sau cấy bén rễ, giai đoạn thân tách làm khóm xòe ra, giai đoạn trổ và giai đoạn hạt chín. Một hệ thống thử thực tế ở ruộng gần camera tự đổi hướng cùng cảm biến nhiệt đã theo dòng này, mỗi ngày rút ra số cho biết nồng độ diệp lục bằng phân tích màu lá và chỉ số cho biết trạng thái nitơ.

Từ lâu đã biết rằng bón thúc trong vài ngày ngay trước trổ, khi lúa hút sức phân lân cuối, giúp hạt chín chắc.

Nhưng xác định chính xác vài ngày ấy vẫn luôn chỉ là ước lượng bằng mắt. Khi ảnh được tích mỗi ngày, ước lượng ấy đổi thành ngày. Tương tự, nếu báo trước ngày hạt chín hoàn toàn, cũng có thể ấn định trước ngày gặt máy gặt liên hợp.

Không chỉ lúa và ngô gặp các camera này. Gắn camera siêu phổ và mạng thần kinh vào ảnh bông lúa mì có thể tính tỷ lệ hạt bị bệnh cháy bông trong cả bông mà không cần người bóc từng bông. Khoai tây ở dưới đất nên camera không thấy trực tiếp củ, nhưng nếu đo thể tích lá và thân lộ trên mặt đất bằng ảnh, rồi theo dõi tốc độ thể tích lớn lên, có thể ước trước củ dưới đất đang lớn đến đâu.

Tuy nhiên, giá để có camera, robot và thiết bị đường ray này không nhẹ. Đặt thiết bị chụp đường ray trong một nhà kính tốn hàng chục triệu won, thêm máy quét 3 chiều và camera siêu phổ thì giá lại tăng. Ảnh và đám mây điểm thu như vậy cũng nhanh chóng lấp đầy chỗ lưu trữ, nên phải có cả máy chủ và người lưu trữ, tính toán chúng. Viện nghiên cứu lớn hoặc công ty chọn giống chịu được giá này, nhưng nông hộ cá nhân canh tác vài majigi ruộng khó nghĩ tới. Có nơi nhà nước bù chi phí bằng kinh phí nghiên cứu để đưa thiết bị vào trạm thử, nhưng nơi không có hỗ trợ ấy, chỉ công ty giống có vốn mới đến gần công nghệ trước.

Vì thế người đứng dưới camera này hiện nay chủ yếu là các trạm thử chọn giống mới; chỉ sau khi kết quả thành hạt giống và phương pháp trồng trọt, nó mới tới nông hộ thông thường.

Nói rằng đọc cùng lúc dấu vết gen và môi trường trong một ảnh có nghĩa như vậy. Lá xanh đậm hay nhạt, màu giữa gân lá đều hay loang, là dấu do màu vốn có của giống và những điều lá trải qua vài ngày qua chồng lên nhau tạo thành.

TraitDiscover đã thử cách đọc mẫu này trên đậu tương, ngô và lúa. Theo bài báo năm 2026 chứa kết quả, thiết bị phát hiện áp lực hạn hán 4 ngày trước khi triệu chứng nhìn thấy xuất hiện, và chỉ ra tổn hại thuốc cỏ sớm hơn 24 giờ so với người kiểm tra và ghi tay. Mắt người chỉ nhận ra bất thường khi lá rũ hoặc phai màu, còn camera bắt thay đổi rất nhỏ của ánh phản xạ đối trước đó.

Cùng thiết bị còn chỉ dùng ảnh mà so sánh được giống trồng trong các vùng khí hậu khác nhau thích nghi với môi trường địa phương đến đâu. Chỉ chụp ảnh trên 10,000 dòng chọn giống trồng cạnh nhau cũng có thể chọn dòng chịu hạn và dòng

yếu bệnh mà không qua tay người. Ngày trước, việc chọn lọc này phải hoàn tất qua nhiều năm, tự tay cắt nước, đưa bệnh vào và quan sát bằng mắt.

Nhưng camera không phải lúc nào cũng nhìn đúng. Gió làm lá rung, và lá rung được bắt ở vị trí khác giữa ảnh vừa chụp và ảnh sau. Cách tính chồng ảnh nhiều góc để dựng hình 3 chiều tiền đề rằng cây đứng yên, nhưng gió phá tiền đề ấy. Nhà kính trong nhà còn đỡ hơn vì đóng cửa thì không gió và ánh sáng ổn định. Vấn đề xảy ra ở ruộng lúa và ruộng màu nơi gió vẫn thổi. Mỗi khi mây che mặt trời rồi đi qua, vị trí bóng râm đổi cũng tương tự. Nếu chiếc lá vừa sáng đột ngột vào bóng, chương trình tách lá và đất bằng màu có thể đọc nhầm bóng thành vết bệnh giữa gân lá.

Người quan sát thành thạo phân được bóng và vết bệnh trong nháy mắt, nhưng máy chỉ nhìn số màu và độ sáng nên thường đoán sai.

Ở ruộng lá rậm, lá trên che lá dưới cũng thường xảy ra. Camera hoàn toàn không chụp được mép lá bị che ấy, nên tính diện tích lá nhỏ hơn thật. Một thí nghiệm tính thẳng đám mây điểm của lá bị che cho sai số diện tích trung bình 15.88 xentimét vuông, tỷ lệ lệch giá trị thực đạt 22.11 phần trăm. Qua bước hiệu chỉnh dùng học sâu suy đoán rồi điền dạng bề mặt lá bị che, sai số giảm xuống 6.79 xentimét vuông và tỷ lệ lệch còn 8.82 phần trăm. Dù vậy, nó không biến mất hoàn toàn. Dem nguyên mô hình học dưới ánh sáng ổn định trong nhà kính sang đồng ruộng nơi ngày mây và ngày nắng đổi nhiều lần trong ngày thì độ chính xác tụt mạnh cũng thường xảy ra.

Có vấn đề khác với lúc mô hình sai. Mạng thần kinh học sâu có thể phán một ảnh lá là bệnh nhưng không tự giải thích tại sao. Trong tính toán chỉ có hàng triệu con số trộn lẫn, không có logic mà người có thể lần theo từng dòng. Để giải vấn đề này, nhà nghiên cứu dùng cách chồng bản đồ vết đỏ cho biết mô hình lấy khu nào của ảnh làm căn cứ. Nếu vết trùm đúng vết bệnh thật thì mô hình đáng tin, nhưng nếu vết hiện trên nền không liên quan thì phán đoán chỉ đúng tình cờ. Vì vậy, các nhà chọn giống vẫn không chép nguyên số camera đưa ra mà tự lật lá khi gặp kết quả đáng ngờ.

Không công ty chọn giống nào quyết định hợp đồng giống mới đã mất nhiều năm chỉ dựa vào số không có giải thích.

Trở lại ruộng ban đầu. Bàn tay từng ngời xồm cảm thước giờ cảm máy tính bảng. Trên màn hình, số chồng lên ảnh vừa gửi từ camera đường ray, bên cạnh là đồ thị

nhỏ đặt cạnh nhau giá trị đo hôm qua và hôm kia. Nhưng ở một ô, chỉ số chiều cao bỗng tụt và hiện đỏ. Đó là khoảnh khắc gió thổi làm một lá che lá khác trong ảnh. Tin số trên màn hình hay đi ủng tới khóm đó để nhìn lại bằng mắt, vẫn do con người quyết định.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Advancing computer vision frontiers for sustainable precision agriculture. (2025). Asian-Australasian Journal of Bioscience and Biotechnology, 10(3).
<https://doi.org/10.3329/aajbb.v10i3.83439>
2. Chen, H., Liu, S., Wang, C., Wang, C., Gong, K., Li, Y., & Lan, Y. (2023). Point cloud completion of plant leaves under occlusion conditions based on deep learning. Plant Phenomics, 5, 0117.
<https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0117>
3. Development and field evaluation of an autonomous four-wheel-drive agricultural vehicle tracking crop rows using computer vision technology. (2026).
<https://doi.org/10.56430/japro.1826810>
4. Gupta, S. K., & Agarwal, R. (2025). Comparative analysis of unmanned aerial vehicle and ground-level data using computer vision in agriculture. Cureus Journal of Computer Science, 2, es44389.
<https://doi.org/10.7759/s44389-025-10304-8>
5. Jia, H., Zhou, W., Zhou, W., Li, Y., Lu, H., & Wu, T. (2026). The turning point of 3D plant phenotyping: 3D foundation models enable minute-to-second cross-crop reconstruction and beyond. arXiv.
<https://arxiv.org/abs/2607.01753>
6. Pasupuleti, M. K. (2026). Vision transformers for crop intelligence and sustainable precision agriculture. International Journal of Academic and Industrial Research Innovations (IAIRI) Research Book Series.
<https://doi.org/10.62311/nesx/rb-978-81-685658-6-9>
7. Selvaraj, M. (2025). AI-powered phenomics: Transforming crop science for climate-resilient future [Video]. IPPN (International Plant Phenotyping Network).
<https://www.youtube.com/watch?v=eoTvCz3YTzo>
8. Xu, L., Zhang, J., Li, S., Zhu, G., Zhao, H., Yang, J., Li, W., Nie, H., An, W., Yang, B., Hu, W., & Han, Z. (2025). TraitDiscover: An automated high-throughput platform for multimodal plant phenotyping with real-time trait analysis. Smart Agricultural Technology.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525009220>
9. Zhao, Y., Liu, D., Wang, Z., Yao, J., Yu, J., Wang, Z., & Jia, Z. (2025). Automated phenotyping of maize from 3D point clouds using an optimized deep learning approach. Agriculture, 15(23), 2430.
<https://doi.org/10.3390/agriculture15232430>
10. Zong, Z., Feng, B., Wang, S., Zhang, C., Li, C., & Xu, Y. (2025). Review of Research on Recognition and Monitoring of Plant Growth Phenotype Based on Deep Learning. INMATEH Agricultural Engineering, 81-99.
<https://doi.org/10.35633/inmateh-77-07>

2.3

Chẩn đoán sớm sâu bệnh và cỏ dại dựa trên học sâu

Một người đứng trên bờ ruộng tháng 7 cúi xuống lật một lá lúa bằng đầu ngón tay. Vết vàng lan theo mép lá. Không thể biết bằng mắt là thiếu nước, vết côn trùng ăn hay nấm xâm nhập. Khi giơ điện thoại trong tay để chụp lá, tên bệnh và cách xử lý hiện trên màn hình.

Bệnh, côn trùng và cỏ dại gặm nhấm cây lương thực cướp đi 20 đến 40 phần trăm sản lượng cây trồng toàn cầu mỗi năm. Đây là phạm vi do Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc đưa ra. Thiệt hại kinh tế do bệnh cây là 220 tỷ đô la một năm, thiệt hại do côn trùng xâm lấn vượt 70 tỷ đô la. Cùng tài liệu đó không có con số nói rằng nếu bỏ phòng trừ hóa học và sinh học thì thiệt hại tăng gấp đôi. Chỉ riêng quy mô tổn thất cũng đủ lý do cần tuần tra và chẩn đoán sớm.

Công nghệ ra đời để lấp khoảng trống này là học sâu (Deep Learning). Khi đưa vào một ảnh, mạng thần kinh nhân tạo nhiều lớp tự phân tích màu sắc, hoa văn và kết cấu gân lá rồi đưa tên bệnh. Nó không theo quy tắc do người đặt sẵn kiểu vàng vượt bao nhiêu phần trăm là bệnh. Cho máy xem hàng chục nghìn lá bệnh, nó tự tìm điều cần nhìn. Trong phòng thí nghiệm, nó phát hiện các bệnh lạ tên như đạo ôn lúa, cháy bông lúa mì và mốc sương khoai tây với độ chính xác trên 98 phần trăm. Chỉ nhìn số, nó còn giỏi hơn chuyên gia người.

Bên trong công nghệ này có nhiều mô hình làm việc khác nhau. Mô hình phân loại nhìn trọn một lá và đưa một tên bệnh dùng họ ResNet hoặc EfficientNet. Công việc đếm từng sâu hại rải trong một ảnh ruộng và chỉ vị trí do mô hình phát hiện họ YOLO đảm nhận. Công việc vẽ tỷ lệ chỗ bệnh chiếm trên mặt lá, hoặc ranh giới pixel giữa thân lúa và lá cỏ, do mô hình phân đoạn họ UNet đảm nhận. Cùng là học sâu nhưng mô hình dùng khác nhau khi câu hỏi khác nhau.

Vấn đề nằm ở phòng thí nghiệm ấy. Bộ dữ liệu PlantVillage dùng rộng rãi để dạy mô hình học sâu gồm hơn 54,000 ảnh chụp chính diện một lá đặt trên giấy trắng hoặc nền đồng nhất. Ánh sáng đều, không có bóng, phía sau lá không chổng cổ,

đất hay lá khác. Mô hình học như vậy được trên 99 phần trăm điểm ở ảnh thử chụp cùng cách. Nhưng ruộng lúa và ruộng màu không phải giấy trắng.

Bài báo *Frontiers in Plant Science* năm 2026 cho thấy khoảng rơi này bằng số. Mô hình ResNet50 học trên PlantVillage đúng 99.73 phần trăm ở ảnh thử cùng điều kiện. Nhưng khi áp nguyên mô hình ấy cho ảnh PlantDoc chụp ở ruộng thật, độ chính xác rơi xuống 32.05 phần trăm. 67.7 điểm phần trăm biến mất ngay tại chỗ. Mô hình vẫn giữ độ tự tin trung bình 79.76 phần trăm khi trả đáp án sai. Nó chần đoán sai một cách tự tin mà không cho tín hiệu rằng mình sai. Khi nhóm nghiên cứu dùng GradCAM vẽ nơi mô hình nhìn để phán đoán, ánh nhìn hướng vào giữa vết bệnh trong ảnh PlantVillage đã tản sang đất, cỏ và bóng trong ảnh ruộng.

Độ đậm màu, độ rõ viền lá và diện tích lá chiếm trong ảnh khác nhau về mặt thống kê giữa hai dữ liệu.

Các nỗ lực lấp khoảng cách này cũng tiếp tục. Cùng bài báo đã thử kỹ thuật hiệu chỉnh hạ độ tự tin, nhưng rủi ro chần đoán sai vẫn cao; học đối kháng cổ ép hai miền khớp nhau còn làm độ chính xác rơi từ mức 32 phần trăm xuống mức 25 phần trăm. Dù dùng mô hình mới như DINOv2 đã học trước trên ảnh không nhãn, độ chính xác chỉ đạt 43.2 phần trăm. Nhóm nghiên cứu kết luận hiệu chỉnh chuẩn và kỹ thuật thích nghi nhẹ có thể thu hẹp khoảng cách nhưng không xóa được nó. Nó giống học sinh chỉ học ảnh trên giấy trắng rồi bối rối trong phòng thi thật. Đây là lý do không được tin một số mang tên độ chính xác phòng thí nghiệm rồi đưa mô hình ra ruộng.

Bệnh hiếm có ít ảnh cũng là trở ngại. Có bệnh chỉ xuất hiện ở một vùng, một mùa nên khó gom hàng nghìn ảnh. Vì vậy nhà nghiên cứu vượt qua cách đơn giản là xoay, lật và đổi độ sáng ảnh, dùng mạng đối nghịch sinh (GAN) và mô hình khuếch tán tạo ảnh vết bệnh giả giống thật để trộn vào dữ liệu học. Cách này nâng khả năng nhận dạng bệnh có ít dữ liệu, nhưng khi kết cấu ảnh giả khác tinh tế với vết bệnh thật, nó cũng có thể làm mô hình rối hơn.

Cỏ dại giống cây non về màu và hình nên khó phân biệt. Nghiên cứu kết hợp camera siêu phổ với học sâu để tách cỏ barnyardgrass ở giai đoạn ruộng mạ vẫn tiếp tục; nghiên cứu RetinaNet cải tiến phát hiện lúa và 8 loài cỏ ruộng báo cáo độ chính xác trung bình 94.1 phần trăm và 24.3 khung hình mỗi giây. Thành tích này là kết quả phát hiện trên thiết bị hiệu năng cao. Mô hình nhẹ đặt trên Raspberry Pi phải đo lại tốc độ và độ chính xác mới dùng được ở bờ ruộng.

Một nghiên cứu dùng SegNet chia màn hình thành ba loại: lúa, nền và cỏ. Cỏ chính là *Sagittaria trifolia*, thuộc nhóm cỏ mũi tên; độ chính xác pixel trung bình là 92.7 phần trăm, tỷ lệ giao trên hợp có trọng số tần suất là 84.4 phần trăm. Số đầu đo tỷ lệ pixel đúng trên màn hình, số sau đo mức vùng dự báo chồng vùng thật. Dù cùng xem một màn hình, hai chỉ số trả lời hai câu hỏi khác.

Vấn đề tách lá héo vì hạn với lá bệnh cũng tương tự. Lá vàng vì thiếu nước và lá vàng vì nấm ăn có gần như cùng màu trước camera. Khi đó không phán bằng ảnh một mình. Đặt cạnh nhau số đo cảm biến ẩm đất và nhiệt độ gửi về; nếu đất đủ nước mà lá vẫn vàng, kết luận bệnh được củng cố. Phải chồng ảnh với giá trị cảm biến mới giảm chẩn đoán sai. Thêm vào đó, nếu công nghệ giải thích như GradCAM hiện đồ trên màn hình dấu nào của lá khiến mô hình phán bệnh, nông dân từng không yên tâm vì không rõ căn cứ cũng có thể tự nhìn kiểm tra phán đoán.

Có lúc một ảnh GradCAM cũng chưa đủ. Nếu để riêng học sâu phán đoán quan hệ nhân quả giữa tên sâu bệnh, điều kiện thời tiết và trạng thái đất, đôi khi nó cho đáp án có vẻ đúng nhưng sai, tức ảo giác. Khi ấy sử dụng cùng đồ thị tri thức đã sắp xếp sẵn sinh lý và điều kiện phát bệnh của sâu bệnh. Khi mô hình thị giác tìm vết bệnh, đồ thị tri thức so nhiệt độ, độ ẩm và mưa gần đây thời điểm ấy để xem có đúng điều kiện bệnh đó phát sinh hay không. Nếu hai phán đoán khác nhau, hệ thống yêu cầu kiểm tra lại thay vì xác nhận.

Hệ thống Quản lý Bệnh hại Cây trồng Quốc gia của Hàn Quốc vận hành chẩn đoán hình ảnh phân biệt tên bệnh dựa trên ảnh lá bệnh do nông dân tải lên. Theo công bố năm 2024 của Cục Phát triển Nông thôn, độ chính xác trung bình trên 95 phần trăm và độ chính xác nhận biết của người là 95.3 phần trăm. Khi đó đối tượng chẩn đoán là 31 cây trồng và 182 sâu bệnh. Dự báo tích hợp cùng đọc thời tiết và môi trường canh tác vẫn ở giai đoạn tiếp tục phát triển. Giữa chẩn đoán một ảnh và dự báo theo cả mùa vẫn còn khoảng cách.

Nơi cần gấp hệ thống này không chỉ là trang trại lớn. Nông nghiệp lúa gạo châu Á lấy các nông hộ nhỏ ghép nhiều ruộng chỉ bằng lòng bàn tay làm trung tâm. Hộ càng không đủ khả năng gọi chuyên viên chẩn đoán sâu bệnh, một điện thoại trong tay càng là cửa tư vấn gần như duy nhất. Khi giá thiết bị giảm, ruộng nhỏ sẽ dùng công nghệ này trước.

Các số chẩn đoán bệnh cây đo những thứ khác nhau. accuracy đo tỷ lệ đúng toàn bộ, recall đo tỷ lệ không bỏ sót, F1 đo cân bằng giữa precision và recall, mAP đo

hiệu năng phát hiện ở nhiều ngưỡng phán định. Độ khó của ảnh lá phòng thí nghiệm, ảnh drone, ảnh bào tử kính hiển vi và ảnh hiện trường di động cũng khác. Trước khi đặt tỷ lệ phần trăm của mô hình lúa, ngô và khoai tây cạnh nhau, phải gộp bộ dữ liệu và chỉ số trước.

Thiết bị bẫy côn trùng thông minh trên bờ ruộng đang được phát triển theo hướng chụp côn trùng tự ở đèn và dùng trí tuệ nhân tạo đếm loài cùng số lượng. Cục Phát triển Nông thôn cho biết đang áp dụng thiết bị cho 3 loài thuộc nhóm bướm đêm và bọ xít. Không thể khái quát rằng mọi bẫy đèn đều phán thời gian thực bằng YOLO rồi gửi cảnh báo qua Telegram và ứng dụng nông hộ khi vượt ngưỡng thiệt hại kinh tế. Loài mục tiêu, giai đoạn phát triển và cách cảnh báo phải được xác nhận riêng cho từng thiết bị.

Nỗi băn khoăn sâu bệnh với thiết bị phun mục tiêu sẽ chỉ mở đầu phun ở nơi cần thuốc. Trong thử nghiệm 3 năm của Đại học Arkansas, See & Spray giảm lượng thuốc cỏ từ 43 phần trăm đến 59 phần trăm. Ở độ nhạy thấp, rủi ro quần thể Palmer amaranth tăng 280 phần trăm mỗi năm cũng xuất hiện. Thiết bị mẫu năm 2027 được thiết kế để nhận ra gần 4 lần số loài cỏ nhiều hơn thế hệ trước và cỏ non đường kính 1/4 inch. Cần nhìn cả việc cỏ bị bỏ sót để lại hạt vì đã phun ít thuốc hơn.

Tiết kiệm thuốc có thể giảm chi phí và gánh nặng môi trường. Bảo vệ được bao nhiêu thu hoạch tùy cây, bệnh, thời điểm nhiễm, thuốc và ô đối chứng. Dù tìm vết bệnh sớm, nếu thuốc không hiệu lực hoặc mưa rơi ngay sau phun, tổn thất không giảm. Giá thiết bị, pin và phí cập nhật phần mềm cũng phân chia lựa chọn của nông hộ. Đây là lý do cần thử nghiệm đồng ruộng theo từng cây thay vì một tỷ lệ tiết giảm phổ quát.

Muốn mô hình chính xác hơn cần ảnh từ nhiều ruộng hơn. Nhưng gom toàn bộ ảnh sâu bệnh của nông hộ riêng lẻ lên máy chủ ngoài làm phát sinh vấn đề riêng tư và an ninh. Vì vậy người ta thử học liên kết: để ảnh chỉ trong thiết bị của từng nông hộ, gửi lên máy chủ trung tâm chỉ giá trị kết quả đã học rồi gộp lại. Tuy nhiên, vấn đề độ chính xác dao động khi gộp kết quả vì giống canh tác và khí hậu khác nhau theo hộ vẫn đang được giải quyết.

Chẩn đoán càng nhanh, thu hoạch có thể giữ càng nhiều. Hồ sơ năm 2011 của một cơ quan nghiên cứu nông nghiệp Ấn Độ ước tính đã tránh được tổn thất 2 triệu đến 3 triệu tấn do gỉ sắt lúa mì nhờ phun propiconazole đúng lúc. Không nên đọc đây là chênh lệch thu hoạch thực tế giữa vùng phòng trừ và không phòng trừ.

Trong thử nghiệm virus xoắn lá cà chua, báo cáo tổn thất 98.43 phần trăm khi nhiễm 30 ngày sau cấy và 5.44 phần trăm khi nhiễm 75 ngày sau cấy, nhưng có giới hạn là thử nghiệm đồng ruộng không lặp lại. Có thể dùng như ví dụ cho thấy thời điểm, nhưng không che giấu thiết kế nghiên cứu.

Lúc hoàng hôn, người từng đứng ở bờ ruộng ban đầu lại nhìn dấu đỏ trên màn hình điện thoại. Vết bệnh chỉ nằm ở một góc ruộng, trên vài khóm. Thay vì bình phun đeo lưng, ông cầm bản đồ chỉ đánh dấu góc ấy và đi về phía đó. Phần còn lại của ruộng vẫn xanh.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Albayrak, A., Kuran, E. C., & Kayaalp, F. (2025). Deep learning approaches in precision agriculture: A comprehensive review of crop classification, disease detection, and weed detection techniques. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 13(4), 1318-1360.
<https://doi.org/10.36306/konjes.1583103>
2. Cục Phát triển Nông thôn. (2024). Kết quả chẩn đoán hình ảnh sâu bệnh cây trồng dựa trên trí tuệ nhân tạo.
https://rda.go.kr/board/boardfarminfo.do?CONTENT1=&dataNo=100000798541&mode=view&prgId=day_farmprmninfoEntry
3. Thakur, M., & Soni, B. (2026). Deep learning-based crop disease detection for precision agriculture: A survey. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 14(3), 77562.
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2026.77562>
4. Pasupuleti, M. K. (2026). Vision transformers for crop intelligence and sustainable precision agriculture. *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations Research Book Series*.
<https://doi.org/10.62311/nesx/rb-978-81-685658-6-9>
5. Nezami, M., & Kumar, R. (2026). Multimodal Edge Intelligence for Crop Disease Detection and Irrigation Advisory in Precision Agriculture. *International Journal of Science, Strategic Management and Technology*, 2(5), 1-9.
<https://doi.org/10.55041/ijssmt.v2i5.232>
6. Ma, X., Deng, X., Qi, L., Jiang, Y., Li, H., Wang, Y., & Xing, X. (2019). Fully convolutional network for rice seedling and weed image segmentation at the seedling stage in paddy fields. *PLOS ONE*, 14(4), e0215676.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215676>
7. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. (2025). Pest and disease detection system using machine learning for Myanmar rice crops.
<https://doi.org/10.56726/irjmets81664>
8. Asami, H., & Nakamura, T. (2026). Effects of an automatic weed suppression robot for paddy fields in a semi-mountainous area on weed suppression and the growth and yield of paddy rice. *Japanese Journal of Crop Science*, 95(1), 28-35.
<https://doi.org/10.1626/jcs.95.28>
9. Xiang, K., Shi, D., & Zhu, X. (2026). Quantifying the reliability gap in cross-domain plant disease classification: Benchmarking the limited efficacy of standard mitigation techniques under controlled-to-field shift. *Frontiers in Plant Science*, 17, Article 1826962.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1826962>
10. Lovett, J. (2025). Precision agriculture research measures effectiveness of See & Spray technology. University of Arkansas System Division of Agriculture, Arkansas Agricultural Experiment Station.
<https://aaes.uada.edu/news/see-and-spray-research/>

11. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Understanding the context. FAO Pest and Pesticide Management.

<https://www.fao.org/pest-and-pesticide-management/about/understanding-the-context/en/>

12. Korea IT Industry News. (2026). Consultations on pests and diseases of apples, cacti, and Hong Kong tree ferns continue in May 2026... immediate response possible through NCPMS AI diagnosis.

<https://www.koreaiin.com/news/903825>

Chương 3

Dự báo sinh trưởng và tối ưu hóa tài nguyên

3.1

Mô hình dự báo năng suất bằng học máy và học sâu

Cuối tháng 4, những cây mạ vừa được cấy từ ruộng mạ chỉ nhô lên khỏi mặt nước ruộng lúa chừng hai đốt ngón tay. Rễ còn chưa bám chắc, chưa hề thấy bóng dáng bông lúa. Nhưng cũng vào lúc ấy, trên màn hình trong văn phòng quản lý nông nghiệp của chính quyền tỉnh, một con số đã hiện lên: ruộng ấy sẽ cho bao nhiêu bao gạo vào mùa thu. Ruộng vẫn chưa phủ kín màu xanh.

Biết trước năng suất không phải là bói toán. Nếu biết một học sinh ngồi trước bàn học bao nhiêu giờ mỗi ngày và đã được bao nhiêu điểm trong kỳ thi trước, giáo viên có thể đoán được phạm vi gần đúng của điểm số kỳ thi tiếp theo. Ruộng lúa cũng không khác. Khi tập hợp lượng thu hoạch của ruộng đó trong vài năm qua, lượng mưa mùa xuân năm nay và lượng dinh dưỡng còn lại trong đất, đường nét của con số mùa thu đã hiện ra từ trước. Con người làm toàn bộ phép tính này bằng tay là việc quá sức. Từng biến số riêng lẻ đều dễ tính, nhưng khi đặt hàng trăm nghìn ruộng lúa và ruộng màu cùng lúc, đầu óc con người không thể kham nổi.

Vì vậy học máy (Machine Learning) và học sâu (Deep Learning) đảm nhận phép tính này.

Dữ liệu mà mô hình xem gồm thời tiết, đất, ảnh vệ tinh và hồ sơ thu hoạch trước đây. Tích ôn hữu hiệu (GDD), dùng để đo nhiệt tích lũy của cây trồng, thường được tính bằng cách lấy trung bình nhiệt độ tối cao và tối thấp trong ngày trừ đi nhiệt độ cơ sở của từng cây, coi giá trị âm là 0 rồi cộng dồn. Có đặt ngưỡng nhiệt độ trên hay không tùy thuộc vào mô hình. Phân tích độ ẩm và dinh dưỡng đất, cùng hồ sơ gieo trồng, tưới và bón phân, cũng được đưa vào. Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI) của vệ tinh gián tiếp cho thấy sắc xanh của lá và tình trạng sinh trưởng; vào ngày nhiều mây, dữ liệu radar có thể lấp chỗ trống của ảnh quang học.

Có học giả đã xếp hàng trăm bài báo lại rồi đếm xem loại dữ liệu nào được dùng nhiều đến đâu. Theo thống kê ấy, có 88 nghiên cứu dùng nhiệt độ, nhiều nhất, tiếp

theo là 79 nghiên cứu dùng lượng mưa. Loại đất, hồ sơ quản lý canh tác và dữ liệu vệ tinh đứng sau, còn hồ sơ phát sinh sâu bệnh và chỉ số dinh dưỡng trong đất được dùng tương đối ít. Nhét tất cả mọi thứ vào dữ liệu không có nghĩa là đáp án sẽ tốt hơn. Trái lại, khi các con số không cần thiết lẫn vào, mô hình có thể tìm ra quy luật ở nơi không nên tìm. Vì thế, các nhà nghiên cứu dồn công sức chọn ra những biến thực sự hữu ích trong hàng trăm biến ứng viên.

Có nhiều cách gom dữ liệu và đưa ra đáp án. Rừng ngẫu nhiên tập hợp câu trả lời của nhiều cây quyết định, còn LSTM ghi nhớ dòng thời gian của nhiệt độ, mưa và chỉ số thực vật. Các mô hình đa phương thức cùng đọc hồ sơ khí tượng, quản lý canh tác và ảnh vệ tinh cũng đã xuất hiện. R^2 0.8105 do nghiên cứu FARM năm 2026 báo cáo là giá trị đối với nhãn được nội suy năng suất cải dầu theo đơn vị hạt ở Canada thành lười 30 mét. Thử nghiệm đối chiếu với dữ liệu đo bằng máy gặt thực tế độc lập đạt khoảng R^2 0.768. Đó là đánh giá trên bản đồ, thấp hơn một bậc so với thành tích dự đoán năng suất đo trực tiếp tại thửa ruộng.

Cũng có cách kết hợp học máy với APSIM hoặc DSSAT, những hệ thống chuyển sinh lý cây trồng thành phương trình. Nếu bổ sung diện tích lá, độ ẩm đất và áp lực nitơ do mô hình canh tác tính vào dữ liệu học, có thể xem xét đồng thời quy luật sinh lý và dữ liệu quan sát. Một số nghiên cứu cho thấy mô hình kết hợp tốt hơn mô hình thống kê thuần túy, nhưng mức cải thiện khác nhau rất lớn tùy cây trồng, vùng, mô hình chuẩn và năm đánh giá. Chỉ riêng việc thêm quy luật vật lý không bảo đảm mức giảm sai số giống nhau trong mọi trường hợp.

Khi đọc hiệu năng dự báo, trước hết phải phân biệt chiều hướng của chỉ số. Hệ số xác định R^2 càng gần 1 thì càng giải thích tốt biến động của giá trị quan sát; bằng 0 thì ở mức gần với dự báo chỉ dùng giá trị trung bình. RMSE và MAE đo khoảng cách giữa dự báo và quan sát nên càng nhỏ càng tốt. Muốn so sánh điểm số của lúa gạo Trung Quốc, ngô Hoa Kỳ và lúa mì châu Âu, phải xem chúng có dùng cùng chỉ số và dữ liệu thử nghiệm độc lập hay không. Trước khi nhìn độ lớn của số, cần nhìn tiêu chuẩn đã dùng để đo nó.

Khó nhìn vào bên trong để biết mô hình đã tạo ra con số ấy như thế nào cũng là một trở ngại. Học sâu càng nuốt trọn khối dữ liệu đồ sộ thì bên trong càng khó thấy. Từ góc nhìn của nông dân, khó có thể tin nguyên xi một con số không biết căn cứ để lập kế hoạch bón phân năm đó. Công cụ xuất hiện để giải quyết vấn đề này là SHAP. Với từng giá trị dự báo, SHAP chia bằng số mức đóng góp của mỗi biến. Mức hạn hán giữa mùa hè kéo năng suất kỳ vọng xuống bao nhiêu, và thời

tiết quang đăng sau đó bù lại tổn thất bao nhiêu, đều được trải ra theo từng mục. Có lời giải thích như vậy, nông dân sẽ tin dự báo hơn.

Vấn đề xuất hiện khi ruộng gặp một mùa hè chưa từng trải qua. Mô hình học ở một vùng có thể có sai số lớn hơn tại vùng lân cận có đất, khí hậu, giống và cách canh tác khác. Các nhà nghiên cứu gọi đây là dịch chuyển miền. Vấn đề này bộc lộ rõ hơn trong điều kiện hiếm có trong dữ liệu học, chẳng hạn năm hạn hán chồng lên nắng nóng. Thay vì đưa ra một con số đại diện 95 phần trăm không có căn cứ cho một khu vực, tốt hơn là trình bày kết quả thử nghiệm độc lập ngoài vùng học.

Nơi trạm quan trắc thừa, thời tiết mà mô hình nhìn thấy cũng thừa. Mưa và nhiệt độ ở miền núi có thể khác nhau ngay cả trong khoảng cách gần, nhưng khi trải các quan trắc thừa thốt lên lưới rộng, khác biệt địa phương bị xóa đi. Các nghiên cứu về đồng bằng và miền núi Nepal, cùng đất nông nghiệp khô hạn của Jordan, cho thấy mật độ mạng quan trắc và chất lượng dữ liệu quyết định nền tảng của dự báo. Mô hình cũng không thể biết mưa và sương giá không được ghi lại.

AgriFM, đăng trên *Frontiers in Plant Science* năm 2026, đã học 2,4 triệu chuỗi thời gian field-season. Trong đánh giá hồi cứu dùng dữ liệu quá khứ, hệ thống báo hiệu áp lực kép của hạn hán và nắng nóng sớm hơn 18 đến 24 ngày so với đường cơ sở chỉ dùng dữ liệu vệ tinh. Nhóm nghiên cứu cho biết cần thử nghiệm tiền cứu để chứng minh ích lợi thực tế cho nông hộ. Con số 18 ngày không phải thành tích của một dịch vụ thương mại đã cảnh báo thảm họa sắp đến tại hiện trường, mà là độ sớm của cảnh báo trong thử nghiệm xem lại sự kiện đã qua.

Tất cả việc này không miễn phí. Lấy dữ liệu vệ tinh, mua dữ liệu khí tượng nhiều năm và thuê máy chủ chạy mô hình đều tốn tiền. Với trang trại lớn canh tác hàng nghìn héc-ta, chi phí đó dễ được bù bằng phần tăng năng suất; nhưng với nông hộ nhỏ chỉ trồng vài majigi ruộng lúa, chính phí thuê bao đã là gánh nặng. Vì vậy chính phủ hoặc hợp tác xã thường mua dịch vụ dự báo thay cho nông dân và cung cấp miễn phí hoặc rất rẻ.

Dù vậy, nếu dự báo đúng thì lợi ích rất lớn. Lấy khoai tây làm ví dụ, nhờ biết trước khi đào rằng khoai năm đó sẽ được bao nhiêu, người ta có thể lập kế hoạch đặt kho và lịch xuất hàng từ vài tháng trước thu hoạch. Với nông hộ, điều đó nghĩa là có thể lên kế hoạch thuê người và gọi xe tải từ trước khi mùa thu đến. Nông hộ trồng lúa mì hoặc đậu tương cũng có thể biết trước khu nào phát triển tốt, khu nào yếu, chỉ bón thêm phân cho khu ấy để giảm chi phí.

Với những người chịu trách nhiệm an ninh lương thực, các con số này có sức nặng khác. Nếu trong mùa hè có thể ước lượng sản lượng lúa mì hoặc ngô của cả nước sẽ thiếu bao nhiêu so với năm thường, họ có thể bắt đầu đàm phán mua ở đâu, mua bao nhiêu trước khi thu hoạch mùa thu kết thúc. Ngược lại, trong năm dự báo bội thu, không có lý do gì phải vội nhập khẩu với giá đắt. Những quyết định như vậy chỉ chậm vài tuần cũng có thể khiến giá tăng hoặc bỏ lỡ nguồn hàng trên thị trường ngũ cốc quốc tế.

Vệ tinh nông lâm nghiệp của Hàn Quốc được phóng ngày 7 tháng 7 năm 2026 và đã liên lạc lần đầu thành công. Các thông số gồm độ phân giải 5 mét, bề rộng quan sát 120 kilômét, 5 dải phổ và chu kỳ quay lại khoảng 3 ngày là chính xác. Tuy nhiên, vệ tinh vẫn ở giai đoạn vận hành ban đầu và hiệu chỉnh ảnh, còn nhiệm vụ chính thức dự kiến bắt đầu năm 2027. Có kế hoạch nối nó với quan trắc nông nghiệp và đánh giá thiên tai, nhưng chưa có thành quả cho thấy tự động tính tiền bảo hiểm hoặc rút ngắn thời gian đánh giá thiệt hại từ vài tuần xuống vài ngày. Không nên viết thành công phóng vệ tinh và hiệu quả dịch vụ thương mại bằng cùng một thì.

Trên thị trường, giá chuyển động ngay khi con số xuất hiện. Ở Hoa Kỳ, mỗi khi Bộ Nông nghiệp công bố triển vọng cung cầu hàng tháng, giá kỳ hạn ngô và đậu tương dao động. Bên cạnh những phép tính tay của quan chức, các hệ thống tự động dùng thuật toán học máy như XGBoost để tính lại và so sánh năng suất mỗi ngày cũng đang được thử nghiệm. Nếu dự báo nhanh hơn và chính xác hơn dù chỉ một ngày, bên nắm thông tin trước sẽ đi trước trong quyết định mua bán.

Trở lại ruộng mạ tháng 4. Chưa ai tận mắt thấy cây mạ chỉ nhô hai đốt ngón tay trên mặt nước ấy thực sự sẽ thành bao nhiêu bao vào mùa thu. Con số trong máy chủ đã định sẵn câu trả lời, nhưng người ngồi xôm trong ruộng sò đất có thể đang cảm nhận điều khác. Khi mùa thu đến, con số trên màn hình và cảm nhận ở đầu ngón tay, bên nào sẽ trùng khớp?

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Chowdhury, P., Maiti, B., Mudi, L. K., & Chatterjee, S. (2026). Artificial intelligence for sustainable agriculture: A review of machine learning and deep learning techniques for crop growth and yield prediction. *International Journal of Applied Resilience and Sustainability*, 2(3), 176-207.
<https://doi.org/10.70593/deepsci.0203007>
2. Haikal, M. F., & Furqon, M. A. (2026). Systematic literature review: Machine learning and deep learning approaches for crop yield prediction using remote sensing data. *Media Informatika*, 25(2), 126-137.
<https://doi.org/10.37595/mediainfo.v25i2.496>

3. Jagadeesan, J., & Nagarajan, R. (2026). A review of federated machine learning for crop yield prediction: Sustainable integration of IoT and smart agriculture. *Indian Journal of Computer Science and Technology*, 2026(502), 532-543.
<https://doi.org/10.59256/indjcst.20260502059>
4. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. (2026). CMAViT: Integrating climate, management, and remote sensing data for crop yield prediction with multimodal vision transformers.
<https://doi.org/10.1109/jstars.2026.3669511>
5. Albahli, S., & Shiraz, M. (2026, July). A multimodal geospatial foundation model anticipates crop stress and yield failure across climates and species. *Frontiers in Plant Science*, 17, 1883297.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1883297>
6. Nejadshamsi, S., Zhang, Y., Porth, B., Zaki, S., Porth, L., & Khoshdel, V. (2026). FARM: Crop yield prediction via regression on Prithvi's encoder for satellite sensing. *AgriEngineering*, 8(1), 2.
<https://doi.org/10.3390/agriengineering8010002>
7. Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn. (2026, ngày 5 tháng 7). Kỷ nguyên vệ tinh nông lâm nghiệp đầu tiên của Hàn Quốc mở ra, khởi động chuyển đổi sang quản trị nông nghiệp khoa học bằng quan sát toàn bộ bán đảo Triều Tiên mỗi 3 ngày. Thông cáo báo chí của Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn.
<https://www.mafra.go.kr/bbs/home/792/578337/artclView.do>
8. NewsPim. (2026, ngày 3 tháng 7). Phóng vệ tinh nông lâm nghiệp đầu tiên của Hàn Quốc... quan sát chính xác mỗi 3 ngày, từ sinh trường cây trồng đến thiên tai.
<https://www.newspim.com/news/view/20260703000799>

3.2

Kiểm soát tưới chính xác và bón phân biến đổi liều lượng (VRA)

Vào trưa tháng 7, khi mặt trời lên cao, một nông dân dùng ngón tay ấn đất bên cạnh cửa lấy nước. Cây lúa gần chỗ nước vào xanh đậm và mập mạp, nhưng cây ở góc ruộng có đầu lá vàng khô. Cùng trồng một ngày, cùng gặp một cơn mưa, nhưng chỉ cách 20 bước đã sinh trưởng khác nhau. Trên màn hình điện thoại trong tay là bản đồ chia ruộng thành ô vuông: ô xanh là khu đủ nước, ô đỏ là khu thiếu nước.

Ngay trong một thửa ruộng, tính chất đất cũng khác theo từng vị trí. Vùng này nhiều cát nên nước rút nhanh, vùng kia nhiều đất sét nên giữ nước lâu. Nếu ruộng có dốc, phần trên khô còn phần dưới nhão bùn. Thêm giá trị độ dẫn điện đo mức điện đi qua đất, giá trị nồng độ ion hydro (pH) biểu thị độ chua và bản đồ cao độ số tái hiện đường đồng mức, sẽ thấy thửa ruộng tưởng như giống nhau thực ra chia thành nhiều cánh đồng nhỏ.

Cách cũ giống như chia cho 30 học sinh trong một lớp mỗi em một bình nước cùng cỡ. Đứa khát và đứa đã no đều nhận lượng như nhau. Kết quả là ở một số khu, phân thừa bị nước mưa rửa trôi xuống suối; ở khu khác, phân thiếu khiến lúa còi cọc. Phân còn lại dẫn đến mặn hóa đất, và ruộng ngập nước còn thải thêm khí nhà kính.

Tưới chính xác và bón phân biến đổi liều lượng là công nghệ tạo đơn thuốc khác nhau cho từng khu của ruộng. Độ ẩm đất có thể đo bằng cảm biến điện dung hoặc TDR. Cảm biến độ dẫn điện chỉ cho thấy trạng thái chung của các ion hòa tan trong đất, chứ không đo riêng nitơ, photpho và kali. Cảm biến chọn lọc ion cũng phải hiệu chỉnh sự nhiễu của độ ẩm, nhiệt độ và các ion khác. Nồng độ trên màn hình cảm biến không phải là cùng một điều với sự thiếu dinh dưỡng mà cây thực sự gặp. Muốn có đơn thuốc, phải xem chung cảm biến hiện trường, kiểm tra đất và sinh trưởng của cây.

Chỉ cảm biến dưới đất không thể cho biết toàn bộ ruộng. Máy bay không người lái và vệ tinh lắp khoảng trống ấy. Màu lá do camera máy bay không người lái chụp

được biến thành chỉ số thực vật, nhưng khi màu xanh đậm phủ kín ruộng, chỉ số NDVI (NDVI) cho giá trị cao như nhau ở mọi nơi và không nhận ra khác biệt giữa các khu. Vì vậy, chuyển sang chỉ số mới (NDRE) đọc đồng thời cận hồng ngoại và bước sóng đỏ hơn một chút thì ô thiếu nitơ và ô thừa nitơ được tách màu trên bản đồ. Ảnh vệ tinh cũng làm được việc ấy.

Ở những ruộng không đủ điều kiện cho máy bay không người lái bay hoặc chôn cảm biến, đôi khi người ta dùng ảnh vệ tinh, kỹ thuật thống kê gọi là phân tích thành phần chính và thuật toán học máy để chọn ra khu thiếu độ ẩm đất và dinh dưỡng.

Kích cỡ ô của bản đồ đơn thuốc tùy thuộc độ chính xác vị trí của cảm biến, vệ tinh, máy bay không người lái và máy nông nghiệp. 1 mét nhân 1 mét không phải chuẩn cho mọi thửa. Máy rải nổi với bản đồ và GPS có thể điều chỉnh van theo khu, còn van tưới đọc đồng thời độ ẩm đất và dự báo thời tiết. Trong thử nghiệm 8 tuần năm 2025 tại nhà kính trồng jalapeño, điều khiển học tăng cường giảm lượng tưới 36.9 phần trăm so với điều khiển thời gian thông thường, trong khi vẫn giữ độ ẩm đất trên điểm héo vĩnh viễn. Kết quả này là thử nghiệm ở một nhà kính và một cây trồng, không thể mở rộng thành hiệu năng tưới tự động của toàn bộ ruộng ngoài trời.

Trong canh tác lúa, người ta dùng tưới khô ướt xen kẽ, tức không giữ ruộng ngập liên tục mà cho nước vào rồi tháo ra. Năm 2026, Cơ quan Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia Thái Lan đã lắp HandySense dùng cảm biến mực nước siêu âm tại hơn 20 điểm nghiên cứu trên ruộng lúa ở Phichit, Lampang và Chiang Mai. Mức giảm 15 đến 30 phần trăm nước và 30 đến 50 phần trăm mê-tan không phải trung bình đo đạc đã được xác định ở toàn bộ các điểm này, mà là hiệu quả kỳ vọng do cơ quan nêu ra. Cần phân biệt việc lắp đặt để thu thập dữ liệu với thử nghiệm đồng ruộng đã kiểm chứng hiệu quả.

Có thể kiểm tra lúa có tuân thủ tưới khô ướt xen kẽ hay không bằng vệ tinh radar và cảm biến mực nước. Nghiên cứu năm 2026 báo cáo độ chính xác phân biệt khoảng 80 đến 93 phần trăm tùy điều kiện. Kết quả này là nghiên cứu xác nhận từ xa việc thực hiện tưới. Nó không phải thành quả thực địa trong đó sổ cái blockchain lập tức trả doanh thu tín chỉ carbon cho nông dân. Để dùng trong thị trường carbon, còn cần đo đạc hiện trường, tính bất định, xác minh độc lập và quy tắc giao dịch.

Với cây trồng cạn, có thể kết hợp tưới nhỏ giọt và cảm biến độ ẩm đất để đưa đúng lượng nước cần thiết quanh rễ. Tưới xung, tức cấp nước ngắt quãng, có thể nâng hiệu quả sử dụng nước tùy điều kiện đất. Nghiên cứu bổ sung bản đồ nitơ từ máy bay không người lái và dữ liệu độ dốc vào kế hoạch bón phân cũng tiếp diễn. Các phương pháp tính như đa tác tử và Naive Bayes cũng đang được thử, nhưng liệu chúng có đồng thời cho thấy tiết kiệm nước, giảm phân bón và tăng thu hoạch hay không vẫn phải kiểm tra lại bằng dữ liệu đồng ruộng của từng cây.

Trên ruộng rộng, có thể thay đổi lưu lượng theo từng vò của hệ thống tưới pivot trung tâm hoặc lập bản đồ đơn thuốc nitơ bằng vệ tinh. YaraPlus của Anh năm 2026 cung cấp miễn phí bản đồ bón nitơ biến đổi liều lượng cho nông hộ đồng cỏ. Bản đồ hiện miễn phí trên điện thoại, nhưng muốn thay đổi lượng phân ngoài ruộng cần máy rải tương thích đọc được bản đồ ấy. Bản đồ có miễn phí thì nông hộ vẫn phải trả giá máy rải.

Tuy nhiên, công nghệ này cũng có mặt tối. Cảm biến chôn lâu trong đất, vì muối và phản ứng hóa học, theo thời gian có thể đưa ra con số sai lệch, hôm qua báo chỗ ấy ướt nhưng hôm nay lại báo khô. Nông hộ tưới sai vì tin số sai đôi khi tắt bản đồ đơn thuốc và quay lại cách cũ. Cứ vài tháng, người phải tự ra đồng so cảm biến với giá trị đo bằng tay; ở ruộng thung lũng không tới được sóng không dây, cảm biến cất công chôn xuống có thể dừng mà không gửi nổi một dòng dữ liệu.

Để giảm lỗi này, người ta cũng dùng cách đặt thiết bị tính toán nhỏ cạnh cảm biến, cài chương trình tự hiệu chỉnh lọc ngay các số, nhưng nó chưa thể hoàn toàn thay thế bàn tay con người.

Giá còn nặng hơn. Để có một vò bón phân biến đổi liều lượng, một máy bay không người lái và vài cảm biến, cần khoản tiền vượt quá lợi nhuận ròng một năm của một nông hộ nhỏ bình thường. Có nông hộ năm đầu mua thiết bị với hy vọng tiết kiệm, rồi năm thứ hai khi sai số cảm biến và mất liên lạc chồng lên nhau, cất thiết bị vào kho và quay lại dùng xẻng cùng mắt nhìn; trường hợp ấy không hiếm.

Chỉ giảm giá thiết bị không giải quyết được vấn đề phổ biến. Viện Nghiên cứu Chính sách Lương thực Quốc tế chỉ ra thiếu đào tạo, tín dụng, chuỗi cung ứng và nhân lực sửa chữa là rào cản với công nghệ tưới quy mô nhỏ. Tigray nằm ở miền bắc Ethiopia, còn Southern Tigray Zone là khu vực phía nam của bang đó. Khi thiết bị hỏng, phải có đường đưa phụ tùng đến, quy tắc chia nước và thu nhập đủ gánh nợ thì máy bơm mới chạy tiếp ở mùa sau.

Đích đến của công nghệ có cặp song sinh số mô phỏng nông trại bên trong máy tính. Các thử nghiệm dùng số cảm biến để tính độ ẩm đất vài ngày sau và so sánh nhiều kịch bản tưới vẫn tiếp tục. Ý tưởng dùng điện toán lượng tử phân bổ nước và điện cho toàn bộ đất canh tác, rồi giao dịch hồ sơ tiết giảm thành tài sản carbon, vẫn gần với triển vọng và đề xuất nghiên cứu. Không nên đặt công nghệ đã xác nhận hiệu quả tại nông hộ cùng một thì với phương pháp tính mới dự định thử trong tương lai.

Trở lại bờ ruộng vào sáng sớm. Ô đỏ trên điện thoại là tín hiệu mở cửa lấy nước thêm, ô xanh là tín hiệu cứ giữ nguyên. Nông dân nhìn màn hình một lần nữa rồi đặt tay lên then cửa nước. Điều phân biệt ruộng dùng được bản đồ này và ruộng không dùng được không phải hiệu năng công nghệ, mà là hoàn cảnh có trả nổi giá đó hay không.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Nezami, M., & Kumar, R. (2026). Multimodal Edge Intelligence for Crop Disease Detection and Irrigation Advisory in Precision Agriculture. *International Journal of Science, Strategic Management and Technology*, 2(5), 1-9.
<https://doi.org/10.55041/ijst.v2i5.232>
2. Sheetal, V. A., Vikranth, B. M., & Adarsha Sagar, H. V. (2026). AI-driven multi-agent framework for smart irrigation and crop health monitoring in Indian rice and sugarcane farming. *Plant Science Today*, 13(sp2), 1-16.
<https://doi.org/10.14719/pst.12797>
3. Hermantoro, Rengga Arnalis Renjani, & Gani Supriyanto. (2026). Artificial intelligence and IoT-based precision irrigation for energy-efficient tropical agriculture. *International Journal of Management and Business Intelligence*, 4(3), 685-698.
<https://doi.org/10.59890/ijmbi.v4i3.25>
4. Research Square. (2026). Impact of improved irrigation technology adoption under groundwater irrigation and its impact on smallholder farmers' crop productivity, income, and food security in Southern Tigray Zone, Ethiopia (bản in trước).
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-9797920/v1>
5. Agremo, & TerraXploreDrones. (2026). AI crop monitoring & variable rate applications (video hội thảo trực tuyến). YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=NW9g73zQ4Yo>
6. Ali, A., Hussain, T., & Zahid, A. (2025). Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. *AgriEngineering*, 7(4), 106.
<https://www.mdpi.com/2624-7402/7/4/106>
7. MDPI. (2026). Alternate wetting and drying irrigated rice paddy field water status monitoring with ALOS-2 three components and IoT sensors. *Remote Sensing*, 18(8), 1183.
<https://www.mdpi.com/2072-4292/18/8/1183>
8. MDPI. (2025). Greenhouse irrigation control based on reinforcement learning. *Agronomy*, 15(12), 2781.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15122781>

9. National Science and Technology Development Agency. (2026). HandySense alternate wetting and drying (AWD) by NSTDA advances low-carbon rice farming in Thailand. NSTDA News.
<https://www.nstda.or.th/en/news/news-years-2026/handysense.html>
10. Yara UK. (2026). Variable rate nitrogen mapping available free to grassland farmers. Yara UK News.
<https://www.yara.co.uk/crop-nutrition/news/news/2026/variable-rate-nitrogen-mapping-available-free-to-grassland-farmers/>
11. Ringler, C., & Lefore, N. (2026, June 10). Are subsidies the solution for 'costly' small-scale irrigation technologies? International Food Policy Research Institute.
<https://www.ifpri.org/blog/are-subsidies-the-solution-for-costly-small-scale-irrigation-technologies/>
irrigation technologies? International Food Policy Research Institute.
<https://www.ifpri.org/blog/are-subsidies-the-solution-for-costly-small-scale-irrigation-technologies/>

3.3

Mô phỏng dự báo giai đoạn phát triển của cây trồng (DVS/DVI)

Vào một sáng tháng 6, bên cạnh ruộng vừa cấy xong, một nông dân nhìn vào điện thoại. Màn hình hiện một câu ngắn: dự báo lúa ở ruộng này sẽ trổ bông vào khoảng ngày 15 tháng 8. Cây mạ non chuyển từ khay mạ còn chưa cao tới mắt cá chân, nhưng chiếc máy trong tay đã chỉ sẵn một ngày sau đó hai tháng.

Ngày ấy không đến một mình. Khoảng 20 ngày trước khi trổ cần bón thêm một lần phân; trong vài ngày trước và sau ngày trổ, phải giữ nước ruộng sâu để ngăn thiệt hại do lạnh và nhiệt độ cao. Sau khi trổ, thời điểm phun thuốc chống đạo ôn và bệnh than hạt được định ra; khi hạt chín, ngày đưa máy gặt liên hợp vào ruộng và thứ tự đưa tới nơi sấy cũng được định. Vì vậy, đoán đúng lúc lúa trổ là quyết định toàn bộ lịch canh tác của một năm.

Cách cũ để đoán ngày này là cộng dồn nhiệt độ. Khi nhiệt độ ở dưới một ngưỡng nào đó, tốc độ sinh trưởng của lúa hầu như không tăng; chỉ phần vượt ngưỡng mới tích lại thành phần sinh trưởng của ngày ấy. Ngưỡng này gọi là nhiệt độ cơ sở, và cách lấy nhiệt độ trung bình ngày trừ nhiệt độ cơ sở rồi tích từng ngày như bỏ vào ống tiết kiệm gọi là tích ôn hữu hiệu (GDD). Nếu kết quả trừ nhỏ hơn 0, ngày đó chỉ bỏ vào 0 rồi đi qua. Lúa lớn lên bằng cách lấp đầy ống tiết kiệm này không bỏ một ngày nào.

Giá trị đổi tích ôn thành thước sinh trưởng được gọi là DVS hoặc DVI tùy mô hình. Một số mô hình lúa đặt cấy là 0, trổ là 1 và chín là 2. Nhưng quy tắc cố định 0.2 là giai đoạn mạ, 0.5 là giai đoạn đẻ nhánh, 1.5 là giai đoạn chắc hạt không chung cho mọi giống và mô hình. Điểm chuẩn và giai đoạn giữa được hiệu chỉnh tùy cây, giống và công thức tính. Muốn đọc cánh đồng bằng một con số, trước hết phải nêu định nghĩa của mô hình tạo ra con số đó.

Nhưng lúa không chỉ phản ứng với nhiệt độ. Nó cũng cảm nhận việc ngày ngắn đi. Lúa là cây chuyển từ nuôi lá và thân sang tạo bông khi đêm dài hơn, nên tín hiệu ngày giữa hè bắt đầu ngắn lại cũng phản ánh vào tốc độ sinh trưởng. Khi ruộng thiếu nước làm rễ khô, sinh trưởng chậm lại; ngược lại, lúa từng thiếu nước cũng

có thể vội trở. Nhiệt độ, độ dài ngày và nước, ba yếu tố này cùng định tốc độ phát triển của ngày ấy.

Cách nông dân dùng lâu nay là cuốn lịch quen tay: kinh nghiệm rằng sau khi cấy vài ngày thì lúa trở. Nhưng vì nhiệt độ xuân thu thay đổi thất thường mỗi năm, những năm ngày trở theo cách này lệch thực tế một tuần đến gần nửa tháng không hiếm. Bón phân quá sớm làm lúa vươn quá mức rồi đổ, quá muộn làm số bông giảm. Cái giá của việc bỏ lỡ một ngày trở thành vụ thu hoạch của cả ruộng. Thờì chưa có cách tính khác, chỉ có thể đổ lỗi sai số cho trời và chờ năm sau.

Học máy bổ sung hai điều lớn cho cách tính tích ôn. Một là đặt cạnh nhau mô hình chứa quy luật vật lý và mô hình tìm quy luật trong hồ sơ. Các mô hình sinh trưởng cây trồng như APSIM, DSSAT và SIMRIW, được điều chỉnh cho lúa ở Nhật Bản, giải bằng phương trình cách nhiệt độ, nước và nitơ vận động bên trong lúa. Mạng thần kinh nhân tạo như bộ nhớ dài ngắn hạn (LSTM) hoặc Transformer học mẫu từ hồ sơ quá khứ của hàng chục nghìn ruộng, thay vì phương trình. Nối hai mô hình lại, mạng thần kinh bù đặc tính của chính ruộng ấy mà phương trình đơn thuần không giải thích được.

Nếu ấn định thành quy tắc thực tế rằng lúa chỉ tiến từ 0 tới 2, không quay ngược, cũng ngăn lỗi mạng thần kinh tính ngược giai đoạn phát triển.

Trong một cánh đồng, giống chín sớm và giống chín trung muộn được gieo cùng nhau. Nếu chỉ chạy chỉ số phát triển bằng một nhiệt độ trung bình vùng, giống chín trước và giống chín sau sẽ trộn vào một phép tính. Vì vậy, phép tính đưa riêng nhiệt độ cơ sở và độ nhạy quang chu kỳ khác nhau của từng giống, để dù nằm cạnh ruộng khác, mỗi giống vẫn vẽ một đường cong khác.

Điều còn lại là sửa phép tính theo thời gian thực bằng ảnh chụp từ bầu trời. Khi vệ tinh và máy bay không người lái chụp ruộng, chúng cho ra số như chỉ số diện tích lá thể hiện lá mọc rậm đến đâu. Cách so sánh số này với trạng thái lúa trong phép tính, rồi chỉ đẩy tới hoặc kéo lùi bằng phần sai lệch, gọi là đồng hóa dữ liệu. Nó giống như hệ thống dẫn đường báo lại giờ đến dự kiến mỗi khi nhận tín hiệu vị trí thực. Phép tính lập vài tháng trước không thể giữ nguyên mà đúng, nên từng bức ảnh ruộng dần chỉnh lại phép tính.

Nhìn vào bên trong công việc hiệu chỉnh này sẽ thấy phương pháp gọi là bộ lọc hạt. Máy tính sao chép cùng một ruộng thành hàng trăm bản, để từng bản tính chỉ số phát triển dưới giả định hơi khác nhau. Khi một ảnh vệ tinh đi vào, bản sao đưa

đáp án gần ảnh ấy hơn được cho trọng số lớn hơn, còn bản sao đưa đáp án xa bị lọc ra. Bộ lọc Kalman tổ hợp cũng có nguyên lý tương tự, mỗi lần chỉ sửa dự báo một ít bằng chênh lệch giữa quan sát và giá trị tính.

Vệ tinh nông lâm nghiệp đầu tiên của Hàn Quốc được phóng từ Căn cứ Lực lượng Không gian Vandenberg ở Hoa Kỳ ngày 7 tháng 7 năm 2026 và đã liên lạc lần đầu thành công. Nó có độ phân giải 5 mét, bề rộng quan sát 120 kilômét và năng lực quan sát chu kỳ khoảng 3 ngày. Tuy nhiên, trong năm 2026 việc vận hành ban đầu và hiệu chỉnh ảnh sẽ diễn ra, còn nhiệm vụ chính thức dự kiến bắt đầu năm 2027. Chưa đến giai đoạn viết ở thì hiện tại rằng ảnh sinh trưởng lúa và đậu tương đã được gửi cho nông hộ mỗi 3 ngày.

Nếu gom quan trắc cách 3 ngày như vậy trên hàng nghìn ruộng, có thể hình dung trước lúa của một vùng, rồi cả một nước, sẽ thu được bao nhiêu trong năm nay. Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn lập kế hoạch xem thông tin phát triển thu thập như thế cùng dự báo cung cầu của các cây khác như đậu tương và cải thảo, để có thời gian ứng phó trước khi giá tăng hoặc giảm đột ngột. Phép tính đoán ngày trở của một ruộng như vậy dẫn tới phép tính xử lý giá bữa ăn.

Một kênh giải thích kết quả tính theo câu hỏi của nông dân cũng đang được chuẩn bị. Cục Phát triển Nông thôn đang phát triển tác tử AI “AI Isak”, kết hợp tài liệu kỹ thuật nông nghiệp và mô hình ngôn ngữ. Thời điểm dịch vụ dự kiến trong kế hoạch công tác chính thức năm 2026 là năm 2027. Chẩn đoán hình ảnh sâu bệnh đang chạy trên điện thoại của nông hộ hiện nay và AI Isak sẽ giải thích ngày trở cùng thời kỳ ra hoa bằng đối thoại trong tương lai có thời điểm bắt đầu khác nhau.

Điều gì xảy ra thực tế nếu ngày này chậm một ngày? Khoảng 20 đến 25 ngày trước trở, ở thời kỳ hình thành đồng khi bông đang được tạo trong thân lúa, khoảng thời gian bón phân nitơ chỉ có vài ngày. Bỏ lỡ những ngày ấy và bón muộn thì chỉ thân vươn dài, dễ đổ; bón quá sớm thì sức phân đã cạn trước khi hạt đậu trên bông, làm giảm số hạt. Một con số, chỉ số phát triển 0.75, quyết định khi nào mở bao phân.

Khoảng ngày cấp nước cũng hẹp. Vài ngày trước và sau thời kỳ trở, phải giữ nước ruộng sâu hơn thường lệ để bông tạo phấn đúng và chịu được lạnh cùng nóng bất thường. Cấp nước ấy chậm một ngày thì phấn đã hỏng, tháo sớm một ngày thì ruộng khô đúng ngày nguy hiểm. Ở ruộng luân canh lúa, đậu tương và lúa mì, ngày thu cây trước và ngày trồng cây sau đều gắn vào phép tính này, nên sai một ngày cũng đẩy lùi kế hoạch gieo cây kế tiếp.

Thông báo này không chỉ hiện ở một ruộng. Hàng trăm thửa ruộng phía dưới cùng chia nước từ một hồ chứa đều nhận phép tính ấy. Ngày trồng, hướng ruộng và độ sâu đất hơi khác theo từng thửa, nên dù trồng cùng giống vẫn có ruộng mà chỉ số phát triển tách ra; hội thủy nông lại sắp xếp thứ tự cấp nước theo độ tách đó.

Ngay cả ngày thu hoạch sau khi chín hoàn toàn cũng làm chất lượng dao động chỉ vì chênh vài ngày, bởi phải sắp trước công việc máy gặt liên hợp và thứ tự ở nơi sấy. Tích ôn và dự báo thời tiết có thể dùng để hiệu chỉnh ngày do kinh nghiệm ấn định. Nhưng sai số giảm được bao nhiêu tùy vùng, giống, ngày gieo và năm đánh giá. Việc thu hẹp ngày một ngày dẫn đến bao nhiêu phần trăm năng suất cũng chỉ biết khi đo cùng bão, mưa và thời gian chờ ở nơi sấy.

Một hai ngày này không kết thúc ở một ruộng. Trong làng dùng chung một máy gặt liên hợp cho nhiều nông hộ, nếu ngày thu hoạch của ruộng trước lệch, ruộng kế tiếp chờ phía sau, rồi ruộng sau nữa, đều bị đẩy lùi thứ tự. Khi phép tính chỉ số phát triển hiển thị cùng lúc ngày dự kiến của nhiều ruộng, việc cả làng lập trước thứ tự dùng máy gặt liên hợp cũng dễ hơn nhiều.

Nắng nóng và đêm nhiệt đới làm lung lay tiền đề của lịch phát triển. Ngô gặp đồng thời nhiệt độ cao và thiếu nước khi ra hoa có thể làm hỏng phần và quá trình thụ tinh. Nghiên cứu nhiệt độ cực cao dùng KDD vượt 32 độ làm chỉ số áp lực nhiệt cho lúa mì và ngô. Thiệt hại rét ở lúa mì cũng phải xem cùng giống, giai đoạn sinh trưởng, nhiệt độ và thời gian phơi nhiễm. Dù ngày trên lịch đúng, hạt vẫn có thể lép nếu thời tiết ngày đó vượt ra ngoài phạm vi quá khứ.

Sự phát triển của côn trùng và nấm cũng được tính theo cách ấy. Sâu keo mùa thu gặm lá ngô phát triển nhanh hơn từ sâu non thành bướm khi nhiệt độ tăng, và tốc độ này cũng tính bằng tích ôn. Vấn đề là tốc độ sâu phát triển và tốc độ ngô phát triển vận động khác nhau trong cùng một mùa hè. Có năm sâu mọc cánh sớm hơn thường lệ nửa tháng, gặp đúng đàn sâu ấy khi cây ở giai đoạn phát triển yếu nhất. Vì vậy, các mô hình dự báo sâu bệnh gần đây đặt chỉ số phát triển cây và tốc độ phát triển sâu cạnh nhau, theo hướng xác định trước vài ngày nguy hiểm khi hai bên chồng lên nhau.

Theo phân tích của nhóm nghiên cứu đăng trên tạp chí quốc tế Earth's Future năm 2025, lúa mì và ngô Hoa Kỳ khi hạn hán và nắng nóng chồng lên nhau sẽ cùng giảm năng suất và tỷ lệ hạt thực sự có thể thu, gọi là phần có thể thu hoạch; nhưng mức giảm khác tùy cây ở giai đoạn phát triển nào. Nghĩa là ruộng gặp nắng nóng quanh thời kỳ ra hoa và ruộng gặp nắng nóng sớm hơn chịu thiệt hại khác

nhau dù cùng trải qua nhiệt như nhau. Bài tổng quan trên tạp chí quốc tế năm 2025 tập hợp mô hình tích ôn của cây làm vườn cũng chỉ ra công thức cũ chỉ cộng phần nhiệt vượt ngưỡng, không đưa vào tính toán việc sinh trưởng lại dừng ở ngày quá nóng.

Vì thế các mô hình gần đây tách nhiệt của ngày quá nóng ra riêng và sửa cách tính theo kiểu tính như điểm phạt.

Tính chỉ số phát triển không chỉ nhắm vào một ngày của mùa hè này. Đưa các kịch bản khí hậu tương lai khác nhau do Ban liên chính phủ về biến đổi khí hậu (IPCC) đưa ra vào cùng công thức, cũng có thể vẽ trước ngày trổ của ruộng này 30 năm nữa sẽ sớm hơn hiện nay bao nhiêu. Đưa vào kịch bản tiếp tục thải khí nhà kính như bây giờ sẽ có đường cong ngày lúa trổ sớm thêm chút ít mỗi năm; đưa vào kịch bản giảm phát thải mạnh thì đường cong đó thoải hơn rất nhiều.

Càng tính chi li, vấn đề còn lại càng nhiều. Dù là lúa hay lúa mì, nhiệt độ cơ sở và mức phản ứng với độ dài ngày khác nhau theo giống, nên mỗi khi có giống mới phải trồng vài tháng trong phòng thí nghiệm điều khiển nhân tạo nhiệt độ và ánh sáng để có được con số riêng của giống ấy. Phòng này gọi là phòng khí hậu nhân tạo. Đây là nơi có thể tùy ý điều chỉnh nhiệt độ và độ dài nắng, đầy nhanh và quan sát trọn quá trình lúa lớn từ ruộng mạ đến ngày trổ. Nhưng mỗi năm có hàng chục giống mới xuất hiện, và một ngăn phòng khí hậu nhân tạo không có thời gian trồng hết từng ấy giống.

Vì vậy các giống chưa xong thí nghiệm mượn số của giống cũ có vẻ ngoài tương tự để đưa vào tính; nếu nhiệt độ cơ sở của hai giống thực tế lệch khoảng nửa độ, nửa độ ấy đi qua mùa hè sẽ phồng thành sai số vài ngày. Gần đây cũng có thử nghiệm kết hợp kỹ thuật kiểu hình thông lượng cao, dùng máy ảnh chụp cùng lúc hàng trăm cây mạ để đọc tốc độ lớn, với cách tính ngược ước lượng nhiệt độ cơ sở từ tốc độ ấy, nhằm rút ngắn thời gian ở trong phòng thí nghiệm. Ruộng núi không có trạm khí tượng chỉ có thể điền ước lượng giá trị trạm lân cận từ khoảng cách và độ cao, nên dù tính toán tinh vi đến đâu, sai số riêng của ruộng ấy vẫn còn.

Có nông dân nghi ngờ phía tính toán nếu ngày do chỉ số phát triển cho biết khác ngày họ đã lâu ước bằng mắt quá một ngày. Thực tế tuy hiếm, mô hình cũng từng bỏ lỡ vài ngày khi gặp mùa xuân đặc biệt khô hoặc sương giá muộn, nên không thể nói sự nghi ngờ ấy hoàn toàn vô căn cứ. Vì bất tiện phải học mới thông báo điện thoại và giá trị cảm biến, cùng chi phí thiết bị ban đầu, cũng có nông hộ dùng vài năm rồi quay lại lịch cũ.

Cặp song sinh số đang được phát triển theo hướng mô phỏng ruộng lúa và vườn cây trong máy tính rồi chạy trước các kịch bản thời tiết, tưới khác nhau. Năm 2026, thử nghiệm tích dữ liệu được thực hiện ở vườn nho Chile và nghiên cứu nhiều cây trồng, nhưng chưa thể gọi là hệ thống thương mại đã chứng minh giảm lượng tưới thực tế và hiệu quả bón phân tự chủ. Cảnh trí tuệ nhân tạo cho máy bay không người lái cất cánh khi chỉ số phát triển đạt giá trị nào đó cũng nên để lại như kịch bản tự động hóa tương lai, không phải thành quả hiện tại.

Trở lại ruộng tháng 6 ấy. Con số ngày 15 tháng 8 trên màn hình điện thoại là một ngày được tạo nên bởi tích ôn đã tích lũy, ảnh vệ tinh đến mỗi 3 ngày và thời tiết của vài năm qua. Người đã đi lại ở ruộng này lâu nay chông ược lượng của mình lên con số đó. Ngày ấy có thực sự khôp hay một đợt nắng nóng đến cuối tháng 6 sẽ làm rung cả phép tính, chưa ai biết.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Xiao, K., Zhou, X., Gui, H., Tian, Y., Chen, X., Li, Y., Matomela, N., & Xin, Q. (2025). Drought and extreme heat reduce wheat and maize production in the United States by lowering both crop yields and harvestable fraction. *Earth's Future*, 13(12), e2024EF005557. <https://doi.org/10.1029/2024EF005557>
2. Chowdhury, P., Maiti, B., Mudi, L. K., & Chatterjee, S. (2026). Artificial intelligence for sustainable agriculture: A review of machine learning and deep learning techniques for crop growth and yield prediction. *International Journal of Applied Resilience and Sustainability*, 2(3), 176-207. <https://doi.org/10.70593/deepsci.0203007>
3. Patil, N., Raut, K., Bhusari, S., & Gharge, A. (2025). Digital twin integration with generative AI and foundation models for real-time precision agriculture and crop resilience. *International Journal of Research in Agronomy*, 8(12S), 170-177. <https://doi.org/10.33545/2618060x.2025.v8.i12sc.4355>
4. Kamangir, H., Sams, B. S., Dokoozlian, N., Sanchez, L., & Earles, J. M. (2026). CMAViT: Integrating climate, management, and remote sensing data for crop yield prediction with multimodal vision transformers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 19, 8932-8945. <https://doi.org/10.1109/jstars.2026.3669511>
5. Kollipara, Y. V. P., & El-Gayar, O. (2026). AI-driven crop yield prediction for climate-resilient agriculture. *Conference Proceedings of the International Conference on Agriculture, Food Security and Safety*, 94-106. <https://doi.org/10.32789/agrofood.2025.5107>
6. Makouate, H. F., & Zude-Sasse, M. (2025). Advances in Growing Degree Days Models for Flowering to Harvest: Optimizing Crop Management with Methods of Precision Horticulture, a Review. *Horticulturae*, 11(12), 1415. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11121415>
7. Kalisetti, V. S., Sudharshanam, U., Venkata, N. K. M., Mandla, R., Akula, S., Bedika, M., Dharavath, B., Dogga, S., Ramakrishna Babu, A., & Javaji, C. (2025). Smart agriculture: A climate-driven approach to modelling and forecasting fall armyworm populations in maize using machine learning algorithms. *Frontiers in Plant Science*, 16, Article 1636412. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1636412>

8. Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn. (2026). Kỳ nguyên vệ tinh nông lâm nghiệp đầu tiên của Hàn Quốc mở ra, khởi động chuyển đổi sang quản trị nông nghiệp khoa học bằng quan sát toàn bộ bán đảo Triều Tiên mỗi 3 ngày. Thông cáo báo chí của Cục Chính sách Khoa học và Công nghệ, Quan chức Chính sách Đổi mới Công nghiệp Nông nghiệp, Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn (2026. 7. 5.).

<https://www.mafra.go.kr/bbs/home/792/578337/artclView.do>

9. Nongmin Shinmun. (2025, November 19). Cục Phát triển Nông thôn thúc đẩy mở rộng “AI Isak” thành dịch vụ thông tin kỹ thuật nông nghiệp.

<https://www.nongmin.com/article/20251119500634>

10. FreshFruitPortal. (2026, June 17). Innovative digital twin model targets growers' real-world irrigation and traceability needs in 2026.

<https://www.freshfruitportal.com/news/2026/06/17/twin-model/>

Chương 4

Hệ gen học và chọn giống phân tử bằng AI

4.1

Dữ liệu lớn về hệ gen cây trồng và xây dựng hệ gen toàn loài (Pan-genome)

Kho bảo quản lạnh của trung tâm tài nguyên di truyền được duy trì ở mức khoảng 4 độ C. Những ngăn kéo xếp thành hàng kín đặc các túi giấy, mỗi túi đều có nhãn viết tay hoặc mã vạch. Có túi chứa giống lúa bản địa được truyền lại gần một trăm năm trên một cánh đồng nào đó ở Jeolla, có túi lại chứa lúa hoang được thu thập tại vùng đất ngập nước dưới chân dãy Himalaya. Bề ngoài của chúng không khác nhiều so với gạo bán ngoài chợ, nhưng các gen chứa bên trong hoàn toàn khác nhau.

Cho đến nay, phương pháp tiêu chuẩn để khảo sát hệ gen lúa là chọn một giống duy nhất trong số rất nhiều túi này, giải trình tự hoàn chỉnh giống đó rồi đối chiếu tất cả các giống lúa còn lại với nó để đọc. Giống đầu tiên được Dự án Hệ gen Lúa Quốc tế chọn làm chuẩn là Nipponbare, một giống lúa japonica của Nhật Bản. Trong nhiều thập niên sau đó, hoạt động nghiên cứu lúa trên toàn thế giới được tiến hành bằng cách trải trình tự gen của giống duy nhất này ra như một cuốn từ điển, rồi ghép trình tự của các giống khác vào những trang tương ứng của cuốn từ điển đó.

Việc này giống như cố gắng hệ thống hóa mọi ngôn ngữ trên thế giới bằng một cuốn từ điển duy nhất. Khi gặp một từ địa phương không có trong từ điển ngôn ngữ chuẩn, sẽ không có trang nào để ghi từ đó vào. Nếu cố ép một gen chỉ có ở lúa hoang hoặc lúa bản địa, hay một trình tự hoàn toàn không có ở các giống lúa khác, vào hệ gen tham chiếu, toàn bộ trình tự ấy sẽ bị bỏ sót hoặc bị gán nhầm vào một vị trí không liên quan. Các nhà di truyền học gọi hiện tượng này là sai lệch tham chiếu. Chỉ những gen có trong giống được chọn làm chuẩn mới hiện ra, còn những gen giống đó không có thì ngay từ đầu đã bị xem như không tồn tại.

Trong nhiều trường hợp, chính những gen biến mất theo cách ấy mới là tài sản quý giá đã giúp cây lúa chống chịu hạn hán, sâu bệnh.

Muốn xóa bỏ điểm mù này, phải trải tất cả các phiên bản lên cùng một mặt bàn. Dù là lúa, lúa mì hay đậu tương, khi xếp song song rồi chồng hệ gen của hàng

trăm đến hàng nghìn giống lên nhau, hai lớp sẽ hiện ra. Lớp gen mà mọi giống đều có được gọi là hệ gen lõi. Lớp gen chỉ có ở một số giống cụ thể, giống bản địa hoặc loài hoang dại được gọi là hệ gen biến đổi. Trong hệ gen biến đổi ẩn chứa những khả năng không có ở giống tiêu chuẩn, như khả năng chịu hạn, bền rễ trên đất nhiễm mặn và miễn dịch để nhận diện mầm bệnh lạ. Bản đồ kết hợp hai lớp này được gọi là hệ gen toàn loài.

Nhóm nghiên cứu lúa quốc tế đã giải trình tự lại hơn 3.000 dòng lúa thu thập trên toàn thế giới và công bố dữ liệu của Dự án 3.000 Hệ gen Lúa vào năm 2014. Dữ liệu này trở thành nền tảng để so sánh hàng triệu biến dị và tìm hiểu khác biệt di truyền giữa indica, japonica và các giống địa phương. Bài báo trên PNAS đề xuất ý tưởng Green Super Rice đã được công bố sớm hơn, vào năm 2007. Không thể có trình tự thời gian trong đó bài báo năm 2007 được tạo ra từ dữ liệu của 3.000 hệ gen lúa.

Có thể đặt cả hệ nghiên cứu Green Super Rice cạnh thành quả của Dự án 3.000 Hệ gen Lúa, nhưng không được nối chúng theo cách khiến nghiên cứu đi trước có vẻ như do dữ liệu ra đời sau tạo nên.

Những gen làm thay đổi lịch sử trồng lúa được phát hiện qua các con đường khác nhau. SD1 từ lâu đã được xác định là gen lùn dẫn dắt Cách mạng Xanh, còn nhóm SH1 hiện diện ở nhiều giống lúa châu Á và liên quan đến tính rụng hạt. Xa21 là gen kháng bệnh bạc lá được phát hiện ở lúa hoang. Không thể gộp cả ba gen vào nhóm những gen mà chúng ta thậm chí sẽ không biết là tồn tại nếu chỉ quan sát một hệ gen tham chiếu. Sức mạnh của hệ gen toàn loài nằm ở khả năng cho thấy không chỉ sự có mặt hay vắng mặt của gen, mà cả biến dị cấu trúc, biến dị hiện diện-vắng mặt, alen theo từng giống và vùng điều hòa.

Hệ gen toàn loài dạng đồ thị liên kết các trình tự chung và các trình tự phân nhánh của nhiều giống trong một đồ thị duy nhất. Từ khác biệt một ký tự cho đến đảo đoạn, lặp đoạn, chèn và xóa đoạn lớn đều có thể được đưa lên cùng một bản đồ. Công nghệ đọc dài độc lập như PacBio HiFi và Oxford Nanopore nâng cao chất lượng lắp ráp ở cấp nhiễm sắc thể. Tuy nhiên, điều đó không có nghĩa là muốn xây dựng hệ gen toàn loài dạng đồ thị thì trình tự của mọi giống đều phải hoàn chỉnh từ telomere này đến telomere kia. Thiết kế kết hợp bản lắp ráp chất lượng cao của các dòng đại diện với dữ liệu tái giải trình tự của nhiều dòng cũng được sử dụng rộng rãi.

Nghiên cứu hệ gen toàn loài dạng đồ thị của đậu xanh công bố trên Nature Genetics năm 2026 đã lắp ráp mới 11 dòng đại diện và dùng 580 dòng làm bộ dữ liệu tái giải trình tự, di truyền quần thể và phân tích liên kết. Nhóm nghiên cứu đã hệ thống hóa 75.268 họ gen và 66.862 biến dị cấu trúc, đồng thời khảo sát các vùng ứng viên liên quan đến 20 tính trạng qua thử nghiệm canh tác tại năm khu vực. Đây không phải là nghiên cứu lắp ráp mới toàn bộ 580 hệ gen. Cần phân biệt mẫu dùng để lắp ráp với mẫu dùng để phân tích quần thể thì mới thấy được mật độ và cơ sở của bản đồ.

Hệ gen toàn loài không dừng lại ở đó. Việc tập hợp và so sánh tại một nơi không chỉ các giống canh tác và giống bản địa của khu vực đó, mà cả những loài hoang dại họ hàng xa đến mức hoàn toàn không thể lai với nhau, được gọi là hệ gen toàn loài siêu cấp. Trong chi lúa, ngoài lúa được trồng ở châu Á còn có một loài lúa riêng đã được canh tác từ lâu ở châu Phi, và cũng có nhiều loài họ hàng hoang dại thực sự không thể lai với cả hai. Khi đưa cả hệ gen của những họ hàng xa này lên bản đồ, các gen phòng vệ hoặc cấu trúc rễ đã biến mất từ lâu ở loài cây trồng lại hiện ra trước mắt.

Lúa mì là cây lục bội do các hệ gen tổ tiên khác nhau hợp lại nên rất khó lắp ráp. Một nghiên cứu đăng trên Nature năm 2024 đã phân tích 17 giống của Trung Quốc và hệ thống hóa 249.976 biến dị cấu trúc. Bản đồ này cho thấy các biến dị liên quan đến VRN-A1, tính chất lúa mì vụ xuân-vụ đông và 1RS. Dù không phải là bản đồ chồng tất cả các giống lúa mì trên thế giới lên nhau, nghiên cứu vẫn cho thấy phạm vi biến dị cấu trúc rộng đến mức nào ngay cả khi chỉ xét các giống trong một quốc gia.

Nghiên cứu hệ gen toàn loài của đậu tương cũng phân chia vai trò của từng mẫu. Các nhà nghiên cứu tái giải trình tự sâu 2.898 dòng đậu tương trồng và đậu tương hoang, rồi lắp ráp 26 dòng đại diện trong số đó. Không thể gọi đây là bản đồ lắp ráp mới toàn bộ hơn 2.800 hệ gen. Thay vì nối gen điều hòa sự hút nước và trạng thái ngủ của đậu tương hoang với khả năng chống hạn, kháng bệnh và hàm lượng protein như thể tất cả đều là thành quả nối tiếp của một nghiên cứu, cần trình bày riêng bài báo gốc đã xác nhận từng tính trạng.

Ở ngô, mức độ thay đổi còn lớn hơn. Tổ tiên hoang dại của ngô ngày nay là teosinte, một loài cỏ gần với cỏ dại, trên bắp chỉ lơ thơ vài hạt. Khi đặt hệ gen của teosinte và ngô hiện đại cạnh nhau rồi chồng lên nhau, một số gen phân định quá trình biến đổi từ bắp gầy chỉ có vài hạt thành bắp to với hạt ken dày như ngày nay

đã hiện ra. Dấu vết của sự tuyển chọn mà con người đã làm bằng tay trên đồng ruộng suốt hàng nghìn năm nay được đánh dấu bằng tọa độ gen trên màn hình máy tính.

Vấn đề là lượng thông tin trong những bản đồ tích lũy như vậy quá lớn để con người đọc bằng mắt. Chỉ riêng hệ gen của một cây lúa đã là một chuỗi liên tục dài hơn 400 triệu ký tự. Chỉ có bốn ký tự A, T, G, C, nhưng nhìn vào hình dạng của chúng thì không thể biết vị trí nào trong trình tự là nguyên nhân gây bệnh và vị trí nào tạo nên sức chịu hạn. Trí tuệ nhân tạo đảm nhận vấn đề này. Một chương trình có nguyên lý giống mô hình ngôn ngữ được huấn luyện để đọc câu do con người viết và dự đoán từ tiếp theo được áp dụng cho trình tự gen thay vì câu văn.

Các nhà nghiên cứu gọi những chương trình như vậy là mô hình ngôn ngữ DNA hoặc mô hình nền tảng hệ gen. Nếu cho mô hình đọc trước hệ gen của hàng trăm loài thực vật, ngay cả khi gặp một trình tự chưa từng thấy, mô hình vẫn có thể dựa vào ngữ cảnh trước sau để suy đoán đó có phải là tín hiệu khởi đầu của gen hay không, là bản thiết kế tạo ra loại protein nào và là vùng sẽ biểu hiện mạnh đến mức nào. Một bài bình luận tổng quan công bố năm 2026 nhận định rằng các mô hình nền tảng hệ gen như vậy đã tiến đến giai đoạn giải mã ngữ pháp điều hòa của thực vật.

Chọn lọc hệ gen kết hợp chỉ thị di truyền của hạt giống với hồ sơ năng suất và khả năng kháng bệnh trong nhiều năm để dự đoán thành tích của cá thể chưa phát triển hoàn toàn. Do không cần nuôi trồng mọi dòng đến cuối mỗi thế hệ, phương pháp này có thể rút ngắn thời gian chọn lọc ban đầu. Tuy vậy, thời gian sàng lọc dòng lai, thời gian cố định thế hệ, thử nghiệm thích nghi tại nhiều khu vực và đăng ký giống đều có lịch trình khác nhau. Dù máy tính nhanh chóng chọn được ứng viên vào mùa xuân, vẫn phải trải qua thêm nhiều mùa vụ trước khi hạt giống mới vào được kho mùa thu của nông hộ.

Tuy nhiên, bản đồ chi tiết hơn không trực tiếp tạo ra giống tốt. Với sự hỗ trợ của Bộ Nông nghiệp, Thực phẩm và Nông thôn Hàn Quốc, Viện Xúc tiến Công nghệ Nông nghiệp Hàn Quốc đã tập hợp thông tin hệ gen và khoảng 4.000 chỉ thị phân tử của 12 loại cây trồng, trong đó có ớt và lúa, để khai trương Hệ thống Thông tin Chọn giống Kỹ thuật số. Bất kỳ ai truy cập đám mây cũng có thể tải các dữ liệu này xuống. Vấn đề nằm ở bước tiếp theo.

Một bài bình luận tổng quan quốc tế công bố năm 2025 chỉ ra rằng dù dữ liệu kiểu gen có tích lũy nhiều đến đâu, mô hình dự đoán vẫn mất tác dụng nếu không có

dữ liệu kiểu hình thu thập đồng thời để xác nhận các tính trạng như năng suất hoặc khả năng kháng bệnh trên đồng ruộng thực tế. Chi phí thu thập dữ liệu kiểu hình đáng tin cậy trong nhiều năm và tại nhiều khu vực còn lớn hơn chi phí giải trình tự hệ gen. Một dòng sinh trưởng tốt trên cánh đồng này nhưng lại phát triển kém ở khu vực khác hoặc trong năm khác là chuyện thường gặp.

Hơn nữa, tính trạng mà nông dân mong đợi nhất như năng suất không do một gen duy nhất quyết định, mà được hàng chục đến hàng trăm gen chia nhau chi phối từng phần, và tổ hợp đó phản ứng khác nhau tùy theo đất đai và thời tiết.

Sau khi hệ gen toàn loài chỉ ra gen ứng viên, công việc lai tạo và chỉnh sửa gen sẽ tiếp nối. CRISPR có thể mạnh trong việc cắt trình tự đích hoặc thay đổi vài ký tự, nhưng việc chèn có mục tiêu một gen dài và vùng điều hòa của loài hoang dại thẳng vào vị trí mong muốn trên giống canh tác có hiệu suất thấp, đồng thời tạo gánh nặng lớn về tái sinh và kiểm chứng. Đây không phải lúc nào cũng là con đường nhanh và dễ hơn lai tạo. Ảnh hưởng của một gen đã chỉnh sửa đối với năng suất, chất lượng và các khả năng kháng khác phải được kiểm chứng lại trong nhiều môi trường.

Vấn đề dữ liệu di truyền và bằng sáng chế tập trung vào một số doanh nghiệp là có thật. Tuy nhiên, con số 71 phần trăm do USDA thống kê không phải là toàn bộ bằng sáng chế tài nguyên di truyền trên thế giới. Đó là tỷ lệ mà ba công ty Bayer, Corteva và Syngenta nắm giữ trong số các bằng sáng chế hữu dụng về giống mới được đăng ký tại Hoa Kỳ từ năm 1976 đến năm 2021. Các bằng sáng chế về phương pháp, tính trạng GM và trình tự gen không nằm trong thống kê này. Monsanto được Bayer mua lại vào năm 2018. Khi nói về sự tập trung bằng sáng chế, phải nêu đồng thời quốc gia, thời kỳ, loại bằng sáng chế và quan hệ giữa các doanh nghiệp.

Trở lại kho bảo quản lạnh ấy. Mỗi túi trong ngăn kéo vẫn là một nguồn gen phải được con người tự tay thu thập, tự tay gieo trồng và kiểm chứng. Dù bản đồ hệ gen toàn loài trên màn hình tinh vi đến đâu, vẫn phải chờ trọn một mùa mới biết gen mà bản đồ chỉ ra sẽ làm đầy hạt lúa trên ruộng thực tế đến mức nào. Trong hàng chục nghìn túi ở những ngăn kéo kia, còn bao nhiêu gen thậm chí chưa được đặt tên?

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Farooq, M. A., Gao, S., Hassan, M. A., et al. (2024). Artificial intelligence in plant breeding. *Trends in Genetics*, 40(10), 891-908.
[https://www.cell.com/trends/genetics/fulltext/S0168-9525\(24\)00167-7](https://www.cell.com/trends/genetics/fulltext/S0168-9525(24)00167-7)
2. Jiao, C., Xie, X., Hao, C., et al. (2025). Pan-genome bridges wheat structural variations with habitat and breeding. *Nature*, 637(8045), 384-393.
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08277-0>
3. Shang, L., Li, X., He, H., et al. (2022). A super pan-genomic landscape of rice. *Cell Research*, 32(10), 878-896.
<https://doi.org/10.1038/s41422-022-00685-z>
4. Chen, H., et al. (2026). Graph-based pan-genome reveals structural variations associated with agronomic traits in mung bean. *Nature Genetics*.
<https://doi.org/10.1038/s41588-026-02644-5>
5. Zhu, W., Li, W., Zhang, H., & Li, L. (2025). Big data and artificial intelligence-aided crop breeding: Progress and prospects. *Journal of Integrative Plant Biology*, 67(3), 722-739.
<https://doi.org/10.1111/jipb.13791>
6. Fu, J., Zheng, S., Fan, L., Zheng, X., & Qian, Q. (2025). Breeding 5.0: Artificial intelligence (AI)-decoded germplasm for accelerated crop innovation. *Journal of Integrative Plant Biology*.
<https://doi.org/10.1111/jipb.70008>
7. Yu, H. (2026). AI foundation models in plant biology. *New Phytologist*.
<https://doi.org/10.1111/nph.71395>
8. Nasir, S., Khan, L., Murtaza, A., Raza, A., Nasir, F., & Azam, U. (2026). Bridging traditional plant breeding with precision agriculture: A path to smarter crop improvement. In *Explicable Agriculture: Microbial Ecology, Bio-Innovations and Crop Production* (pp. 194-201). Unique Scientific Publishers.
<https://doi.org/10.47278/book.tl/2026.383>
9. World Agriculture Forum. (2026). WAF Interactive Webinar on Biotechnology and AI Contributions to Plant Breeding [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=xkVT9D7Nqy0>
10. Prasanna, B. M. (2026). Predictive Breeding: Bridging Genetics, Artificial Intelligence and Agriculture [Video]. SHARE GENES.
<https://www.youtube.com/watch?v=FWcxeEC90JA>
11. Money Today. (ngày 16 tháng 5 năm 2025). Khoảng 4.000 thông tin hệ gen cây trồng và chỉ thị phân tử... 'Chọn giống kỹ thuật số K' đã bắt đầu.
<https://www.mt.co.kr/economy/2025/05/16/2025051613191936623>

4.2

Chỉnh sửa gen (CRISPR) và chọn giống chính xác

Trong nhà kính của Khoa Kỹ thuật Di truyền thuộc Viện Khoa học Nông nghiệp Quốc gia, Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc, mỗi chậu cây đều cắm một nhãn nhỏ. Cơ quan thực hiện nghiên cứu lúa chỉnh sửa OsNAC năm 2024 là Viện Khoa học Nông nghiệp Quốc gia, không phải Viện Khoa học Cây lương thực Quốc gia. Khi cắt một lá để đọc gen, có thể tìm thấy cây lúa gần như giống hệt giống ban đầu nhưng có nucleotide tại vị trí định trước đã thay đổi. CRISPR là công cụ xác định một mục tiêu cụ thể để cắt hoặc thay đổi gen theo cách đó.

Gen của thực vật là một trình tự dài gồm bốn ký tự A, T, G, C. RNA dẫn đường chỉ dẫn trình tự đích dài khoảng 20 ký tự, còn Cas9 kiểm tra trình tự PAM ở bên cạnh rồi thực hiện cắt. Chúng ta dễ nghĩ rằng chỉ đúng một vị trí bị cắt, nhưng không phải vậy. Tùy theo vị trí và số lượng điểm khớp cùng trình tự xung quanh, những vị trí khác giống một phần với mục tiêu cũng có thể bị cắt. Hiện tượng này được gọi là tác động ngoài mục tiêu. Đó là lý do cần thiết kế RNA dẫn đường và kiểm chứng toàn hệ gen.

Sau khi bị cắt, tế bào tự nối DNA đứt gãy. Nếu nối lại mà không có khuôn, một vài ký tự có thể bị mất hoặc thêm vào, khiến gen ngừng hoạt động. Cũng có thể sửa chữa chính xác bằng tái tổ hợp tương đồng khi đưa vào đồng thời khuôn DNA mong muốn, nhưng ở thực vật, hiệu suất thấp và độ biến thiên lớn tùy cây trồng và mô. Chỉnh sửa base thay đổi một ký tự cụ thể, còn chỉnh sửa prime nhắm tới phạm vi rộng hơn của các hiệu chỉnh nhỏ. Chỉ giải thích rằng cung cấp bản thiết kế sẽ giúp điền đúng ký tự sẽ che khuất tỷ lệ thành công và các dạng thất bại.

Công cụ chỉnh sửa đi vào tế bào qua *Agrobacterium*, súng bắn gen hoặc phương thức đưa RNP vào tế bào trần. Phương thức RNP kết hợp protein với RNA dẫn đường có ưu điểm là có thể tạo ra thể chỉnh sửa không chèn DNA ngoại lai. Dù vậy, trước khi kiểm chứng phân tử, không thể khẳng định rằng hoàn toàn không còn gen ngoại lai. Cũng phải xem xét các biến dị ngoài dự kiến phát sinh trong quá

trình đưa vật liệu và tái sinh. Vật mang nano là phương pháp đang ở giai đoạn nghiên cứu, được thử nghiệm trên nhiều cây trồng.

Vấn đề là trình tự lúa quá dài. Hệ gen lúa có tới 400 triệu ký tự, và rải rác trong đó là những đoạn trông gần như giống hệt mục tiêu 20 ký tự mà nhà nghiên cứu đã chọn. Nếu RNA dẫn đường bám vào một đoạn tương tự như vậy thay vì mục tiêu thực và cắt nhầm vị trí, một gen ngoài kế hoạch có thể bị hỏng hoặc một tính trạng bất ngờ có thể xuất hiện. Ngay từ đầu, con người không thể dùng mắt rà qua 400 triệu ký tự để tìm hết mọi đoạn tương tự. Vì vậy, trí tuệ nhân tạo đảm nhận công việc này.

Ở lúa mì, tình hình còn phức tạp hơn. Hệ gen lúa mì là thể lục bội, trong đó ba bộ gen có tổ tiên khác nhau chồng lên nhau trong cùng một cơ thể. Gen khiến cây mắc bệnh phấn trắng cũng hiện diện gần như giống hệt trong cả ba bộ gen này, nên chọn giống bằng lai tạo không thể chọn riêng một bộ để bất hoạt. Gen đó có tên là TaMLO, và trong mỗi bộ gen, nó lần lượt được gọi là TaMLO-A1, TaMLO-B1 và TaMLO-D1. Dù sửa một gen, hai bản còn lại vẫn nguyên vẹn và cây vẫn mắc bệnh.

CRISPR có thể đưa cùng một RNA dẫn đường đến từng bộ trong ba bộ gen để làm hỏng cả ba vị trí cùng lúc, còn việc tính toán nhằm tìm chính xác và đồng thời nhắm vào ba vị trí đó là công việc mà trí tuệ nhân tạo thực hiện tốt.

Lịch sử chỉnh sửa gen và cây trồng thương mại phải được phân biệt theo từng công nghệ. Đậu tương giàu axit oleic đầu tiên được thương mại hóa tại Hoa Kỳ là sản phẩm chỉnh sửa gen FAD2 bằng TALEN, không phải cây trồng CRISPR. Khoai tây Innate thương mại có khả năng hạn chế hóa nâu đã làm giảm biểu hiện PPO bằng công nghệ can thiệp RNA. Nghiên cứu dùng CRISPR để thay đổi khả năng kháng bệnh, góc lá hoặc hiệu quả sử dụng dinh dưỡng ở ngô và khoai tây vẫn tiếp diễn, nhưng không được gộp các trường hợp CRISPR trong nghiên cứu với sản phẩm TALEN và RNAi đã được bán trên thị trường thành thành quả của cùng một công nghệ.

Trước hết, trí tuệ nhân tạo rà soát toàn bộ hệ gen và tìm mọi đoạn dù chỉ hơi giống mục tiêu. Sau đó, mô hình học sâu chấm điểm xác suất chiếc kéo thực sự bám vào và cắt tại từng vị trí ứng viên. Điểm số này không xuất phát từ phỏng đoán mà từ dữ liệu đo thực tế. Nguyên nhân là mô hình học từ hàng chục nghìn kết quả thí nghiệm, trong đó kéo được đưa vào tế bào sống và những vị trí thực sự bị cắt được phát hiện bằng dấu huỳnh quang.

Theo bài báo của Abbaszadeh và Shalai công bố trên kho lưu trữ arXiv năm 2025, các mô hình gần đây sử dụng mạng nơ-ron tích chập, mạng nơ-ron hồi quy và kiến trúc transformer xác định trình tự nào dễ bị cắt chính xác hơn nhiều so với các công thức thống kê trước đây. Những mô hình này không chỉ đưa ra điểm số mà còn chỉ ra tổ hợp ký tự nào trong trình tự làm tăng nguy cơ. Điều này có nghĩa là nhà nghiên cứu có thể tự mình kiểm tra và hiểu được nguyên nhân.

Cũng có thể thay đổi chính chiếc kéo. Nếu dùng enzyme biến đổi có tính đặc hiệu mục tiêu cao hơn kéo tiêu chuẩn, ngay từ đầu nó sẽ ít bám vào các đoạn không mong muốn hơn. Nhà nghiên cứu đặt bảng điểm này cùng enzyme mới cạnh nhau, đưa tổ hợp có nguy cơ thấp nhất lên bàn thí nghiệm và tiến hành thêm một lần kiểm chứng sau khi hoàn tất chỉnh sửa. Toàn bộ gen của cây được đọc lại và đối chiếu từng ký tự với hệ gen ban đầu; trí tuệ nhân tạo tìm cả những mẫu mà mắt người khó nhận ra trong bảng đối chiếu để kiểm tra xem có biến dị ngoài mục tiêu hay không.

Việc kiểm chứng bằng tái giải trình tự toàn hệ gen này tốn chi phí đáng kể ngay cả khi chỉ kiểm tra một dòng. Các công ty chọn giống quy mô nhỏ hoặc viện nghiên cứu ở các nước đang phát triển có ngân sách eo hẹp dễ bị cám dỗ bỏ qua bước kiểm chứng này, và trên thực tế, một số nơi chuyển sang giai đoạn tiếp theo mà không thực hiện lần xác nhận cuối cùng trước khi đưa cây ra đồng ruộng. Gần đây còn xuất hiện các thí nghiệm trong đó mô hình trí tuệ nhân tạo đã học cấu trúc ba chiều của protein thiết kế chính một loại protein kéo mới không tồn tại trong tự nhiên.

Công nghệ này chưa đạt đến mức có thể đưa ra đồng ruộng, nhưng vai trò của trí tuệ nhân tạo đang chuyển từ chọn kéo sang tạo ra kéo.

Ngay cả khi đã hoàn tất chỉnh sửa và kiểm chứng tác động ngoài mục tiêu, cây vẫn chưa thể được đưa thẳng ra đồng ruộng. Phải xem tính trạng có truyền cho thế hệ sau hay không, đồng thời trải qua thử nghiệm thích nghi khu vực và đăng ký giống. Nhà kính chọn giống nhanh điều chỉnh ánh sáng, nhiệt độ và độ ẩm để rút ngắn thế hệ ở những cây trồng như lúa mì và đại mạch. Phản ứng của lúa và ngô thay đổi tùy theo giống và quang chu kỳ. Thời gian cần để nhanh chóng cố định một dòng khác với thời gian hoàn thiện một giống có thể bán cho nông dân.

Năm 2024, Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc cho biết đã chọn khoảng 2.600 gen liên quan đến cơ chế phòng vệ của lúa làm mục tiêu và bước đầu tạo ra 146 thể chỉnh sửa thuộc nhóm NAC. Ở lúa chỉnh sửa OsNAC30, vết bệnh bạc lá

giảm 51,9 phần trăm; ở lúa chỉnh sửa OsNAC59, tỷ lệ chết do bệnh bakanae giảm 24,5 phần trăm. Nhóm nghiên cứu đã trực tiếp gây nhiễm cho quần thể chỉnh sửa để tìm ra hai gen phòng vệ này.

Các cánh cửa mà cây trồng chỉnh sửa gen phải đi qua khác nhau theo từng quốc gia. Tại Hoa Kỳ, quy định SECURE năm 2020 bị vô hiệu hóa bởi phán quyết của tòa án vào tháng 12 năm 2024, và APHIS đã khôi phục quy trình cấp phép, thông báo, kiến nghị trước đây cùng thủ tục 'Am I Regulated'. Mô tả rằng nếu không có DNA ngoại lai thì chỉ cần một tờ giấy là có thể tiến hành thử nghiệm đồng ruộng không phải là quy tắc chung hiện hành vào năm 2026. Regulation (EU) 2026/1388 của Liên minh châu Âu sẽ được áp dụng đầy đủ từ ngày 17 tháng 7 năm 2028.

Tiêu chí NGT1 không phải là có tối đa 20 điểm khác với hệ gen gốc, mà xem xét đồng thời độ dài của đoạn chèn hoặc thay thế, số lần thay đổi theo từng trình tự mã hóa và tổng số thay đổi trong hệ gen đơn bội. Tính trạng kháng thuốc diệt cỏ và tạo ra chất diệt côn trùng đã biết không thuộc NGT1.

Bằng sáng chế cũng là một trở ngại. Các chủ sở hữu quyền chính đối với bằng sáng chế Cas9 nền tảng là nhóm UC Berkeley-Vienna và nhóm Broad-MIT; các doanh nghiệp, trong đó có Corteva, đã được cấp phép một số quyền. Các công ty chọn giống nhỏ và viện nghiên cứu công lập phải bỏ thời gian và tiền bạc để xác định cần bằng sáng chế nào rồi ký hợp đồng sử dụng. Có lúc việc giành được quyền sử dụng công nghệ một cách hợp pháp còn mất nhiều thời gian hơn việc học công nghệ đó.

Ở đâu đó giữa hai cơ chế quản lý, Nhật Bản đã phê duyệt cà chua chỉnh sửa có hàm lượng axit gamma-aminobutyric được cho là giúp hạ huyết áp như một sinh vật không biến đổi gen và đang bán sản phẩm trên thực tế. Nhưng được bán không có nghĩa là ai cũng mua ăn. Theo khảo sát do các học giả Philippines công bố năm 2025, ở những người tiêu dùng tin rằng sản phẩm an toàn, câu trả lời sẵn sàng mua loại chuối chỉnh sửa này tăng 267 phần trăm tại Trung Quốc và 171 phần trăm tại Nhật Bản. Ngược lại, tâm lý e ngại bản thân thực phẩm lạ làm giảm ý định mua ở cả ba quốc gia.

Kết luận cũng tương tự khi ba trường đại học Hoa Kỳ hỏi 1.638 người về bột mì có hàm lượng acrylamide thấp. Mọi người chấp nhận việc sử dụng CRISPR trên cây trồng thoải mái hơn nhiều so với sử dụng trên động vật hoặc con người. Tuy nhiên, vẫn còn nỗi lo rằng tác dụng phụ có thể xuất hiện về sau, cũng như nỗi lo

một số ít công ty hạt giống lớn đang nắm bằng sáng chế công nghệ này khiến nông hộ nhỏ và nhà nghiên cứu ở các nước nghèo khó tiếp cận.

Ngay cả tính trạng đã vượt qua mọi quy trình này vẫn còn một cửa ải cuối cùng. Không hiếm trường hợp cây lúa sinh trưởng hoàn hảo trong nhà kính nhưng lại kém sức trên đồng ruộng thực tế. Trong nhà kính, con người điều chỉnh nhiệt độ, nước và ánh sáng, còn ruộng lúa là nơi mưa mùa, bão và sâu bệnh ập đến cùng lúc. Bài báo của nhà nghiên cứu Iran Rahimi công bố năm 2026 chỉ ra lý do thành công trong phòng thí nghiệm không thể nối dài đến đồng ruộng. Các mô hình trí tuệ nhân tạo chọn mục tiêu thường chỉ được học trong điều kiện bình thường nên chưa từng trải nghiệm trước các điều kiện stress như hạn hán hoặc nắng nóng cực đoan.

Ngay cả khi việc chỉnh sửa thành công, cũng thường có trường hợp người ta bỏ qua mà chưa xem xét gen đó tương tác với các gen khác trong tế bào như thế nào. Hơn nữa, có những nghiên cứu được công bố sau khi chỉ trồng thử ở một hoặc hai nơi, chưa tiến hành thử nghiệm lặp lại trong nhiều năm tại ruộng ở nhiều khu vực.

Bài báo trên Cell năm 2025 đã đưa một yếu tố phản ứng nhiệt dài 10 base vào promoter CWIN của lúa. Trong điều kiện nhiệt độ cao, năng suất ô thí nghiệm của lúa chỉnh sửa cao hơn giống Zhonghua 11 25 phần trăm, và mức tổn thất năng suất do nhiệt độ cao được phục hồi tối đa 41 phần trăm. Kết quả đưa vào một trình tự ngắn rất rõ ràng, nhưng vẫn còn phải tiến hành thử nghiệm thích nghi dài hạn lặp lại trong vài năm tại nhiều khu vực. Cần thêm nhiều mùa nữa mới biết cây lúa đạt thành tích trong nhà kính và thử nghiệm ô có đạt được kết quả tương tự trên ruộng của nông dân hay không.

Vì vậy, trước khi công bố thành công trong nhà kính, các công ty chọn giống và viện nghiên cứu quốc gia ngày càng kéo dài quy trình chia cây ra trồng ở nhiều cánh đồng rồi theo dõi trong vài năm. CRISPR có thể cắt chính xác một ký tự, nhưng phải qua nhiều năm thử nghiệm đồng ruộng mới xác nhận được ký tự đó có tạo thành một giống lúa hữu dụng hay không. Sau cơn bão tiếp theo, chưa ai có thể bảo đảm cây lúa trong chậu cấy nhân kia sẽ đứng vững hơn giống bản địa ở ruộng bên cạnh bao nhiêu.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Nasir, S., Khan, L., Murtaza, A., Raza, A., Nasir, F., & Azam, U. (2026). Bridging traditional plant breeding with precision agriculture: A path to smarter crop improvement. In *Explicable Agriculture: Microbial Ecology, Bio-Innovations and Crop Production* (pp. 194-201). Unique Scientific Publishers.
<https://doi.org/10.47278/book.tl/2026.383>
2. U.S. Department of Agriculture, APHIS. (2025). Vacatur of 2020 Biotechnology Regulations.
<https://www.aphis.usda.gov/vacatur-2020-regulations>
3. European Union. (2026). Regulation (EU) 2026/1388 on Plants Obtained by Certain New Genomic Techniques.
https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202601388
4. Fu, B. X. H., et al. (2022). Target-dependent Nickase Activities of the CRISPR-Cas Nucleases Cpf1 and Cas9. *Nature*.
<https://www.nature.com/articles/s41586-022-04470-1>
5. Lou, H., Li, S., Shi, Z., et al. (2025). Engineering source-sink relations by prime editing confers heat-stress resilience in tomato and rice. *Cell*, 188(2), 530-549.e20.
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2024.11.005>
6. U.S. Food and Drug Administration. Genome Editing in Agricultural Biotechnology.
<https://www.fda.gov/food/agricultural-biotechnology/genome-editing-agricultural-biotechnology>
7. Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc. (2024). Phát hiện các gen lúa có khả năng kháng cao đối với bệnh bạc lá và bệnh bakanae.
https://www.rda.go.kr/board/board.do?dataNo=100000798693&mode=view&prgId=day_farmprmninfoEntry
8. ISAAA. (2025, July 30). Survey shows consumer acceptance of gene-edited bananas in the Philippines, Japan, and China. *Crop Biotech Update*.
<https://www.isaaa.org/kc/cropbiotechupdate/ged/article/default.asp?ID=21404>
9. ISAAA. (2025, February 26). Study reveals consumer acceptance of gene-edited food. *Crop Biotech Update*.
<https://www.isaaa.org/kc/cropbiotechupdate/article/default.asp?ID=21220>
10. ISAAA. (2021, September 22). Japan starts sale of genome-edited high-GABA tomato. *Crop Biotech Update*.
<https://www.isaaa.org/kc/cropbiotechupdate/article/default.asp?ID=19024>
11. Newsis. (ngày 2 tháng 10 năm 2024). Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc phát hiện các gen lúa có khả năng kháng cao đối với bệnh bạc lá và bệnh bakanae. *Newsis*.
https://www.newsis.com/view/NISX20241002_0002907293
12. Sangwa, S., & Mutabazi, P. (2025). Artificial intelligence in agriculture: Ethical stewardship, responsible innovation, and governance for sustainable food systems. *Intelligent Agriculture*, 1(2), 25-45.
<https://doi.org/10.54963/ia.v1i2.1684>

4.3

Phát triển giống chống chịu để ứng phó với biến đổi khí hậu

Mưa mùa trút xuống suốt ba ngày trên một cánh đồng trũng không xa Vịnh Bengal. Những cây lúa non mới cấy chưa đầy một tháng chìm dưới làn nước dâng đến ngang lưng. Những thân lúa ba ngày trước còn xanh tốt nay không còn nhìn thấy. Thế nhưng trên cánh đồng này cũng có loại lúa sẽ ngóc đầu trở lại khi nước rút, loại lúa đã được chỉnh sửa gen để chịu được mười ngày ngập nước.

Nhóm nghiên cứu lúa quốc tế đã khảo sát 6.274 dòng nguồn gen chịu ngập, chọn ra 89 dòng ưu tú và 37 dòng có sức chịu đựng cao. Nghiên cứu này kết hợp chọn lọc ngoài thực địa, thử nghiệm ngập khoảng ba tuần, phân tích QTL và chọn lọc hệ gen. Trình tự một chiều trong đó trước hết dùng học máy để thu hẹp ứng viên rồi thử nghiệm trong bể nước từ 10 đến 21 ngày khác với bài báo gốc. Cần giữ nguyên kết quả rằng 37 dòng có sức chịu đựng cao đạt tỷ lệ sống cao hơn từ 40 đến 50 phần trăm so với các dòng du nhập SUB1A, nhưng phải mô tả đúng quy trình chọn lọc.

Dù ở Hoàng Hải hay Vịnh Bengal, ruộng gần nước biển có một nỗi lo khác. Lúa không thể sinh trưởng không phải vì nước tràn vào mà vì chính đất bị mặn. Ở đất khai hoang hoặc vùng châu thổ nơi mực nước biển dâng, lớp muối trắng phủ trên mặt ruộng khô như sương giá. Rễ hút nước mặn lên nhưng không lọc được những chất dinh dưỡng thực sự cần thiết, khiến lá cháy dần từ đầu lá. Tính chịu mặn cũng không thể được giải quyết bằng một gen duy nhất, giống như tính chịu ngập. Khả năng chọn lọc ion, chịu áp suất của tế bào rễ và tiết kiệm nước được phân chia cho hàng chục gen khác nhau; chỉ khi các gen đó hoạt động cùng nhau, lúa mới kết hạt trên đất mặn.

Phương pháp chọn giống truyền thống phải chọn các tính trạng này bằng mắt. Người ta trồng hàng nghìn dòng trên ruộng mặn, chờ vài năm rồi chỉ trồng lại những dòng sống sót. Trong suốt thời gian đó, mọi việc dẫn nước, đo độ mặn và chấm mức độ cháy lá theo thang đều do bàn tay con người thực hiện. Đó là lý do phải mất từ tám đến mười hai năm để một giống được đưa ra thị trường.

Ý tưởng tạo ra giống lúa chịu đất mặn không mới. Năm 2007, nhà nông học Trung Quốc Zhang Qifa đã công bố trên tạp chí quốc tế PNAS ý tưởng tập hợp vào một giống các gen kháng hạn và sử dụng nitơ hiệu quả vốn phân tán ở họ hàng hoang dại của lúa. Giống này được gọi là Green Super Rice. Vào thời điểm đó, ngay cả việc theo dõi một gen bằng chỉ thị để lai tạo cũng mất nhiều năm. Ngày nay, chọn giống dự đoán đã tiếp nối ý tưởng ấy. Máy tính trước hết sàng lọc bằng tính toán hàng chục tổ hợp gen chống chịu vốn nằm trong ngân hàng gen lúa hoang, rồi chỉ những tổ hợp có triển vọng cao mới được kiểm chứng trên ruộng thực tế.

Nếu gặp nắng nóng cực đoan vào thời kỳ ra hoa và vào chắc hạt, quá trình hình thành phấn hoa và hạt của lúa mì sẽ bị xáo trộn. Ước tính tổng hợp từ các nghiên cứu trên toàn thế giới cho thấy khi nhiệt độ trung bình trong mùa sinh trưởng tăng 1 độ, năng suất lúa mì giảm trung bình khoảng 6 phần trăm. Mức 21 phần trăm là giá trị cận trên được báo cáo trong một số điều kiện và nghiên cứu cụ thể, nên không được đặt cạnh con số trên như phản ứng của mọi ruộng lúa mì. Thời kỳ dễ tổn thương của lúa mì vụ đông và lúa mì vụ xuân cũng khác nhau tùy khu vực và giống.

Trong chọn giống, các nhà nghiên cứu xem xét đồng thời chỉ thị di truyền và hồ sơ nhiệt độ thời kỳ ra hoa để sàng lọc những dòng chịu nhiệt độ cao.

Lúa có thể bị bất thụ và suy giảm chất lượng do nhiệt độ cao trong khoảng thời gian nở hoa ngắn. Các nhà nghiên cứu thuộc Tổ chức Nghiên cứu Nông nghiệp Nhật Bản đã sử dụng lưới khí tượng khoảng 1 kilômét và mô hình nhiệt độ bông lúa để so sánh các tổ hợp giữa nở hoa sớm, chịu nhiệt và điều chỉnh thời gian trở bông. Họ tính toán kịch bản đẩy thời điểm nở hoa sớm hơn 3 giờ hoặc tăng khả năng chịu nhiệt thêm 3 độ sẽ thay đổi nguy cơ bất thụ theo từng khu vực như thế nào. Nghiên cứu này được đăng năm 2026 trên Field Crops Research, tập 344, bài số 110519.

Không chỉ lúa mì và lúa bị ảnh hưởng trước nắng nóng cực đoan và hạn hán. Nếu thiếu nước đi lên theo mạch gỗ ở đầu rễ, đậu tương cũng sẽ chín khi quả chưa đầy hạt. Do đậu tương nhận nitơ qua quan hệ cộng sinh với vi khuẩn nốt sần, khi đất quanh rễ khô đi, chính quan hệ cộng sinh này bị đứt trước tiên. Lá không nhận đủ nitơ trở nên nhạt màu và hạt đậu teo lại. Các nhà nghiên cứu chọn giống dự đoán rà soát toàn bộ hệ gen đậu tương để tìm tổ hợp gen duy trì quan hệ cộng sinh ở nốt sần và quá trình tổng hợp protein ngay cả trong hạn hán, rồi chỉ chọn các dòng mang tổ hợp đó để trồng trên ruộng thử nghiệm hạn.

Phương pháp dùng cho lúa và lúa mì được chuyển nguyên sang ruộng đậu tương.

Lúa chịu ngập, lúa chịu mặn và lúa mì chịu nắng nóng cực đoan đều có một bài toán chung. Phải mất quá nhiều thời gian để tìm ra tổ hợp gen nào sẽ chịu được khí hậu tương lai. Với phương pháp chọn giống truyền thống, người ta không còn cách nào khác ngoài trồng con lai trên đồng ruộng thực tế, tạo hạn, ngâm nước hoặc rắc muối rồi theo dõi trong nhiều năm. Trí tuệ nhân tạo đã chuyển phần lớn thời gian chờ đợi này vào máy tính. Phương pháp đó có tên là chọn giống dự đoán (Predictive Breeding). Nó cũng được gọi là chọn lọc hệ gen vì đọc trước hệ gen để tính toán kết quả.

DNA được chiết xuất từ lá cây con để đọc đồng thời hàng chục nghìn chỉ thị di truyền. Những chỉ thị này cho biết cá thể đó mang gen nào. Không cần nuôi cây con đến khi trưởng thành, việc đọc chỉ thị cũng cho phép dự đoán cây đó khi lớn lên sẽ chịu hạn và nóng tốt đến mức nào. Phép tính sử dụng đồng thời nhiều phương pháp, như tập hợp nhiều cây quyết định để đưa ra đáp án theo đa số hoặc mạng nơ-ron nhân tạo mô phỏng tế bào thần kinh trong não người.

Do cách chỉ thị và dữ liệu môi trường tương tác với nhau khác nhau theo từng khu vực, các nhà chọn giống chồng nhiều phương pháp tính toán lên nhau rồi chọn phương pháp phù hợp nhất với kết quả thực tế. Hồ sơ của một năm tại một địa điểm là chưa đủ. Càng tích lũy nhiều hồ sơ qua những năm hạn nặng và năm bình thường, trên đất cát và đất sét, phép tính càng gần với thực tế. Nếu đưa thêm hồ sơ thời tiết và đất đai tích lũy trong nhiều năm ở nhiều khu vực, có thể chọn ra chỉ vài trăm tổ hợp đáng để trồng thử trên đồng ruộng từ hàng chục nghìn tổ hợp lai.

Dữ liệu máy tính dùng để tính toán không chỉ có chỉ thị di truyền. Máy bay không người lái bay trên ruộng thử nghiệm để chụp màu lá và nhiệt độ bề mặt lá. Nhiệt độ lá của cây lúa thiếu nước cao hơn một chút so với cây khỏe mạnh; mắt người không nhìn thấy nhưng camera nhiệt ghi nhận rất rõ. Khi ảnh và con số tích lũy mỗi ngày được đặt cạnh chỉ thị di truyền, máy tính đồng thời học được tổ hợp gen nào biểu hiện ra sao trên đồng ruộng thực tế.

Từ năm 2007 đến năm 2012, dự án DTMA của Trung tâm Cải tiến Ngô và Lúa mì Quốc tế đã phổ biến 60 giống lai chịu hạn và 57 giống thụ phấn tự do. Dự án hướng tới tối đa 40 triệu người tại 13 quốc gia châu Phi, không phải 40 triệu nông hộ. Mục tiêu là đạt lợi thế năng suất khoảng 1 tấn mỗi hecta hoặc từ 20 đến 30 phần trăm trong điều kiện hạn vừa phải. Không có dữ liệu để liên hệ thành quả này

với bằng chứng rằng dự đoán bằng trí tuệ nhân tạo đã rút ngắn thời gian chọn giống từ mười năm xuống còn ba hoặc bốn năm.

Chọn giống nhanh điều chỉnh độ dài ngày và nhiệt độ bằng ánh sáng nhân tạo để đẩy nhanh thế hệ. Kết quả đạt sáu thế hệ mỗi năm trong điều kiện ngày dài 22 giờ đã được báo cáo ở các cây trồng như lúa mì vụ xuân và đại mạch. Nhiều giống ngô phản ứng với ngày ngắn dần nên không thể áp dụng nguyên vẹn cùng một chế độ. Ngay cả khi gia tốc thế hệ giúp nhanh chóng cố định dòng, thử nghiệm canh tác ở nhiều khu vực và đăng ký giống vẫn cần khoảng thời gian riêng.

Phương pháp chọn giống được đẩy nhanh như vậy vẫn có giới hạn. Dữ liệu máy tính đã học là các điều kiện thời tiết và đất đai thực sự xảy ra trong vài năm qua. Nhưng biến đổi khí hậu tạo ra nắng nóng cực đoan hoặc hạn hán mà chưa ai từng trải qua. Trước thời tiết cực đoan không có trong dữ liệu huấn luyện, điểm dự đoán do trí tuệ nhân tạo đưa ra cũng dao động. Nếu trí tuệ nhân tạo đánh giá sức chống chịu cao hơn thực tế trước một đợt nắng nóng cực đoan chưa từng có, nông dân có thể tin vào đánh giá đó, gieo trồng rồi mất mùa trong năm ấy.

Vì vậy, ngay cả ứng viên do máy tính chọn vẫn phải được trồng ngoài đồng để kiểm tra khả năng chịu đựng thực tế. Vai trò của trí tuệ nhân tạo là giảm số ứng viên cần trồng thử từ hàng chục nghìn xuống vài trăm.

Tính toán bằng máy tính cũng có ngưỡng tiếp cận riêng. Muốn xử lý cùng lúc hàng chục nghìn chỉ thị di truyền và dữ liệu thời tiết, đất đai trong nhiều năm, cần có máy tính hiệu năng cao và nhân lực chuyên môn biết diễn giải kết quả. Những viện nghiên cứu được tổ chức quốc tế hỗ trợ như CIMMYT hoặc IRRI có thiết bị và nhân lực này, nhưng các cơ quan chọn giống quốc gia ở những nước có ngân sách eo hẹp lại ở tình thế khác. Nếu không thể thực hiện phép tính, họ không thể tự xây dựng mô hình dự đoán phù hợp với đất đai và khí hậu của quốc gia mình, nên thường phải mượn mô hình do nước khác tạo ra.

Mô hình đi mượn chưa từng học về đồng ruộng của nước đó, vì vậy vẫn mang nguyên vấn đề dự đoán dao động trước những điều kiện không có trong dữ liệu huấn luyện. Có nguy cơ xuất hiện một khoảng cách mới giữa các quốc gia có năng lực tính toán và các quốc gia không có năng lực đó.

Con đường từ tủ lạnh của trạm thử nghiệm đến tay nông dân của một giống mới rất dài. Tỷ lệ hạt giống phi chính thức mà tiểu nông châu Phi sử dụng khác nhau theo từng quốc gia và cây trồng. Dữ liệu của Uganda ước tính các kênh phi chính

thức, gồm hàng xóm, thị trường và tự để giống, chiếm khoảng từ 85 đến 89 phần trăm. Không thể cố định con số này thành hơn 90 phần trăm tiểu nông trên toàn châu Phi. Cần xem xét theo từng khu vực các trường hợp không thể trồng vì không có hạt giống, không chọn vì giống còn xa lạ và không thể mua vì giá cao.

Mức độ tập trung của thị trường hạt giống Hoa Kỳ khác nhau theo cây trồng. Theo ước tính của USDA, hai công ty đứng đầu chiếm khoảng 71,6 phần trăm thị trường ngô và khoảng 65,9 phần trăm thị trường đậu tương. Bốn công ty đứng đầu chiếm khoảng 94 phần trăm thị trường bông. Từ năm 1990 đến năm 2020, trong khi chỉ số giá hạt giống chủ yếu là giống GM tăng 463 phần trăm, chỉ số giá cây trồng tăng 56 phần trăm. Tốc độ tăng giá hạt giống nhanh hơn rất nhiều so với tốc độ tăng giá mà nông dân bán ngũ cốc.

Nghiên cứu của các nhà kinh tế nông nghiệp từ nhiều quốc gia châu Phi đăng trên tạp chí quốc tế Journal of Agricultural Economics năm 2026 cho thấy một cách hạ thấp rào cản này. Khi giống mới được chia thành những gói nhỏ bằng lòng bàn tay thay vì bao lớn để phân phát, cả mức độ hiểu biết về giống và tỷ lệ mua vào năm sau đều tăng ở những nông hộ đã nhận hạt giống. Liên đoàn Hạt giống Quốc tế cũng nêu một điểm tương tự trong bài viết công bố năm 2026. Cho nông dân quan sát từ bên cạnh cánh đồng mà một bậc cao niên trong làng đã trồng thử trước, hoặc để cán bộ khuyến nông đến từng nhà trao tận tay túi hạt giống, tốt hơn một tờ quảng cáo.

Dù tính trạng ưu việt đến đâu, giống cũng không thể phổ biến nếu nông dân chưa tin và trồng thử một lần.

Trở lại cánh đồng trũng ở Vịnh Bengal. Sau khi nước rút, việc cây lúa mang gen Sub1 có thực sự ngóc đầu trở lại hay không chỉ có thể được xác nhận ở chính cánh đồng đó, với chính nông hộ đó và khi mùa mưa tiếp theo đến. Nước vẫn cần vài ngày mới rút, và trong thời gian ấy, người ngồi xổm trên bờ ruộng quan sát màu nước là nông dân, không phải máy tính.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Prasanna, B. M. (2026). Predictive Breeding: Bridging Genetics, Artificial Intelligence and Agriculture [Video]. SHARE GENES.
<https://www.youtube.com/watch?v=FWcxeEC90JA>
2. Anumalla, M., Khanna, A., Catolos, M., Ramos, J., Sta Cruz, M. T., Venkateshwarlu, C., Konijerla, J., Pradhan, S. K., Dash, S. K., Das, Y., Chowdhury, D., Chetia, S. K., Das, J., Nath, P., Merugumala, G. R., Roy, B., Pradhan, N., Jana, M., Dana, I., ... Hussain, W. (2025). Future flooding tolerant rice germplasm: Resilience afforded beyond

Sub1A gene. *The Plant Genome*, 18(2), e70040.

<https://doi.org/10.1002/tpg2.70040>

3. Zheng, Y., Cai, Z., Wang, Z., Maruza, T. M., & Zhang, G. (2025). The genetics and breeding of heat stress tolerance in wheat: Advances and prospects. *Plants*, 14(2), 148.

<https://doi.org/10.3390/plants14020148>

4. CIMMYT. (2026). Drought Tolerant Maize for Africa (DTMA). International Maize and Wheat Improvement Center.

<https://www.cimmyt.org/projects/drought-tolerant-maize-for-africa-dtma/>

5. BusinessWorld Online. (2024, March 27). Rice variety resistant to heat, drought to be launched in 2026, IRRI says.

<https://www.bworldonline.com/economy/2024/03/27/584553/rice-variety-resistant-to-heat-drought-to-be-launched-in-2026-irri-says/>

6. Mulungu, K., Subakanya, M., Setimela, P., Essegbemon, A., Chivasa, W., Gethi, J., Chiduwa, M., Sigalla, J., Mvungi, H. H., & Ngoma, H. (2026). Small seed packs, big potential? Effect of seed packs on knowledge and adoption of improved crop varieties. *Journal of Agricultural Economics*.

<https://doi.org/10.1111/1477-9552.70040>

7. International Seed Federation. (2026). Inclusive seed systems: Building trust with farmers. World Seed 2026.

<https://worldseed.org/2026/06/03/inclusive-seed-systems-farmers-world-seed-2026/>

8. Catholic Relief Services. (2026). Seed systems smallholder farmers use.

https://www.crs.org/sites/default/files/documents/2025-12/seed_systems_farmers_use_embargoed_until_jan_20.pdf

9. Zhang, Q. (2007). Strategies for developing Green Super Rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(42), 16402-16409.

<https://doi.org/10.1073/pnas.0708013104>

10. Toda, Y., et al. (2026). Simulation of Heat-Induced Spikelet Sterility in Rice and Evaluation of Adaptation Options Under Historical and Projected Meteorological Conditions in Japan. *Field Crops Research*, 344, 110519.

<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2026.110519>

11. Dawson, J., Hubbard, K., & Jenney, P. (2026, June 23). How everyone pays the cost for patents on seeds, and private companies get rich from keeping them secret. *The Conversation*.

<https://theconversation.com/how-everyone-pays-the-cost-for-patents-on-seeds-and-private-companies-get-rich-from-keeping-them-secret-284144>

Chương 5

Ra quyết định bằng AI và tự động hóa

5.1

Mô hình ngôn ngữ lớn đa phương thức chuyên biệt cho nông nghiệp (Agri-LLM)

Vào một buổi chiều khi mặt trời bắt đầu ngả bóng, một đốm vàng đang lan trên lá lúa. Đến hôm qua, chiếc lá vẫn còn nguyên vẹn. Người nông dân lấy điện thoại ra, chụp đốm bệnh, tải lên cửa sổ tư vấn rồi nhìn vào màn hình và hỏi bằng giọng pha thổ ngữ: “Cái ni vì rãng mà ra ri, có phải phun thuốc không?” Nếu câu trả lời sai, hậu quả không dừng ở một chiếc lá mà có thể ảnh hưởng đến cả vụ mùa trong năm. Công nghệ được tạo ra để trả lời chính xác câu hỏi này là mô hình ngôn ngữ lớn đa phương thức chuyên biệt cho nông nghiệp, gọi tắt là Agri-LLM.

Ngay cả khi tải cùng bức ảnh lên một ứng dụng trò chuyện AI thông thường cài trên điện thoại, người dùng vẫn nhận được câu trả lời. Vấn đề là câu trả lời ấy thường sai. AI thông thường được huấn luyện bằng cách ghi nhớ toàn bộ văn bản do con người viết rồi nối tiếp những câu nghe có vẻ hợp lý. Ranh giới để xác định đốm trên lá lúa là bệnh đạo ôn hay bệnh bạc lá chỉ chênh nhau vài milimét ngay cả khi quan sát bằng mắt. Mô hình thông thường không phân biệt được khác biệt rất nhỏ ấy. Thực sự biết đáp án và viết ra một câu nghe giống đáp án là hai việc hoàn toàn khác nhau, nhưng mô hình thông thường chỉ giỏi việc thứ hai.

Khi không biết tên sâu bệnh hoặc cách xử lý, nó sẽ tự bịa ra. Nó giới thiệu một loại thuốc bảo vệ thực vật không tồn tại như thể đó là thuốc thật và tự tin đưa ra lời khuyên không phù hợp với khí hậu hoặc quy định của địa phương. Ngành AI gọi hiện tượng này là ảo giác. Trong nông nghiệp, không thể xem ảo giác là chuyện cười rồi bỏ qua. Phun sai thuốc với sai nồng độ có thể làm khô chết cả cánh đồng.

Agri-LLM là mô hình được thiết kế khác ngay từ đầu nhằm giảm ảo giác này. Các văn bản chuyên môn nông nghiệp như bài báo bệnh học, sách minh họa sâu hại và hồ sơ tư vấn cho nông hộ được thu thập riêng để huấn luyện lại mô hình. Mô hình còn được bổ sung một hệ thống nhận dạng thị giác chính xác, có khả năng trích xuất theo nhiều lớp cả những vết bệnh rất nhỏ và đường nét củaấu trùng sâu hại bé xíu trong ảnh. Nó đọc đồng thời dữ liệu từ cảm biến đo độ ẩm, hàm lượng nitơ, photpho và kali trong đất, cùng tín hiệu dự báo thời tiết. Vì mô hình đánh giá

đồng thời văn bản, hình ảnh và số liệu cảm biến nên được gọi là mô hình đa phương thức.

Hoa văn của đốm bệnh trích xuất từ ảnh không được liên kết ngay với tên bệnh. Vì vậy, mô hình gọi thêm bảng tri thức đã sắp xếp trước tên bệnh và triệu chứng điển hình, rồi đối chiếu từng mục với hoa văn trong ảnh. Chỉ qua quy trình ghép những gì nhìn thấy với kiến thức đã biết, đốm bệnh mới được chuyển thành tên bệnh.

Ngay khi người nông dân chụp ảnh, điện thoại cũng thu thập thêm thông tin khác. Vị trí thửa ruộng xác định bằng vệ tinh, số liệu đất vừa được cảm biến gần đó gửi tới và dự báo thời tiết trước một ngày được tập hợp lại. Hệ thống chỉ bắt đầu đánh giá khi có đủ ảnh, lời nói và số liệu. Nếu thiếu một giá trị, việc đánh giá sẽ tạm hoãn hoặc hệ thống chỉ đưa ra câu trả lời sơ bộ và nêu rõ mục còn thiếu.

Trước khi tạo câu trả lời, Agri-LLM tìm kiếm tài liệu thực tế. Cách làm này được gọi là sinh tăng cường truy xuất (RAG). Có thể hình dung như một thủ thư. Khi nhận được câu hỏi, thủ thư không chỉ dựa vào trí nhớ để trả lời. Người đó đi đến giá sách, lấy cuốn sách thật ra rồi chỉ rõ nội dung nằm ở trang nào, dòng thứ mấy. Agri-LLM cũng tìm trước trong cơ sở dữ liệu lưu các tài liệu hướng dẫn của Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc, giáo trình bệnh học thực vật và hướng dẫn phòng trừ tiêu chuẩn. Chỉ sau khi tìm được tài liệu liên quan, nó mới dựa trên nội dung ấy để tạo câu trả lời và hiển thị trên màn hình một nút dẫn đến tài liệu nguồn.

Khi nhấn nút đó, người nông dân có thể kiểm tra nguyên văn tài liệu thực tế, thay vì chỉ đọc lời của AI.

Hiệu năng của mô hình đa phương thức nông nghiệp được thể hiện qua dữ liệu thử nghiệm công khai và đánh giá độc lập. Điểm nhận diện lá bệnh, điểm phân biệt sâu hại và chất lượng tư vấn phòng trừ là những phép thử khác nhau. Khi bối cảnh hình ảnh, giống cây trồng hoặc tiêu chí của người đánh giá thay đổi, kết quả cũng thay đổi. Việc một con số được ghi đến phần thập phân không có nghĩa là nó đã được kiểm chứng ngoài đồng ruộng. Trước khi đưa tên thuốc cho người nông dân, cần công khai cả dữ liệu, mô hình so sánh và các trường hợp thất bại.

Nêu những cái tên thường gặp trong canh tác lúa sẽ giúp hình dung rõ hơn. Danh sách Agri-LLM có thể phân biệt bao gồm đúng những loại sâu bệnh mà các nông hộ trồng cây lương thực thực sự gặp phải, từ bệnh đạo ôn và bệnh than giả ở lúa, bệnh mốc hồng trên lúa mì, bệnh cháy lá phương Bắc ở ngô đến ấu trùng ruồi đục thân. Các nghiên cứu nhằm kiểm chứng năng lực của loại mô hình này cũng đang

tiếp nối. Bộ tiêu chuẩn AgMMU do các nhà nghiên cứu Mỹ công bố năm 2025 đưa đồng thời ảnh cây trồng và câu hỏi cho nhiều mô hình AI, rồi so sánh độ chính xác của câu trả lời.

Điều đó cho thấy lĩnh vực này đã bước vào giai đoạn nhiều phòng thí nghiệm kiểm chứng lẫn nhau theo cùng một thước đo, thay vì dựa vào tài liệu quảng bá của một công ty. Con số 141 nhóm phân loại tự nó không phải tiêu chuẩn tuyệt đối. Tuy nhiên, nó có ý nghĩa ở chỗ bao quát rộng các loại sâu bệnh tái diễn ngoài thực địa, thay vì chỉ gồm một vài trường hợp trong phòng thí nghiệm.

AgriSmart do các nhà nghiên cứu Pakistan phát triển kết hợp chức năng khuyến nghị cây trồng, chẩn đoán bệnh và chatbot trên một màn hình. Trong bài báo, độ chính xác khuyến nghị cây trồng đạt 99%, còn mô hình bệnh hại ghi nhận F1 0,70 và mAP@50 74%. Đây là các giá trị đánh giá mô hình thu được trên một bộ dữ liệu xác định. Chúng không phải thành tích ngoài đồng cho thấy đã bảo toàn sản lượng nhờ hoãn tưới trước khi mưa và xác định lượng vôi bón trong ruộng lúa thực tế. Giữa điểm số trên màn hình tư vấn và kết quả ngoài đồng vẫn còn một mùa vụ cần kiểm chứng.

Kisan e-Mitra, do Chính phủ Ấn Độ phối hợp với Wadhwani AI vận hành, cung cấp thông tin về các chương trình của chính phủ và nông nghiệp bằng 11 ngôn ngữ địa phương. Theo tài liệu của Quốc hội Ấn Độ, tính đến tháng 7 năm 2025, hệ thống đã nhận 9,5 triệu câu hỏi và có 5,3 triệu nông dân sử dụng. Người dùng chỉ cần nói vào micro để nghe thông tin về trợ cấp và bảo hiểm, vì vậy ngay cả nông dân khó đọc chữ cũng có thể tiếp cận cửa sổ tư vấn. Những người lần đầu trò chuyện với chính phủ bằng giọng nói thay vì qua màn hình nằm trong các con số này.

Tại Hàn Quốc, hệ thống chẩn đoán sâu bệnh bằng hình ảnh đã được vận hành. Theo công bố năm 2024 của Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc, độ chính xác trung bình đạt từ 95% trở lên, độ chính xác nhận thức của con người là 95,3%, với phạm vi gồm 31 loại cây trồng và 182 loại sâu bệnh. Theo kế hoạch công tác chính thức, tác nhân AI nông nghiệp “AI Isak” dự kiến cung cấp dịch vụ vào năm 2027. Nếu hệ thống chẩn đoán hình ảnh hiện tại đọc một bức ảnh, AI Isak hướng tới trở thành cổng tiếp theo kết nối tài liệu kỹ thuật nông nghiệp bằng đối thoại.

Tuy nhiên, vẫn còn những rào cản mà công nghệ chưa thể vượt qua dù tinh vi đến đâu. Một trong số đó là ngôn ngữ. Mô hình học tiếng chuẩn thường lúng túng trước thổ ngữ và thành ngữ nông thôn. Một câu như “Cái ni vì rằng mà ra ri?” sẽ khó hiểu đối với một phiên dịch viên chỉ biết từ điển ngôn ngữ chuẩn. Để vượt qua

rào cản này, Ấn Độ đã bổ sung riêng mô hình hiểu ngôn ngữ phù hợp với các ngôn ngữ địa phương như tiếng Hindi và Marathi, cùng công cụ nhận dạng tiếng nói và tổng hợp tiếng nói có thể chạy ngoại tuyến. Dù vậy, hệ thống không hiểu được mọi thổ ngữ.

Trước giọng quá nặng hoặc thành ngữ ít dùng, đến nay nó vẫn thường hỏi lại những câu không phù hợp.

Chữ trên màn hình cũng là rào cản đối với một số người. Không chỉ ở vùng nông thôn các nước đang phát triển mà ngay tại nông thôn Hàn Quốc, nhiều nông dân cao tuổi cũng không thể đọc chữ trên màn hình một cách thoải mái. Với họ, cửa sổ trò chuyện bằng văn bản ngay từ đầu đã không có ích. Vì vậy, các dịch vụ thuộc nhóm Agri-LLM đều đặt giọng nói lên trước. Người dùng hỏi bằng lời và nghe câu trả lời bằng lời. Không cần nhìn chăm chăm vào màn hình nên họ chỉ phải dừng tay làm ruộng, đứng thẳng lưng trong chốc lát là buổi tư vấn đã kết thúc.

Đây cũng là lý do hệ thống chọn cách trả lời bằng lời giải thích như người thật đang nói, thay cho màn hình kết quả chỉ đầy số và bảng biểu.

Tín hiệu liên lạc thường bị gián đoạn ở vùng núi và cánh đồng hẻo lánh. Đó cũng là một rào cản cần vượt qua. Cách đặt mô hình lớn trên máy chủ ở xa và gửi câu hỏi mỗi lần không thể dùng tại những nơi này. Vì vậy, các nhà phát triển chia nhỏ và nén mô hình để cài trực tiếp vào điện thoại hoặc thiết bị nhỏ đặt ở bờ ruộng. Dữ liệu thời tiết và giá trị cảm biến vừa nhận được lưu tạm trong thiết bị, cho phép hệ thống tiếp tục đưa ra những đánh giá tối thiểu ngay cả khi mất hẳn tín hiệu. Mô hình nhỏ chạy trong thiết bị biết ít hơn mô hình lớn trên máy chủ. Tuy nhiên, khi tín hiệu bị cắt, kiến thức ít ỏi ấy vẫn tốt hơn hoàn toàn không có kiến thức.

Không phải mọi nông hộ đều hoan nghênh công nghệ này. Có ý kiến phản nản rằng độ chính xác chẩn đoán giảm mạnh khi camera điện thoại rung làm ảnh bị nhòe. Một số nông hộ dùng thử vài lần rồi ngưng vì không kham nổi cước dữ liệu. Thực tế cũng đã có báo cáo về trường hợp AI không đọc đúng loại đất hoặc biến số thời tiết đặc thù của địa phương và đưa ra lời khuyên sai lệch. Vẫn còn quá sớm để nói công nghệ đã hoàn thiện.

Còn lại một câu hỏi: nếu lời khuyên sai làm hỏng cả vụ mùa trong năm thì ai chịu trách nhiệm? Đến nay, phần lớn thiệt hại do xác định sai thời điểm tưới hoặc phát hiện bệnh quá muộn đều do một mình nông dân gánh chịu. Tháng 2 năm 2026, Tiến sĩ Sophia Duan thuộc Đại học La Trobe, Australia, chỉ ra rằng câu hỏi ai sẽ

gánh rủi ro khi AI thất bại trong lúc đã trở thành một phần của các quyết định thường nhật tại nông trại vẫn chưa được thảo luận đầy đủ. Bà cũng cho rằng nếu không có cơ chế chia sẻ rủi ro giữa nhà phát triển và nông dân, dù công nghệ có chính xác đến đâu, nông dân cuối cùng vẫn không thể tin vào độ chính xác ấy.

Đây cũng là lý do Agri-LLM gắn một nút dẫn tới tài liệu nguồn vào từng câu trả lời. Có thể công khai căn cứ, nhưng bảo đảm rằng căn cứ đó hoàn toàn phù hợp với thửa ruộng này trong mùa vụ này lại là vấn đề khác. Người nông dân đã hỏi bằng thổ ngữ cũng vậy. Người đó được tư vấn miễn phí, nhưng nếu có thiệt hại thì cuối cùng vẫn phải tự trả tiền.

Thông tin do nông dân nhập, như vị trí thửa ruộng, sản lượng và giá giao dịch, chảy về đâu cũng thuộc cùng câu hỏi này. Nếu thông tin tích tụ trên máy chủ của các tập đoàn công nghệ lớn và ngược lại làm suy yếu khả năng thương lượng của nông dân, việc tư vấn sẽ thuận tiện hơn nhưng hoàn cảnh của nông dân sẽ tệ đi. Thiết kế lưu thông tin trong thiết bị hoặc máy chủ địa phương và chỉ truy xuất nội dung thật sự cần thiết đang được thảo luận như một cách giảm vấn đề này. Nghiên cứu do Sangwa và Mutabazi công bố năm 2025 còn đề xuất các nguyên tắc thiết kế để giảm những rủi ro như vậy.

Họ cho rằng cần áp dụng thiết kế định hướng giá trị, phản ánh hoàn cảnh của nông dân ngay từ giai đoạn thiết kế hệ thống, đồng thời chuyên gia nông nghiệp phải định kỳ chấm chất lượng câu trả lời để lọc ra các lỗi mà con người bỏ sót. Trước đó, trong cảnh báo công bố năm 2022, Trung tâm Nghiên cứu Rủi ro Hiện sinh thuộc Đại học Cambridge đã chỉ ra rằng AI chỉ chạy theo sản lượng có thể gây hại cho đất và suối về lâu dài. Cần có thước đo xem xét cả tình trạng đất sau vài năm, thay vì chỉ nhìn sản lượng trước mắt. Hiện chưa có cơ chế để công nghệ tự chịu trách nhiệm.

Xu hướng này đang tiến thêm một bước. Nếu kết nối Agri-LLM với bản sao số tái tạo toàn bộ nông trại trong máy tính, người dùng có thể hỏi trước sản lượng sẽ giảm bao nhiêu nếu hạn hán kéo dài trong hai tuần tới. Mô hình sẽ thử trước nhiều kịch bản thời tiết trên cánh đồng ảo rồi chuyển kết quả thành ngôn ngữ con người có thể hiểu. Khi tiến đến giai đoạn ra lệnh trực tiếp cho drone và van điều tiết nước tự động, mô hình tư vấn sẽ thực sự vận hành nông trại. Khi một hệ thống cùng đảm nhiệm phán đoán và thực thi, câu hỏi về trách nhiệm sẽ nặng nề hơn nhiều so với hiện nay. Dù vậy, giai đoạn này vẫn chỉ dừng ở mức nghiên cứu và trình diễn.

Không có nhiều nông hộ giao nguyên việc phán đoán tự động như vậy cho hệ thống trên đồng ruộng thực tế.

Trở lại bờ ruộng. Ánh nắng ban mai lan trên lá lúa, người nông dân đọc câu trả lời hiện trên màn hình. Một tên bệnh và một tên thuốc xuất hiện, bên dưới là nút nhỏ dẫn đến tài liệu nguồn. Ngón tay người đó dừng lại trong chốc lát trên nút ấy. Trước khi phun thuốc, người đó có nhấn nút không?

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Parliament of India. (2025). Kisan e-Mitra Usage and Language Coverage, Unstarred Question No. 1464. https://sansad.in/getFile/annex/268/AU1464_CSuYc2.pdf?source=pqars
2. Arun, T., Pooja Sri, M., & Priya, K. (2026). FarmGPT: An explainable AI powered smart agriculture system for crop recommendation and decision support. AIJFR, 7(3). <https://doi.org/10.63363/aijfr.2026.v07i03.6414>
3. Baloch, S., Ali, A., & Naeem, A. (2025). AgriSmart: An AI-powered farming assistant and crop management platform for precision agriculture. International Journal of Innovative Science and Technology, 7(10), 155-162. <https://doi.org/10.33411/ijist/1710>
4. Farmers Weekly. (2026). On-farm AI: New tech must share the risk. <https://www.farmersweekly.co.nz/technology/on-farm-ai-new-tech-must-share-the-risk/>
5. Gauba, A., Pi, I., Man, Y., Pang, Z., Adve, V. S., & Wang, Y.-X. (2025). AgMMU: A comprehensive agricultural multimodal understanding benchmark. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2504.10568>
6. Sangwa, S., & Mutabazi, P. (2025). Artificial intelligence in agriculture: Ethical stewardship, responsible innovation, and governance for sustainable food systems. Intelligent Agriculture, 1(2), 25-45. <https://doi.org/10.54963/ia.v1i2.1684>
7. Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc. (2026). Kế hoạch công tác trọng tâm năm 2026: Nâng cấp tác nhân AI nông nghiệp AI Isak, dự kiến cung cấp dịch vụ năm 2027. https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=html&prgId=pln_mainbizQuery
8. University of Cambridge. (2022). Risks of using AI to grow our food are substantial and must not be ignored, warn researchers. <https://www.cam.ac.uk/research/news/risks-of-using-ai-to-grow-our-food-are-substantial-and-must-not-be-ignored-warn-researchers>
9. Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc. (2025). Tăng 20% thu nhập nông hộ bằng trí tuệ nhân tạo (AI): Chiến lược hội tụ trí tuệ nhân tạo (AI) với khoa học và công nghệ nông nghiệp. Thông cáo báo chí của Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc. https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=view&prgId=day_farmprmninfoEntry&dataNo=100000806197
10. YTN. (2024). Hãy chẩn đoán và kê đơn thiết hại do sâu bệnh bằng điện thoại thông minh. YTN Science. https://m.science.ytn.co.kr/program/view_today.php?s_mcd=0082&key=202409261626341200

5.2

Robot nông nghiệp và tự động hóa công việc

Sương sớm phủ thấp trên cánh đồng Mangyeong ở Gimje, một chiếc máy kéo khởi động. Không có ai trong ghế lái. Vô lăng tự dịch chuyển nhẹ sang trái rồi sang phải, chiếc ăng-ten hình ô gắn trên nóc nhấp nháy khi nhận tín hiệu vệ tinh. Người nông dân đứng ở đầu ruộng chỉ nhìn vào màn hình điện thoại cầm trong tay, không hề chuẩn bị nắm vô lăng.

Lý do chiếc máy kéo này tự di chuyển không hề đơn giản. Số người làm việc trên các cánh đồng trồng lúa, lúa mì, ngô và đậu đang giảm ở khắp nơi. Những thanh niên trong làng từng cùng nhau cấy lúa đã rời lên thành phố, người ở lại đã đến tuổi lưng còng, đầu gối đau. Công việc cúi mình dưới nắng gắt từ sáng sớm đến tối để cấy mạ, phun thuốc và vận chuyển thóc nay khó tìm được người làm ngay cả khi trả tiền. Chi phí nhân công tăng mỗi năm, còn cơ sở hạ tầng như hội trường làng và xưởng sửa chữa máy nông nghiệp lần lượt đóng cửa. Để máy kéo tự cày ruộng là lựa chọn nhằm lấp chỗ trống do không còn người làm.

Toàn bộ quá trình này lặp lại với tốc độ mắt người không thể theo kịp. Bốn bước gồm nhận biết những gì camera và cảm biến vừa quan sát, đo lại vị trí của mình, vạch lại tuyến đường cần đi, rồi ra lệnh cho bánh xe và cánh tay được lập không ngừng theo đơn vị mili giây. Trước đây, con người nắm vô lăng, quan sát bằng mắt và điều khiển máy nông nghiệp. Giờ đây, máy tự thực hiện cả bốn bước này.

Hai yếu tố giúp chiếc máy kéo đi thẳng theo đường bờ ruộng. Một là vệ tinh trên trời, yếu tố còn lại là camera gắn phía trước máy kéo. Nếu chỉ nhận tín hiệu định vị vệ tinh (GNSS), sai số vị trí đôi khi gần 1 mét. Vì vậy, hệ thống dùng đồng thời công nghệ định vị vệ tinh chính xác (RTK GNSS), nhận tín hiệu hiệu chỉnh theo thời gian thực từ trạm tham chiếu mặt đất. Khi Daedong, một công ty máy nông nghiệp Hàn Quốc, thực hiện bài kiểm tra tự hành cấp quốc gia bằng máy kéo của mình năm 2023, sai số lệch khỏi lộ trình dự kiến nằm trong phạm vi 7 cm về hai bên.

Công ty cho biết sẽ ra mắt máy kéo không người lái cấp độ 4, hoàn toàn không có người ngồi trên xe, vào năm 2026. Công ty khởi nghiệp Voltrac của Tây Ban Nha cho biết sẽ thương mại hóa máy kéo không người lái chạy hoàn toàn bằng điện vào năm 2026, còn doanh nghiệp nông nghiệp GINT của Hàn Quốc tiếp tục thử nghiệm thực tế khả năng tự hành của máy kéo và máy cấy tại các cánh đồng lúa ở Việt Nam.

Máy nông nghiệp tự hành được gắn ăng-ten vệ tinh, bộ đo quán tính, camera và cảm biến chướng ngại vật. Năm 2026, một xe bốn bánh chạy mười lần trên đoạn đường 30 mét trong ruộng ngô, ghi nhận sai số ngang trung bình 6,2 cm vào ngày nhiều mây và độ chính xác vận hành 95%. Trọng tâm của thử nghiệm là khả năng đi theo hàng cây trồng. Gieo hạt biến đổi, tức thay đổi độ sâu và khoảng cách gieo theo từng khu vực, cần bộ điều khiển và thử nghiệm này mầm riêng.

Bánh xe cũng không phải bánh xe thông thường. Với phương thức bốn bánh truyền động và bốn bánh tự chuyển hướng độc lập (4WD/4WS), máy có thể tránh trượt và xoay tại chỗ ngay cả trong lớp bùn nhão của ruộng ngập nước hoặc trên đồng dốc. Ngay giữa thửa ruộng ngập nước khiến chân người đi bộ lún sâu, robot vẫn phân phối lực khác nhau cho từng bánh trong bốn bánh để giữ thăng bằng.

Khi tín hiệu vệ tinh bị ngắt trong chốc lát dưới gầm cầu hoặc dưới bóng rừng chắn gió, camera sẽ vào cuộc. Camera đi theo hàng mạ vừa nhú trên luống và tìm đường chính giữa. Mỗi chương trình thực hiện việc này có một tên riêng. Trên ruộng lúa, chương trình Fast-SCNN chia nhỏ hình ảnh rồi phân biệt từng phần là mạ hay nước như đang tô màu. Trên ruộng ngô, chương trình ST-YOLOv8s học lại hình dạng lá thay đổi theo từng giai đoạn sinh trưởng để không mất đường trung tâm của luống. Cả hai chương trình đều liên tục vẽ lại một đường vô hình trong hình ảnh ở từng khoảnh khắc.

Máy cấy tự hành kết hợp hai giác quan này đã giữ sai số hàng mạ trong phạm vi 6,2 cm tại địa điểm thử nghiệm thực tế. Ngoài đồng, bùn bắn lên ống kính và nắng giữa trưa chiếu thẳng vào camera. Nếu tia LiDAR bị phản xạ bật ra khỏi lá lúa ướt, robot có thể mất vị trí tức thời. Vì vậy, thiết bị phải nâng cấp khả năng chống nước, chống bụi và liên tục hiệu chỉnh lại số liệu mỗi khi giá trị camera không khớp với giá trị vệ tinh.

Robot làm cỏ không người lái do Tổ chức Nghiên cứu Nông nghiệp và Thực phẩm Quốc gia Nhật Bản (NARO) và công ty New Green cùng thử nghiệm chạy bằng năng lượng mặt trời, dùng xích khuấy đáy ruộng nước để làm nước đục. Nếu ánh

nắng không xuyên được xuống nước, cỏ dại như cỏ lồng vực không thể nảy mầm. Trong ruộng lúa hữu cơ, khối lượng cỏ khô giảm từ 35,4 gam xuống 5,6 gam trên mỗi mét vuông. Sản lượng lúa trên cùng thửa ruộng tăng 20%.

Các thiết kế robot làm cỏ kết hợp camera giá rẻ, Raspberry Pi và MobileNetV2 cũng đã được đề xuất. Một thiết kế đăng trên IJRASET tích hợp bốn bánh xe, camera, cánh tay robot và bản ghi trên đám mây trong cùng một thân máy, nhưng chưa đến giai đoạn chế tạo robot thực và thử nghiệm ngoài đồng. Nguyên mẫu và thử nghiệm đồng ruộng phải trả lời liệu thiết kế này có chịu được bụi đất, bùn và lá cây lay động hay không.

Drone phun thuốc có thể được thiết kế lộ trình để không đi lại trên cùng một khu vực. Nghiên cứu SprayCraft thử nghiệm thuật toán lập lộ trình trên dữ liệu vị trí tổng hợp. Thuật toán đã tìm được đường ngắn trên màn hình máy tính, nhưng đó chưa phải chuyến bay chịu được gió ngoài đồng, dung lượng pin và trọng lượng bình thuốc. Thiết bị đọc mật độ bệnh hại bằng camera và điều chỉnh lượng phun từ vòi cũng phải trải qua thử nghiệm riêng, tách biệt với thuật toán lộ trình.

Bông lúa đã chín hạt còn khó xử lý hơn. Dù là bắp ngô hay bông lúa, chỉ cần lực nắm hơi mạnh, hạt có thể vỡ hoặc vỏ bị hỏng; nếu lực yếu, chúng sẽ trượt khỏi tay và rơi xuống. Cánh tay robot được gắn đồng thời cảm biến áp suất và cảm biến phát hiện trượt để giữ cân bằng này. Trong thử nghiệm tại vườn cây ngoài trời với cánh tay robot hái táo, tỷ lệ hư hỏng là 20% khi thiết bị phản hồi tự cảm nhận lực bị tắt trong lúc nắm. Khi bật thiết bị đó, tỷ lệ hư hỏng giảm xuống 0%. Robot phải tự cảm nhận đầu ngón tay đang ấn mạnh đến mức nào.

Lúa và lúa mì thường được cắt cả cây rồi đưa vào máy tuốt, nhưng cảm giác này quan trọng trong những công việc phải chọn từng hạt một, như lựa bông làm giống hoặc loại bỏ những hạt cần tỉa.

Robot vận chuyển nông sản đi theo người lao động trên đồng dốc hoặc chở thùng đến địa điểm quy định. Một trường hợp của Bộ Nông nghiệp, Lâm nghiệp và Thủy sản Nhật Bản ghi nhận nhân lực giảm khoảng 50% và gánh nặng thể chất giảm khoảng 30%. Tài liệu đó không có số liệu cho rằng cường độ lao động giảm hơn 70%. Cần so sánh theo cùng tiêu chí xem thời gian con người khuôn vác và thời gian giám sát robot thay đổi ra sao.

Những con số do tất cả robot này tạo ra chỉ có ích khi được gửi đến một nơi nào đó. Vị trí, pin và công việc robot vừa hoàn thành được tải lên màn hình web thời

gian thực (Firebase); khi có bất thường, bot nhắn tin (Telegram Bot) hiển thị một câu ngắn trên điện thoại của người nông dân. Màn hình này được tạo bằng cách kết hợp chương trình web dựa trên Python (Flask) với cơ sở dữ liệu thời gian thực. Khi có sự cố, con người nhấn một nút trên màn hình để ra lệnh cho robot làm lại khu vực đó. Robot có vẻ tự làm mọi việc, nhưng con người vẫn theo dõi phía sau màn hình.

Máy nông nghiệp tự hành cần có thiết bị nhận biết người, động vật và chướng ngại vật, đồng thời dừng lại khi đi ra ngoài phạm vi quy định. ISO 18497-1 và 18497-2 đề cập các nguyên tắc thiết kế máy và bảo vệ trước chướng ngại vật. U.S. Sugar của Mỹ đã triển khai năm máy kéo tự hành tại cơ sở rộng 255.000 mẫu Anh và vận hành chúng 24 giờ mỗi ngày. Năm chiếc máy không phụ trách toàn bộ vùng đất rộng lớn đó. Con người rời ghế lái và chuyển đến bàn điều khiển để theo dõi đồng thời nhiều màn hình.

Những nơi ruộng đồng không vuông vức vẫn cần bàn tay con người. Tại ruộng bậc thang có mương thoát nước gấp khúc hoặc bờ ruộng ngoằn ngoèo, tín hiệu vệ tinh và nhận dạng camera thường xuyên xung đột, khiến robot mất phương hướng rồi dừng lại. Ở những nơi như vậy, con người vẫn phải trực tiếp lên máy kéo và nắm vô lăng. Tự động hóa được áp dụng trước trên những cánh đồng vuông vức.

Khi tổng hợp kết quả của các nông hộ đã đưa những robot này vào sử dụng, có thể thấy các con số chung. Lượng lao động con người cần cho công việc nông nghiệp giảm từ 70% đến 80%. Tiếp đó là các báo cáo cho biết đã tiết kiệm từ 30% đến 50% vật tư đổ vào đồng ruộng như phân bón và thuốc bảo vệ thực vật. Những con số này nổi bật trong các công việc như làm cỏ, phun thuốc và vận chuyển, vốn buộc con người chịu sức nặng bằng lưng và eo. Vấn đề nằm ở bước tiếp theo.

RaaS, hình thức đăng ký thuê robot thay vì mua, là một cách chia nhỏ chi phí ban đầu. Theo báo cáo thị trường, quy mô thị trường RaaS của toàn ngành dự kiến tăng từ 32,08 tỷ USD năm 2026 lên 67,85 tỷ USD năm 2030. Con số này bao gồm robot logistics, vệ sinh và an ninh nên không thể chuyển thẳng thành quy mô thị trường robot nông nghiệp. Ở nông thôn, cách thực tế hơn là điểm cho thuê của làng và hợp tác xã sắp xếp thứ tự trong mùa gieo hạt và mùa thu hoạch để nhiều người dùng chung một máy.

Các kết quả cho đến nay cho thấy ranh giới rõ ràng. Trên những cánh đồng rộng và vuông vức, robot thực hiện tốt hơn con người các công việc lặp đi lặp lại giống nhau, như đi theo luống, rải một lượng đã định và vận chuyển trọng lượng đã định.

Robot không bị thương, không mệt mỏi và không nghỉ cả vào ban đêm. Ngược lại, phân biệt bằng mắt hạt đã chín kỹ với hạt chưa chín hoặc đưa ra quyết định tùy tình huống trước chướng ngại vật có hình dạng chưa từng gặp vẫn là việc của con người.

Các nhà nghiên cứu đã hình dung bước tiếp theo. Phương thức robot hiểu lời con người, tự đánh giá và chuyển động cơ thể được gọi là AI hiện thân (Embodied AI). Chỉ bằng một câu lệnh yêu cầu nhổ cỏ ở khu A và chuyển nông sản ở khu B, nhiều robot sẽ phân chia vai trò rồi hoạt động. Một phương thức khác cũng đang được nghiên cứu: drone phun thuốc trên không khảo sát cánh đồng trước để lập bản đồ sâu bệnh, sau đó robot làm cỏ và xe tự hành phun thuốc trên mặt đất chạy thẳng đến các tọa độ đó. Người ta còn hình dung camera và drone đi quanh cánh đồng vào lúc nửa đêm khi con người đang ngủ, rồi lập sẵn danh sách công việc cho sáng hôm sau.

Hiện nay, tất cả vẫn ở giai đoạn bài báo và nguyên mẫu. Chỉ sau khi thất bại thêm nhiều lần trong bụi đất, bùn và mưa lớn, người ta mới biết viễn cảnh này có hoạt động được trên bờ ruộng thực tế hay không.

Khi mặt trời lên hắt, máy kéo không người lái chuyển sang thửa ruộng tiếp theo. Người nông dân vẫn đứng trên bờ ruộng, kiểm tra lượng pin còn lại và đoạn đường chưa hoàn thành trên màn hình điện thoại. Trong lúc máy kéo cày đất và căn thẳng hàng, hai tay người đó được dùng để mở cống nước ở thửa ruộng bên cạnh.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Aldağ, M. C., & Eker, B. (2026). Development and field evaluation of an autonomous four-wheel-drive agricultural vehicle tracking crop rows using computer vision technology. *Journal of Agricultural Production*, 7(1), 13-19.
<https://doi.org/10.56430/japro.1826810>
2. Asami, H., & Nakamura, T. (2026). Effects of an Automatic Weed Suppression Robot for Paddy Fields in a Semi-Mountainous Area on Weed Suppression and the Growth and Yield of Paddy Rice. *Japanese Journal of Crop Science*, 95(1), 28-35.
<https://doi.org/10.1626/jcs.95.28>
3. Chen, K., Li, T., Yan, T., Xie, F., Feng, Q., Zhu, Q., & Zhao, C. (2022). A soft gripper design for apple harvesting with force feedback and fruit slip detection. *Agriculture*, 12(11), 1802.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12111802>
4. International Organization for Standardization. (2024). ISO 18497-1:2024 Agricultural machinery and tractors, safety of partially automated, semi-autonomous and autonomous machinery, part 1: machine design principles and vocabulary. ISO.
<https://www.iso.org/standard/82684.html>

5. International Organization for Standardization. (2024). ISO 18497-2:2024 Agricultural machinery and tractors, safety of partially automated, semi-autonomous and autonomous machinery, part 2: design principles for obstacle protection systems. ISO.
<https://www.iso.org/standard/82686.html>
6. Ayalew, H., et al. (2024). SprayCraft: Efficient Coverage Path Planning for Agricultural Spraying. arXiv.
<https://arxiv.org/abs/2412.12176>
7. Alatanana. (2026). Phân tích ảnh hưởng của việc cải tiến thông minh máy nông nghiệp đối với hiệu quả sản xuất nông nghiệp. Khoa học Nông nghiệp, 9(2), 114-116.
<https://doi.org/10.32629/as.v9i2.3755>
8. Daedong. (2023). Máy nông nghiệp làm việc tự động của Daedong lần đầu tiên trong ngành vượt qua bài kiểm tra tự hành cấp quốc gia. Tin tức Daedong.
<https://ko.daedong.co.kr/news/daedongnews/1485>
9. Precision Farming Dealer. (2026). U.S. Sugar launches largest deployment of autonomous tractors in sugar industry.
<https://www.precisionfarmingdealer.com/articles/7129-us-sugar-launches-largest-deployment-of-autonomous-tractors-in-sugar-industry>
10. Future Farming. (2026). Voltrac's fully electric autonomous tractor to launch in 2026.
<https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/autonomous-semi-autosteering-systems/voltracs-fully-electric-autonomous-tractor-to-launch-in-2026/>
11. Research and Markets. (2026). Robotics as a Service (RaaS) market report 2026.
<https://www.researchandmarkets.com/reports/5896010/robotics-service-raas-market-report>
12. Seoul Economic Daily. (2026). GINT thử nghiệm thực tế khả năng tự hành của máy nông nghiệp như máy kéo và máy cấy tại Việt Nam. Seoul Economic Daily.
<https://www.sedaily.com/NewsView/2K7EFUEF1V>

5.3

Sử dụng công cụ AI phù hợp với nông hộ quy mô nhỏ

Một majigi ruộng lúa rộng khoảng 200 pyeong. Vào sáng sớm, người ngồi xổm trên bờ thửa ruộng ngập nước cầm trong tay một chiếc điện thoại thông minh bị nứt góc màn hình, còn cột tín hiệu dao động giữa một và hai vạch. Qua đêm, một đốm nâu bắt đầu lan trên lá lúa, người đó đưa camera về phía chiếc lá đọng sương. Không có drone, ảnh vệ tinh hay cảm biến đất. Tất cả những gì người đó có là chiếc điện thoại trong túi và một ứng dụng cài trên đó.

Khoảng 80% nông hộ tại các nước đang phát triển là hộ sản xuất nhỏ có quy mô như vậy. Thế nhưng trong khi ruộng ngô tại Mỹ thu hoạch hơn 10 tấn mỗi hecta, khu vực châu Phi hạ Sahara chỉ đạt 2 đến 3 tấn. Khái niệm nông nghiệp chính xác vốn được đặt ra với những trang trại lớn có máy kéo tự hành giá hàng trăm triệu won hoặc camera siêu phổ gắn trên drone. Mức giá ấy chưa bao giờ nằm trong tính toán của một người chỉ canh tác một majigi ruộng lúa. Với người canh tác ở quy mô này, công cụ hữu ích là những thứ chạy ngay trên chiếc điện thoại đã nằm trong tay họ.

Plantix, được phát triển tại Đức, là ứng dụng miễn phí xác định tên bệnh khi người dùng chụp và tải ảnh lá cây lên; ứng dụng từng đứng thứ nhất thế giới về lượt tải trong nhóm ứng dụng nông nghiệp. Tại Kenya, Farmer.Chat do Digital Green phát triển được mở như một dịch vụ hỏi đáp về sâu bệnh bằng cách trò chuyện trong cửa sổ hội thoại; chỉ trong năm đầu tiên, dịch vụ đã nhận hơn 300.000 câu hỏi từ 15.000 người dùng. Tại Bangladesh, dịch vụ tư vấn bằng giọng nói KrishokBondhu xuất hiện, cho phép người dùng nói bằng tiếng Bengal và nhận câu trả lời bằng tiếng Bengal, nhờ đó ngay cả nông dân không biết chữ cũng có thể gọi điện để xin tư vấn.

Cả ba đều không thu phí và đều được xây dựng với đối tượng khách hàng đầu tiên là các nông hộ chỉ có một majigi ruộng lúa. Chúng được thiết kế để tiếp nhận bất kỳ phương thức nào nông dân có thể dùng trong số hình ảnh, chữ viết và

giọng nói. Sau đó, nhiều công cụ tương tự như SCA-MobiPlant và PlantShield Alcũng xuất hiện.

“Nông Lai Tấn” của thành phố Cao Hùng, Đài Loan, là dịch vụ công cung cấp thông tin về thời tiết, thiên tai, giá nông sản và IoT. Đây là cổng tập hợp trên một màn hình các thông tin phân tán dành cho nông dân, chứ không phải thiết bị tự động điều khiển cửa cổng ruộng lúa. PlantVillage Nuru là một công cụ di động riêng hỗ trợ chẩn đoán bệnh ở khoai tây và khoai lang. Nghiên cứu EfficientPNet thử nghiệm mô hình trên ảnh khoai tây PlantVillage có nền sạch. Ứng dụng thông báo công cộng, công cụ chẩn đoán bệnh ngoài thực địa và mô hình hình ảnh trong phòng thí nghiệm có thể cùng nằm trong một chiếc điện thoại, nhưng chúng có kết quả khác nhau.

Giai đoạn sau khi nhận câu trả lời trên màn hình đôi khi mới là trở ngại lớn hơn. Để mua thuốc theo đơn, nông dân thường phải đi xe máy đến cửa hàng thuốc bảo vệ thực vật ở thị trấn cách đó vài trạm, và muốn có tiền mua thuốc, họ phải cắt giảm khoản chi khác. Việc chẩn đoán là miễn phí, nhưng công sức đi lại và tiền bạc để làm theo đơn thuốc vẫn do nông dân gánh chịu.

Muốn chạy mô hình trên điện thoại Android giá rẻ, cần giảm khối lượng tính toán. Khi lượng tử hóa giá trị FP32 thành INT8, dung lượng lưu tham số thường còn khoảng một phần tư. Chỉ chuyển sang INT8 không làm mô hình nhỏ đi hàng chục lần. TensorFlow Lite là khung chạy trên thiết bị di động, còn ONNX là định dạng trao đổi mô hình. Vosk là công cụ nhận dạng tiếng nói, còn mBERT là bộ mã hóa văn bản. Không được gộp tất cả công cụ khác nhau này thành kỹ thuật nén hoặc mô hình nhận dạng tiếng nói. Sau khi nén, cần thử nghiệm lại mức suy giảm độ chính xác đối với bệnh hiếm và giọng địa phương.

Kết quả đánh giá Ama Krushi tại bang Odisha, Ấn Độ, của PxD cho thấy sản lượng trung bình của các nông hộ nhận dịch vụ tăng 4,1%. Tỷ lệ lợi ích trên chi phí từ 6 đến 18 lần là phạm vi được tính dựa trên chi phí dự án và lợi ích ước tính, chứ không phải lợi nhuận ròng được xác nhận trực tiếp trong tài khoản của mọi nông hộ. Phân tích tổng hợp đăng trên Global Food Security năm 2025 báo cáo rằng tư vấn nông nghiệp số làm sản lượng và thu nhập tăng trung bình 6%, nhưng nhiều ước tính riêng lẻ không có kết quả rõ ràng về mặt thống kê. Phải đọc tách biệt hiệu quả trung bình với lợi nhuận chắc chắn của từng nông hộ.

Khi thử nghiệm KrishokBondhu bằng câu hỏi thực tế của nông dân, hệ thống đưa ra câu trả lời mà con người nghe cũng thấy thỏa đáng trong 72,7% số câu hỏi

nông nghiệp đa dạng. Khi chấm điểm song song với phương thức cũ chỉ trả lời bằng văn bản, KrishokBondhu đạt 4,53 trên 5 điểm, vượt bên chỉ đạt 3,13 điểm. Đối với nông dân không thành thạo đọc viết, khác biệt này có ý nghĩa lớn hơn bất kỳ tính năng nào khác. Họ không cần chạm màn hình để tìm trình đơn mà chỉ cần nói.

Theo dữ liệu năm 2026 của GSMA, tỷ lệ sử dụng internet di động tại các nước có thu nhập thấp và trung bình là 64% ở nữ giới và 73% ở nam giới. Chênh lệch tuyệt đối là 9 điểm phần trăm, còn 13% là chênh lệch tương đối tính theo tỷ lệ sử dụng của nam giới. Sở hữu điện thoại thông minh và sử dụng internet di động cũng là hai chỉ số khác nhau. Cần giữ nguyên định hướng của nghiên cứu thực địa rằng nữ nông dân có ít cơ hội tiếp cận điện thoại, cước dữ liệu và thời gian đào tạo hơn, đồng thời phải ghi rõ đó là chênh lệch của chỉ số nào.

Trước người nông dân cao tuổi lại xuất hiện một rào cản khác. Chức năng hỏi bằng lời và nhận câu trả lời bằng lời cũng hạ thấp ngưỡng tiếp cận đối với họ. Tuy nhiên, những người đã đọc thừa ruộng bằng mắt và tay hơn 40 năm thường không tin ngay câu trả lời của máy. Một số dịch vụ hiển thị nguồn của hướng dẫn làm căn cứ ngay cạnh đơn thuốc. Khi nêu rõ hướng dẫn của viện nghiên cứu nông nghiệp quốc gia hoặc tài liệu tiêu chuẩn về thuốc bảo vệ thực vật, nông dân có thể lập tức kiểm tra lại căn cứ. Dù vậy, chỉ cho xem thêm một nguồn vẫn chưa đủ.

Tỷ lệ sử dụng thực tế khác biệt rõ rệt giữa làng có cán bộ khuyến nông đứng bên hướng dẫn thao tác vài lần và làng không được hướng dẫn.

Những nỗ lực lấp khoảng trống này cũng đang được triển khai. Chẳng hạn, trung tâm kỹ thuật nông nghiệp của chính quyền hoặc cán bộ khuyến nông thuộc hợp tác xã nông nghiệp địa phương tập hợp người dân tại hội trường làng và tổ chức buổi thực hành, bắt đầu từ cách cầm điện thoại rồi cùng nhau nhấn từng nút. Hoạt động đào tạo tại chỗ như vậy tốn nhiều công sức hơn rất nhiều so với cập nhật một màn hình, nhưng hiệu quả cũng kéo dài tương ứng. Nhiều báo cáo thực địa cho biết tỷ lệ áp dụng thực tế khác nhau giữa làng nơi công ty chỉ đưa ứng dụng vào rồi rút đi và làng nơi tổ chức địa phương đồng hành trong vài tháng.

Nhiều nơi cũng lặp lại nhận xét rằng lời truyền miệng giữa người dân trong làng, khi họ dùng thử trước rồi chỉ cho nhau, có sức mạnh hơn bất kỳ quảng cáo nào.

Không có gì bảo đảm một dịch vụ khởi đầu miễn phí sẽ tiếp tục miễn phí. Plantix là một ví dụ. Ban đầu, ứng dụng chẩn đoán bệnh với mục tiêu giúp giảm sử dụng

thuốc bảo vệ thực vật, nhưng tình hình thay đổi khi các nhà đầu tư tham gia. Công ty mở rộng bằng hoạt động mua số lượng lớn thuốc bảo vệ thực vật và phân phối từ các doanh nghiệp như Dow, BASF, Syngenta và Bayer rồi bán lại cho đúng các cửa hàng bán lẻ mà nông dân tìm đến. Năm 2023, chính công ty được nhà sản xuất hóa chất Helm mua lại. Màn hình để nông dân tải ảnh lá cây lên vẫn miễn phí.

Tuy nhiên, đằng sau sự miễn phí ấy giờ đây là một phép tính khác nhằm quyết định loại thuốc bảo vệ thực vật nào được khuyến nghị trước.

Việc vị trí ruộng, số liệu đất và hồ sơ sản lượng do nông hộ nhập được lưu nguyên trên máy chủ doanh nghiệp cũng đáng lo ngại. Bên nắm giữ thông tin đó sau này có thể dùng nó làm căn cứ ép giá khi thu mua nông sản. Vì vậy, các phương án thay thế đang được đề cập gồm chính quyền địa phương trực tiếp dùng ngân sách duy trì ứng dụng như Cao Hùng, hoặc hợp tác xã như hợp tác xã nông nghiệp cùng vận hành và quy định rõ dữ liệu thuộc quyền sở hữu của nông hộ. Đây là cơ cấu không thu phí người dùng mà dùng thuế hoặc hội phí để trang trải chi phí vận hành.

Dù cùng miễn phí, dịch vụ tồn tại nhờ thuế và tiền tài trợ sẽ vận động ngày càng khác với dịch vụ chịu áp lực thu hồi vốn đầu tư. Giống như trang trại lớn thuê robot hoặc drone theo dịch vụ đăng ký (RaaS), dịch vụ tư vấn dành cho nông hộ nhỏ cuối cùng cũng chỉ có thể duy trì lâu dài nếu có người trả khoản phí này thay họ. Farmer.Chat và KrishokBondhu hiện vẫn hoạt động bằng nguồn tiền của các quỹ và kinh phí nghiên cứu. Nếu nguồn tiền đó chấm dứt, không ai có thể bảo đảm mô hình miễn phí hiện nay sẽ thay đổi ra sao.

Bước tiếp theo được nhắc đến là cài hẳn mô hình ngôn ngữ siêu nhẹ trong điện thoại, để tiếp tục tư vấn bằng đối thoại tự nhiên ngay cả ở vùng sâu nơi internet bị cắt hoàn toàn. Hiện nay, công nghệ này vẫn gần với trình diễn trong phòng thí nghiệm và sẽ cần thời gian trước khi thực sự đến tay người chỉ canh tác một majigi ruộng lúa. Trong thời gian đó, tín hiệu vẫn sẽ dao động giữa một và hai vạch, còn điện thoại vẫn sẽ có giá 100.000 won.

Trở lại bờ ruộng ấy. Vài giây sau khi chụp và tải ảnh lên, người đó đọc câu trả lời hiện trên màn hình. Bên cạnh câu hướng dẫn phun thuốc vào lúc nào và với lượng bao nhiêu, một quảng cáo nhỏ cũng xuất hiện. Người đó không nhớ chính xác quảng cáo đã được gắn ở đó từ bao giờ. Dù vậy, lần này họ vẫn sẽ tin câu trả lời

và chỉnh cửa cống nước. Việc màn hình này có còn như hiện nay vào mùa sau hay không phụ thuộc vào tình hình của công ty vận hành dịch vụ.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Majiwa, E., Ndaka, A. K., Ratemo, H., & Agembo, E. (2026). Artificial intelligence (AI) adoption and its perceptions among smallholder women farmers in Kenya. *Discover Agriculture*, 4(1), 162.
<https://doi.org/10.1007/s44279-026-00626-z>
2. Tesfay, W. (2026). Impact of improved irrigation technology adoption under groundwater irrigation and its impact on smallholder farmers' crop productivity, income, and food security in Southern Tigray Zone, Ethiopia. *Research Square* (preprint).
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-9797920/v1>
3. Beach, R. H., Milliken, C., Franzen, K., & Lapidus, D. (2025). Meta-analysis of the impacts of digital information interventions on agricultural development. *Global Food Security*, 45, 100866.
<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2025.100866>
4. Mutuku, B., Akuffobe-Essilfie, M., & Kansime, M. (2026). Understanding gender disparities in access to digital advisory services among women and men farmers in Ghana. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 10, 1614245.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2026.1614245>
5. Omotayo, A. O., & Omotoso, A. B. (2026, June 3). AI offers promise for agriculture, but smallholder farmers risk being left behind. *The Conversation*.
<https://theconversation.com/ai-offers-promise-for-agriculture-but-smallholder-farmers-risk-being-left-behind-279013>
6. Singh, N., Wang'ombe, J., Okanga, N., Zelenska, T., Repishti, J., G K, J., Mishra, S., Manokaran, R., Singh, V., Rafiq, M. I., & Gandhi, R. (2024). Farmer.Chat: Scaling AI-powered agricultural services for smallholder farmers. *arXiv*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.08916>
7. Ameen, M. R., Islam, A., Aktar, F., & Rafat, M. S. (2025). KrishokBondhu: A retrieval-augmented voice-based agricultural advisory call center for Bengali farmers. *arXiv*.
<https://arxiv.org/abs/2510.18355>
8. Miller, S. R. (2024, October). This app set out to fight pesticides. Once VC stepped in, the app helped sell them. *Food and Environment Reporting Network*.
<https://thefern.org/2024/10/this-app-set-out-to-fight-pesticides-once-vc-stepped-in-the-app-helped-sell-them/>
9. Precision Development (PxD). (2025, February 26). Customized digital advice can help farmers reduce crop loss and manage weather shocks: A summary.
<https://precisiondev.org/customized-digital-advice-can-help-farmers-reduce-crop-loss-and-manage-weather-shocks-a-summary-or-as-much-as-we-can-summarize/>
10. GSMA. (2026). The mobile gender gap report 2026. GSMA.
<https://www.gsma.com/gender-gap/>

Chương 6

Nông nghiệp thông minh thích ứng khí hậu và hệ sinh thái bền vững

6.1

Nông nghiệp thông minh thích ứng khí hậu (CSA) và quản lý hệ sinh thái đất

Hãy nắm một vốc đất ruộng vừa được xới lên bằng đầu cuốc. Trong lớp đất đen vụn ra trên lòng bàn tay có những sinh vật mắt thường không nhìn thấy. Vi khuẩn, nấm và giun đất nhỏ đan xen nhau, nghiền nhỏ rơm rạ đã chết, tạo ra nitơ cho rễ hấp thụ, và khi mầm bệnh lạ xâm nhập, chúng tập hợp lại để chặn đường. Trong một vốc đất có vô số sinh vật cùng chung sống như vậy.

Trong vài chục năm qua, lớp đất này đã dần suy thoái. Mỗi lần máy kéo cày xới, các lỗ rỗng giữa những hạt đất lại bị phá vỡ; mỗi lần phân bón hóa học được đổ xuống, công việc của vi sinh vật lại giảm đi. Kết quả là đất mất khả năng giữ carbon, còn ruộng lúa và đồng màu dần trở thành nơi phát thải carbon dioxide, methane và nitrous oxide. Phương thức canh tác nhằm đảo ngược xu thế này được gọi là nông nghiệp thông minh thích ứng khí hậu (Climate Smart Agriculture). Tên gọi nghe có vẻ lớn lao, nhưng mục tiêu rất rõ ràng: bảo đảm sản lượng, tăng sức chống chịu trước hạn hán và nắng nóng cực đoan, đồng thời đưa carbon trở lại đất.

Cộng đồng quốc tế gọi các mục tiêu này là ba trụ cột: nâng cao năng suất, tăng cường khả năng chống chịu trước cú sốc khí hậu và giảm khí nhà kính. Phải thực hiện cả ba cùng lúc nên đây không thể là việc dễ dàng.

Khi ruộng được ngập đầy nước, oxy trong đất biến mất. Ngay cả ở nơi không có oxy, vi sinh vật vẫn không ngừng hoạt động. Chúng phân hủy rơm rạ và chất hữu cơ theo một cách khác, và sản phẩm phụ của quá trình này là methane. Methane có khả năng làm nóng bầu khí quyển mạnh hơn nhiều so với carbon dioxide, vì vậy các ruộng lúa trên toàn thế giới từ lâu đã bị xem là một nguồn phát thải khí nhà kính lớn. Từ khi người ta phát hiện có thể giải quyết vấn đề này bằng cách quản lý nước, kỹ thuật quản lý nước đang trở thành tiêu chuẩn trong canh tác lúa.

Biện pháp không giữ ruộng ngập nước liên tục mà chủ động tháo nước, để đất khô trong thời gian ngắn rồi cấp nước trở lại được gọi là tháo nước giữa vụ.

Theo công bố của Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc, biện pháp tháo nước nhiều lần trong thời kỳ sinh trưởng đã làm giảm tối đa 44 phần trăm lượng methane so với ngập nước liên tục, còn biện pháp bừa ruộng khô trước khi cấy giúp giảm 14 phần trăm. Các con số mở rộng từ 8 địa điểm vào năm ngoái lên 12 địa điểm và hơn 60 hecta trong năm nay là kế hoạch mở rộng dự án bừa ruộng khô, chứ không phải toàn bộ chương trình quản lý nước nhiều lần và ICT. Cần ghi đúng tỷ lệ cắt giảm tương ứng với công nghệ được phổ biến.

Dữ liệu cảm biến có thể được dùng để xác nhận việc thực hiện quản lý nước, nhưng không thể khẳng định rằng tất cả các điểm thí điểm đều được lắp cùng một loại thiết bị.

Không phải ai cũng lập tức hoan nghênh việc tháo nước giữa vụ. Với những nông hộ từ lâu tin rằng phải giữ ruộng ngập đầy nước thì cỏ dại mới không mọc và lúa mới phát triển tốt, việc chủ động tháo nước có cảm giác như một canh bạc nguy hiểm. Vẫn có những tiếng nói lo rằng lúa sẽ héo trong vài ngày mặt ruộng khô đi hoặc cỏ dại sẽ tranh thủ mọc lên. Muốn tin vào mực nước do thiết bị đo báo và đóng mở cửa dẫn nước theo đó, họ phải tạm gác lại kinh nghiệm lâu năm đã trở thành thói quen. Để vượt qua ngưỡng này cần một khoảng thời gian mà chỉ các con số là chưa đủ.

Những thay đổi do tháo nước giữa vụ tạo ra không dừng ở methane. Ở những ruộng thực hiện đúng biện pháp này, lượng nước ngập ruộng giảm từ 20 đến 30 phần trăm, đồng nghĩa lượng nước phải bơm từ nước ngầm và sông suối cũng giảm tương ứng. Trong một thí nghiệm đưa một năm bỏ hóa vào ruộng vốn chỉ trồng lúa hàng năm và dùng trí tuệ nhân tạo theo dõi sự dịch chuyển của nitơ trong đất, hiệu suất cây lúa hấp thụ nitơ hữu cơ trong đất đã tăng rõ rệt. Lúa hấp thụ được lượng phân bón đã bón xuống, còn lượng nitơ không được hấp thụ và bị nước mưa rửa trôi gây ô nhiễm sông ngòi giảm đi.

Những nơi máy kéo đi qua trên ruộng sẽ bị nén chặt. Mỗi lần bánh xe nặng lăn qua, khoảng trống giữa các hạt đất bị ép mất đi, rễ cây không xuyên qua được tầng đất đã cứng lại nên phải mọc lệch sang bên. Không thể dùng mắt thường để biết chỗ nào bị nén và mức độ nén ra sao. Vì thế, người ta bắt đầu sử dụng phương pháp kéo cảm biến cảm ứng điện từ truyền dòng điện xuống đất để đo độ dẫn điện của đất, rồi đưa số liệu vào mô hình học máy nhằm tính ngược mức độ nén theo từng độ sâu. Giống như máy dò mìn tìm kim loại dưới lòng đất, cảm biến này xác định vị trí của tầng đất cứng không thể nhìn thấy.

Trên bản đồ tính toán, nếu chỉ chọn những khu vực bị nén nghiêm trọng để đưa máy phá tầng đất dưới vào hoạt động, có thể mở đường cho rễ phát triển mà không cần cày xới toàn bộ ruộng. Tuy nhiên, phương pháp này cũng không hoàn hảo. Giá trị mà cảm biến cảm ứng điện từ đọc được còn chịu ảnh hưởng của độ ẩm và độ mặn của đất, nên số đo vào ngày sau mưa có thể khác với số đo vào ngày khô hạn. Vì vậy, không thể chỉ đo một lần rồi kết thúc mà phải đo lại mỗi khi mùa thay đổi.

Trên những cánh đồng trồng lúa mì và ngô, một giải pháp khác được áp dụng. Đó là kết hợp phương pháp không làm đất, giảm cày xới xuống mức tối thiểu và để nguyên thân lá còn lại sau thu hoạch trên mặt đất thay vì cày vùi, với biochar được nung như than và chất cải tạo chứa silic. Biochar chen vào giữa các hạt đất và giữ nước lại. Tại vành đai ngô của Hoa Kỳ, công nghệ cải tạo này đã được kiểm chứng bằng cách chồng dữ liệu chuỗi thời gian vệ tinh lên dữ liệu cảm biến độ ẩm dưới đất để tìm ra chênh lệch năng suất giữa từng khu vực, rồi tập trung nguồn lực vào những nơi có chênh lệch lớn.

Ngay cả trong năm hạn hán nghiêm trọng, năng suất trên những cánh đồng được bổ sung biochar và silic cũng giảm ít hơn.

Tại những vùng đất dốc ở miền núi như tỉnh Quý Châu, tây nam Trung Quốc, cách tiếp cận lại khác. Người ta kết hợp bản đồ địa hình thể hiện độ cao thấp với cảm biến độ ẩm đất để đưa nước và phân bón chính xác đến gần rễ theo phương thức tích hợp nước và phân bón. Cách làm này vừa ngăn đất bị nước mưa mùa mưa cuốn trôi, vừa giảm thất thoát dinh dưỡng chảy xuống sông suối dưới chân dốc. Tuy nhiên, chi phí nung biochar và vận chuyển ra đồng không hề nhỏ, còn chất lượng dao động theo loại gỗ và rơm dùng làm nguyên liệu, nên có những năm hiệu quả không đạt như kỳ vọng.

Phương pháp đốt khô truyền thống để đo carbon trong đất đốt mẫu đất ở nhiệt độ cao rồi đo lượng carbon dioxide giải phóng. Phương pháp ước tính chất hữu cơ dựa trên chênh lệch khối lượng tro còn lại sau khi đốt là phương pháp xác định hao hụt khi nung. Không được ghi hai phương pháp này là một. Ngay trong cùng một cánh đồng, giá trị ở góc được bón phân chuồng cũng khác với sườn dốc nhiều sỏi, vì vậy phải lấy mẫu tại nhiều điểm; số lượng và độ sâu mẫu được quyết định theo thiết kế thống kê và tiêu chuẩn kiểm chứng.

Cảm biến và vệ tinh giúp lựa chọn điểm khảo sát carbon trong đất và ước tính thay đổi trên một khu vực rộng. Trong các trường hợp do PatSnap giới thiệu có mẫu

quy mô nhỏ dùng hồng ngoại trung với R^2 0.83, phương pháp dựa trên Sentinel-2 với RPD 1.74, và phương pháp kết hợp GEDI-Sentinel với R^2 0.72. Do chỉ số và mẫu khác nhau, không thể chỉ dựa vào các con số để xếp hạng hơn kém. Màu sắc và hệ số phản xạ giúp thu hẹp những nơi cần khảo sát trong phòng thí nghiệm, còn mẫu thực địa neo các giá trị ước tính từ trên không vào mặt đất.

Đã có nghiên cứu tìm cách dùng học máy để dự đoán thành phần vi sinh vật trong đất. Trong bài báo đăng trên Scientific Reports năm 2026, R^2 cao nhất khoảng 0.57 xuất hiện ở dự đoán cấp ngành, không phải cấp loài. Độ chính xác giảm dần khi đi xuống các bậc phân loại chi tiết hơn như họ và chi, còn mô hình cấp loài không được trình bày. Hạn chế vẫn còn đó: quan hệ giữa các vi sinh vật học được ở một cánh đồng không thể áp dụng nguyên vẹn cho loại đất và mùa vụ khác. Không được thay đổi bậc phân loại để thổi phồng hiệu năng.

Carbon trong đất được giao dịch trên thị trường dưới dạng tín chỉ, nhưng giá trị thay đổi tùy theo phương pháp đo. Viễn thám có thể được dùng để theo dõi thay đổi trên khu vực rộng và xác định điểm lấy mẫu. VM0042 v2.1 của tổ chức chứng nhận quốc tế Verra không cho phép chỉ dùng viễn thám để tính toán thay đổi carbon hữu cơ trong đất mà yêu cầu đo đạc thực địa. Thay vì mô tả thuật toán và phân tích phòng thí nghiệm như hai phe thay thế lẫn nhau, cần giải thích quy trình hiệu chỉnh mô hình bằng mẫu thực địa và tính toán độ bất định.

Nền tảng của cuộc tranh luận này là quy trình kiểm chứng. Dù nông hộ nói rằng họ đã thực hiện tháo nước giữa vụ và bón biochar, nếu lượng cắt giảm không trải qua quá trình đo lường, ghi chép và xác nhận lại theo tiêu chuẩn quốc tế thì sẽ không được công nhận trên thị trường tín chỉ carbon hay tại cơ quan cấp trợ cấp của chính phủ. Quy trình đo lường, ghi chép và xác nhận này được gọi là MRV, viết tắt của giám sát, báo cáo và thẩm tra. Chỉ khi đưa giá trị đo của cảm biến, ảnh vệ tinh và dự báo do trí tuệ nhân tạo tạo ra vào cùng một quy cách tiêu chuẩn thì những con số đó mới trở thành tiền.

Vấn đề là bản thân quy trình tiêu chuẩn hóa này được thiết kế khác nhau theo từng quốc gia và từng tổ chức chứng nhận. Cùng là lượng methane cắt giảm trên một thửa ruộng, nhưng số tiền được công nhận lại khác nhau tùy nơi nộp hồ sơ. Nông hộ càng nhỏ thì càng khó tự mình đảm đương công việc giấy tờ này; họ chỉ nhận được tiền carbon sau khi trả phí cho công ty trung gian làm hồ sơ thay.

Không phải tất cả các thiết bị này đều có thể hoạt động nguyên vẹn ngoài đồng ruộng. Cảm biến bị chôn trong đất suốt nhiều tháng sẽ dần tích tụ muối trên bề

mặt, vi sinh vật bám vào thành một lớp màng mỏng, còn hơi ẩm ăn mòn mạch điện từng chút một. Những con số ban đầu chính xác bắt đầu dần sai lệch sau nửa năm hoặc một năm. Có nông hộ chăm chỉ bảo dưỡng cảm biến trong một hai năm đầu, nhưng rồi bắt đầu bỏ qua việc hiệu chuẩn vì những công việc khác luôn dồn lại vào mỗi vụ thu hoạch. Màn hình vẫn hiện số, nhưng không ai còn dám chắc những con số ấy nói lên điều gì.

Vì vậy, tại thực địa phải định kỳ hiệu chuẩn lại giá trị cảm biến, và dữ liệu của nông hộ bỏ qua công việc này sẽ mất độ tin cậy.

Chi phí cũng không nhỏ. Để trang bị thành một bộ gồm cảm biến chôn dưới đất, drone và dịch vụ phân tích trí tuệ nhân tạo, nông hộ nhỏ phải chịu khoản đầu tư ban đầu rất lớn. Vì vậy, ngày càng có nhiều ý kiến kêu gọi mở rộng các dịch vụ gần như miễn phí, chỉ cần dùng camera điện thoại thông minh chụp màu đất rồi gửi đi. Mục đích là mở ra cách đánh giá tình trạng đất chỉ bằng chiếc điện thoại trong tay mà không cần cảm biến chôn đất đắt tiền. Ai sở hữu dữ liệu này và dữ liệu sẽ được ghi vào tài khoản carbon dưới tên ai vẫn là vấn đề chưa được giải quyết.

Công nghệ trong tương lai đang hướng tới việc đưa toàn bộ thế giới dưới lòng đất vào máy tính. Người ta tạo ra bản sao số của đất, mô phỏng cách vi sinh vật, carbon và nước liên kết và vận động, rồi thử nghiệm trước trong đó bất kể khí hậu thay đổi ra sao sau ba mươi năm. Khi khối lượng tính toán lớn đến mức máy tính hiện nay không thể xử lý, cũng có dự báo rằng trí tuệ nhân tạo vận dụng nguyên lý máy tính lượng tử sẽ thu hẹp vô số khả năng nhanh hơn nhiều. Ngay lúc này, các tập đoàn lớn và viện nghiên cứu cấp quốc gia đã đi đầu trong những phép tính như vậy.

Tuy nhiên, vẫn còn vài bước nữa trước khi công nghệ này đến được tay người nông dân đứng trên bờ ruộng.

Rửa tay trên bờ ruộng rồi đứng dậy, chúng ta lại nhìn xuống đất. Không thể nhìn bằng mắt thường để biết một vốc đất này chứa bao nhiêu tấn carbon, hay con số đó sẽ được ghi trong sổ sách của công ty nào với giá bao nhiêu. Cảm biến, vệ tinh và mô hình đang lấp khoảng trống ấy, nhưng vẫn chưa ai có thể tự tin trả lời nên tin những con số hiện trên màn hình đến mức nào.

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Regenerative biochar for carbon sequestration and emerging technologies in soil organic carbon management for sustainable agriculture: A review. (2025).
<https://doi.org/10.54963/ia.v2i1.2335>
2. International Journal of Agriculture and Environmental Sciences. (2025). Application of machine learning algorithms for predictive modeling of climate-smart agriculture, 1(1).
<https://doi.org/10.64137/3108-088x/ijaes-v1i1p103>
3. AI for climate-smart agriculture: Precision sensing, crop intelligence, and resilient food systems. (2026). International Journal of Academic and Industrial Research Innovations Research Book Series.
<https://doi.org/10.62311/nesx/rb-978-81-999639-7-9>
4. Adoption of deep learning driven precision agriculture for optimizing crop productivity and soil health via predictive analytics and autonomous sensing mechanisms. (2026). Preprints.
<https://doi.org/10.20944/preprints202512.2764.v1>
5. Mapping climate smart agricultural interventions in rice cultivation: A lexicometric and systematic review of methane emissions and yield outcomes. (2026). Frontiers in Climate.
<https://doi.org/10.3389/fclim.2026.1779948>
6. International Rice Research Institute. (2025). Southeast Asia tackles methane emissions with new low-emission rice production project.
<https://www.irri.org/news-and-events/news/southeast-asia-tackles-methane-emissions-new-low-emission-rice-production>
7. Global Methane Hub. (2025, November 6). The Global Methane Hub announces \$30 million investment to fast-track research and development on low-emission rice.
<https://www.globalmethanehub.org/2025/11/06/the-global-methane-hub-announces-30-million-investment-to-fast-track-research-and-development-on-low-emission-rice/>
8. Artificial intelligence in soil microbiome-driven agriculture: From practical limits to a translational roadmap. (2026). Frontiers in Microbiomes.
<https://doi.org/10.3389/frmbi.2026.1860559>
9. Soil microbiome prediction using traditional machine learning and deep learning models. (2026). Scientific Reports.
<https://doi.org/10.1038/s41598-026-39537-w>
10. Abasiita, D. (2026, June 24). Why soil carbon markets hinge on a measurement few can agree on. Forbes.
<https://www.forbes.com/sites/daraabasiita/2026/06/24/why-soil-carbon-markets-hinge-on-a-measurement-few-can-agree-on/>
11. Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc. (2026). Vượt qua khủng hoảng khí hậu và năng lượng, xây dựng kỹ thuật trồng lúa carbon thấp. Thông cáo báo chí của Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc.
https://www.rda.go.kr/board/board.do?boardId=farmprmninfo&prgId=day_farmprmninfoEntry&currPage=1&dataNo=100000809507
12. PatSnap Eureka. (2026). Soil carbon measurement technology 2026. PatSnap.
<https://www.patsnap.com/resources/blog/rd-blog/soil-carbon-measurement-technology-2026-patsnap-eureka/>

6.2

Quản trị ESG tại nông hộ và liên kết cộng đồng địa phương

Trước khi mặt trời mọc, đứng trên bờ ruộng vẫn thấy trời tối. Người nông dân đã canh tác thửa ruộng này hơn ba mươi năm, và việc kiểm tra mực nước ruộng mỗi sáng sớm đã trở thành thói quen lâu đời. Nhưng hôm nay, chiếc điện thoại trong túi lên tiếng trước. Cơ sở chế biến gạo thu mua lúa nhắn rằng từ năm nay, ông phải ghi và gửi thông tin về giống lúa canh tác, ngày tháo nước và ngày cấp nước trở lại, cùng thời điểm và lượng phân bón.

Tin nhắn này bắt đầu từ phòng họp của trụ sở chính. Công ty bán cơm hộp không chỉ phải chịu trách nhiệm về nước thải phát sinh khi rửa hộp cơm. Họ còn phải ghi vào sổ sách của mình lượng carbon phát sinh từ ruộng lúa làm nên phần cơm trong hộp. Nguyên nhân là cổ đông và nhà đầu tư thúc ép công ty thực hiện cam kết trung hòa carbon. Trong ngành, lượng phát thải này được gọi là Scope 3. Từ 70 đến 90 phần trăm dấu chân carbon của doanh nghiệp thực phẩm nằm ở hạng mục này, và phần lớn trong số đó phát sinh tại những nông trại trồng nguyên liệu.

Dù lắp điện mặt trời trên mái nhà máy và đổi xe tải giao hàng sang xe điện, con số lớn vẫn nằm nguyên trên đồng ruộng. Đó là lý do công ty phải nhận được sổ ghi chép của nông dân trước thì mới hoàn thiện được sổ sách của mình.

Tình cảnh của nhân viên thu mua cũng không dễ dàng. Để đạt chỉ tiêu trụ sở chính giao xuống, họ phải thu cùng một biểu mẫu từ hàng trăm vùng nguyên liệu đã ký hợp đồng, nhưng có những năm gần một nửa thậm chí không phản hồi.

Những dữ liệu cần thu rất cụ thể. Theo hướng dẫn do công ty thông tin nông nghiệp Hoa Kỳ FarmRaise tổng hợp vào tháng 5 năm 2026, bên mua yêu cầu ảnh có ghi kèm vị trí và thời gian, thông tin có trồng cây che phủ hay không, ruộng được cày theo cách nào, loại phân bón được bón vào lúc nào và với lượng bao nhiêu. Họ đòi hỏi hồ sơ liên mạch từ một thửa ruộng qua khâu thu mua và chế biến cho đến báo cáo cuối cùng của công ty. Chỉ thị Báo cáo Phát triển Bền vững của Doanh nghiệp của Liên minh châu Âu đặt ra những tiêu chuẩn này vốn được xây dựng cho các công ty lớn.

Nhưng người thực sự điền vào các ô trống lại là một nông dân ngoài sáu mươi tuổi, một mình canh tác mười majigi ruộng. Đôi tay chỉ vừa đủ dùng điện thoại thông minh để gửi và nhận tin nhắn ấy phải nhập tọa độ vệ tinh và ngày bón phân vào bảng. Trước đây, giao lúa cho hợp tác xã nông nghiệp và nhận con dấu là hoàn tất giấy tờ cho cả năm. Giờ đây, con dấu ấy mới chỉ là khởi đầu.

Với nông hộ nhỏ, biểu mẫu công bố thông tin chuỗi cung ứng là một gánh nặng. Sau đề xuất Omnibus I năm 2025, Liên minh châu Âu đã hoàn tất vào năm 2026 một khuôn khổ giảm nghĩa vụ báo cáo và thẩm định về phát triển bền vững. Khuôn khổ này định hướng không được yêu cầu doanh nghiệp nhỏ trong chuỗi giá trị cung cấp dữ liệu vượt quá tiêu chuẩn tự nguyện theo luật định. Trong khoảng thời gian từ năm đề xuất được đưa ra đến năm cơ chế được hoàn tất, nông dân vẫn tiếp tục ghi ngày cấp nước vào cùng một cuốn sổ.

Ủy ban Dịch vụ Tài chính Hàn Quốc công bố lộ trình cuối cùng về công bố thông tin phát triển bền vững vào tháng 7 năm 2026. Nghĩa vụ công bố được áp dụng theo từng giai đoạn: năm 2028 đối với doanh nghiệp có tổng tài sản từ 10 nghìn tỷ won, và năm 2029 đối với doanh nghiệp có tổng tài sản từ 5 nghìn tỷ won. Scope 3 được áp dụng từ năm 2031, trước hết với doanh nghiệp có tổng tài sản từ 10 nghìn tỷ won. Thời điểm nông hộ phải nộp dữ liệu chuỗi cung ứng thay đổi tùy theo quy mô và phạm vi công bố của doanh nghiệp giao dịch.

Tác nhân AI nông nghiệp do Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc và Naver Cloud công bố năm 2025 hỗ trợ tư vấn canh tác và lập kế hoạch về nông thôn làm nông, đồng thời đề xuất khoảng 1.700 video đào tạo phù hợp với người dùng. Tính năng hình ảnh sâu bệnh được thông báo sẽ bổ sung trong nửa đầu năm 2026. Không thể viết ở thì hiện tại rằng tính năng này đã được bổ sung khi chưa xác nhận việc ra mắt thực tế. Tính năng tự động lập nhật ký canh tác và biểu mẫu công bố khi đó cũng chưa phải dịch vụ đã được công bố, mà là một hướng mở rộng có thể thực hiện trong tương lai.

Muốn kết nối giá trị cảm biến với công bố thông tin phát triển bền vững của doanh nghiệp, dữ liệu phải được chuẩn hóa theo tiêu chuẩn quốc tế. GRI 305 là tiêu chuẩn theo chủ đề và các hạng mục công bố về phát thải, còn GRI 101 đề cập đến đa dạng sinh học. Không thể giải thích rằng hai biểu mẫu mang số 305 và 101 sẽ được tự động điền. ESG Store của Bộ Nông nghiệp Đài Loan là thị trường kết nối nhu cầu đầu tư của doanh nghiệp với các dự án giảm nhẹ và thích ứng trong nông

ngiệp. Để giá trị cảm biến chuyển thẳng thành vốn đầu tư, vẫn cần thêm tiêu chuẩn đo lường, kiểm chứng và hợp đồng.

Dự án New Golden Corridor của Đài Loan nhằm giảm sử dụng nước ngầm và sụt lún đất dọc tuyến đường sắt cao tốc ở Chương Hóa và Vân Lâm. Dự án đi theo hướng trồng ngũ cốc tấp và cây màu thay cho cây trồng cần nhiều nước, đồng thời mở rộng tưới tiết kiệm nước. Hệ thống thông tin nông nghiệp của thành phố Cao Hùng thuộc một khu vực và một dự án khác. Khi các ruộng dọc tuyến bơm ít nước ngầm hơn, tốc độ sụt lún nền đất dưới đường ray cũng chậm lại.

Quản lý nước không phải việc duy nhất được lượng hóa. Canh tác duy trì thảm cỏ, cố ý để lại một phần cỏ dại trên mặt ruộng; không làm đất, chỉ đưa lưỡi cày xuống nông; và vùi rơm đã thu gom trở lại ruộng thay vì đốt đều giữ carbon trong đất. Người ta gọi carbon trong đất này là carbon vàng (Yellow Carbon), carbon trong cây cối và hoa màu là carbon xanh lá (Green Carbon), còn carbon trong bãi triều và biển là carbon xanh dương (Blue Carbon). Tên gọi được phân theo màu sắc, nhưng việc thực hiện trên ruộng là không đốt rơm mà cày vùi trở lại.

Kết quả thực chứng cũng cho thấy ruộng thực hiện đúng phương pháp tưới gián đoạn giảm hơn 30 phần trăm phát thải methane. Ở một số vùng nông thôn Đài Loan, nguồn vốn do doanh nghiệp cung cấp đã được chuyển thành hỗ trợ bữa ăn công cộng cho người cao tuổi.

Xu thế này cũng có những rào cản. Bên có khả năng chi trả chi phí ban đầu để lắp cảm biến và đặt máy chủ thường là những nông trại đã có quy mô. Trong khi đó, các nông hộ nhỏ cần lãi suất ưu đãi và tiền thưởng giá hơn lại dễ bị loại ngay trước ngưỡng cửa này.

Boomitra, hoạt động tại Ấn Độ, sử dụng vệ tinh và trí tuệ nhân tạo để ước tính thay đổi carbon trong đất trên diện tích nông nghiệp rộng lớn. Verra VM0042 không cho phép chỉ sử dụng viễn thám để tính toán thay đổi carbon hữu cơ trong đất. Cần có đồng thời mẫu thực địa, tiêu chuẩn độ sâu, hiệu chỉnh mô hình và kiểm chứng độc lập. Vệ tinh không thay thế việc lấy mẫu thực địa, mà giúp sàng lọc trước cần lấy mẫu ở cánh đồng nào và tại vị trí nào.

Tuy vậy, trí tuệ nhân tạo không giải quyết được mọi vấn đề. Dự án TRACE-RICE kiểm chứng truy xuất nguồn gốc gạo tại Bồ Đào Nha đã xây dựng một ứng dụng kết nối hồ sơ từ đồng ruộng đến bàn ăn bằng blockchain. Nhưng trở ngại mà nhóm nghiên cứu chỉ ra không phải công nghệ mà là con người. Nông dân càng

cao tuổi càng khó sử dụng ứng dụng trên điện thoại thông minh, và trong lần kiểm chứng đầu tiên năm 2023, mã QR được người tiêu dùng quét chỉ có 174 lượt. Nếu không được đào tạo và hỗ trợ liên tục, hồ sơ sẽ bị đứt đoạn ngay từ khâu dán mã QR.

Dù vậy, năm 2024 dự án đã mở rộng thêm ba khu vực giám sát và đưa cả Caravela, giống bản địa của Bồ Đào Nha, vào phạm vi theo dõi. Hồ sơ được cho là nối liền từ đồng ruộng đến bàn ăn sẽ trống ngay từ đầu vào khoảnh khắc một người ở ngoài đồng ngừng tham gia.

Nền tảng bữa ăn học đường do Quỹ Hợp tác và Phát triển Quốc tế Đài Loan hỗ trợ quản lý thực đơn, tồn kho và thông tin mua sắm. Hệ thống này cho phép xem trên một màn hình loại hàng hóa và số lượng được đưa vào từng trường. Mạng lưới thu hồi dùng blockchain để truy ngược về ruộng đồng chỉ trong vài giây không phải là chức năng đã được xác nhận của dự án này. Muốn truy xuất nguyên liệu bữa ăn đến tận nông trại, mã nhà sản xuất, lịch sử phân phối và quy trình thu hồi phải được kết nối thêm ở bên ngoài nền tảng.

Khi công nghệ đi vào làng, những tranh chấp mới cũng theo vào. Hãy hình dung một ngôi làng nơi hai mươi majigi ruộng dùng chung một hồ chứa. Nhiều cuộc kiểm chứng đã xác nhận rằng nếu đồng bộ phương pháp tưới gián đoạn, tháo nước vài ngày rồi cấp nước vài ngày, theo đơn vị hồ chứa thì có thể giảm mạnh phát thải methane. Vấn đề nằm ở bước tiếp theo. Khoản hỗ trợ do công ty cấp được tính theo tổng lượng nước mà cả hồ chứa tiết kiệm và được chuyển một lần cho làng. Những ruộng ở phía trên hồ thực sự phải tháo rồi cấp nước, tốn nhiều công sức, trong khi ruộng phía dưới chỉ nhận nước chậm hơn nhưng vẫn muốn chia cùng một khoản tiền.

Máy sấy và máy gặt đập liên hợp dùng chung cũng vậy. Trong một ngày, máy đi qua ruộng của nhiều hộ, nhưng thành tích tiết kiệm nhiên liệu lại được ghi dưới tên một hộ đã thao tác màn hình hôm đó. Nếu trong kỳ quyết toán tiếp theo chỉ hộ đó được đóng dấu vào hồ sơ vay lãi suất ưu đãi, những hộ còn lại dù cùng sử dụng máy vẫn bị coi là nông hộ không có thành tích.

Vì thế, quang cảnh nhà văn hóa làng vào ngày quyết toán đã khác trước. Trưởng làng mở máy tính xách tay và chiếu màn hình lên tường. Đồ thị mực nước hồ chứa và diện tích ruộng ghi theo từng nhà hiện cạnh nhau. Có người nhìn đồ thị rồi gặt đầu, có người lấy ngón tay chỉ vào số hiệu ruộng của mình và yêu cầu tính lại. Trước đây, tiền được chia dựa trên ước lượng bằng mắt và tình nghĩa tích lũy

sau nhiều năm; giờ đây, những con số trên màn hình quyết định. Có người cảm thấy con số ấy sai, nhưng trong làng không nhiều người có thể chỉ ra sai ở đâu và sai như thế nào.

Ngay từ đầu, drone và vệ tinh không thể chỉ chụp riêng một thửa ruộng. Ruộng nhà bên cạnh không đăng ký cũng lọt vào cùng một bức ảnh và được gộp vào dữ liệu của cả làng. Tình hình với kết quả bảo tồn đa dạng sinh học cũng tương tự. Một hãng ô tô phối hợp với nông hộ, hiển thị trên hệ thống định vị những nơi loài mèo rừng nhỏ có nguy cơ tuyệt chủng, mèo báo, thường xuất hiện như khu vực nguy hiểm. Nhưng nông hộ có ruộng cạnh nơi mèo báo đặc biệt thường xuyên được ghi hình có thể không hoàn toàn vui mừng trước tin này. Họ lo việc giám sát và quy định hạn chế sẽ lan sang cả ruộng của mình.

Đây là bối cảnh xuất hiện khái niệm chủ quyền dữ liệu nông hộ, theo đó số liệu phát sinh từ ruộng của tôi thuộc về tôi. Một nghiên cứu đăng trên tạp chí quốc tế *Intelligent Agriculture* năm 2025 chỉ ra rằng quá trình đưa trí tuệ nhân tạo vào nông nghiệp phải có trách nhiệm đạo đức và thiết kế lấy người dùng làm trung tâm thì mới có thể duy trì. Hiện chưa nơi nào có quy tắc quy định ở cấp làng quyền này sẽ được phân chia cho ai và như thế nào.

Ít nhất bản thiết kế cho phương pháp giảm gánh nặng này đã có. Đó là cấu trúc trong đó, vào khoảnh khắc nông dân nhấn nút tưới và mở bao phân bón, ứng dụng tự ghi lại chính thao tác ấy và tự động chuyển đổi sang biểu mẫu 305 và 101 mà con người không cần can thiệp. Có thể một ngày nào đó, cảm biến sẽ trả lời thay con người cả tin nhắn gửi đến vào sáng sớm. Nhưng cho đến trước ngày ấy, đôi tay mở tệp đính kèm và điền vào ô trống vẫn là đôi tay của chủ ruộng.

Nông hộ không thể làm việc này một mình. Năm chủ thể phải cùng hành động thì hệ thống mới vận hành được: công ty chế tạo cảm biến, ngân hàng cung cấp vốn, chính phủ đặt ra tiêu chuẩn, doanh nghiệp thực phẩm tiếp nhận dữ liệu và người nông dân ra đồng trông cửa dẫn nước. Nếu một bên chỉ chăm lo lợi ích của mình, dù các bên còn lại cố gắng đến đâu cũng không thể xử lý nổi một tờ giấy đã được đưa xuống tận bờ ruộng.

Câu hỏi còn lại đến cuối cùng vẫn là tiền. Lãi suất ưu đãi là một cơ chế tốt. Nhưng nó chỉ giảm lãi cho khoản tiền đi vay, không làm tăng giá bán lúa. Muốn tưới gián đoạn, phải kiểm tra mực nước ruộng vài lần mỗi ngày; muốn rải biochar, chất cải tạo đất được làm thành dạng than, lại phát sinh thêm một công việc trước đây không có. Theo tổng hợp của một nhóm nghiên cứu Ấn Độ trên tạp chí quốc tế

năm 2025, biochar là phương pháp rẻ và dễ thực hiện để lưu giữ carbon trong đất. Tuy nhiên, chữ rẻ ở đây chỉ nói đến giá nguyên liệu, chứ tiền công của người rải đều biochar trên ruộng không hề rẻ.

Thế nhưng khi xem phiếu quyết toán vào mùa thu, nhiều trường hợp giá lúa được chăm sóc theo cách này không chênh lệch đáng kể so với lúa ở thửa ruộng bên cạnh không áp dụng biện pháp nào. Trên thị trường đậu tương Hoa Kỳ, có những khu vực trả thêm từ 0.75 đến 1.25 đô la cho mỗi bushel, khoảng 27 kilogram, đối với một số giống đậu tương được ưa chuộng vì có thành phần dầu tốt. Phải có khoản cộng giá như vậy thì nông dân mới tiếp tục trồng cùng giống đậu vào năm sau.

Nếu giá không đổi, năm đầu họ đóng dấu hồ sơ vay và chụp ảnh trước mặt nhân viên phụ trách, nhưng từ năm thứ hai, khi việc giám sát thưa dần, họ sẽ lạng lẽ bỏ trước những công việc tốn nhiều công sức.

Đôi tay sửa cửa dẫn nước, kiểm tra mực nước hồ chứa và dán mã QR đều là đôi tay của cùng một người. Đến mùa thu, người nông dân lại đứng trên bờ ruộng ấy và đặt cạnh nhau hai dòng trên phiếu quyết toán. Một dòng là giá mỗi kilogram của lúa từ ruộng đã phải đếm từng ngày để tháo và cấp nước, dòng kia là giá mỗi kilogram của lúa ở ruộng bên cạnh không làm gì cả. Nếu hai con số bằng nhau, liệu người nông dân này có tìm được lý do để lặp lại công sức ấy vào năm sau không?

Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Sangwa, S., & Mutabazi, P. (2025). Artificial intelligence in agriculture: Ethical stewardship, responsible innovation, and governance for sustainable food systems. *Intelligent Agriculture*, 1(2), 25-45.
<https://doi.org/10.54963/ia.v1i2.1684>
2. Khatri, A., Kumar, K., & Thakur, I. S. (2025). Regenerative biochar for carbon sequestration and emerging technologies in soil organic carbon management for sustainable agriculture: A review. *Intelligent Agriculture*, 2(1).
<https://doi.org/10.54963/ia.v2i1.2335>
3. Gonçalves, C., Fernandes, J., & Brites, C. (2025). Blockchain-enabled traceability in the rice supply chain: Insights from the TRACE-RICE project. *Foods*, 14(21), 3711.
<https://doi.org/10.3390/foods14213711>
4. Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc. (2025). Phối hợp với Naver Cloud, lần đầu ra mắt tác nhân trí tuệ nhân tạo (AI) trong lĩnh vực nông nghiệp. Thông cáo báo chí của Cơ quan Phát triển Nông thôn Hàn Quốc.
https://www.rda.go.kr/board/board.do?mode=view&prgId=day_farmprmninfoEntry&dataNo=100000805404
5. Ủy ban Dịch vụ Tài chính Hàn Quốc. (2026). Lộ trình cuối cùng về công bố thông tin phát triển bền vững.
<https://www.fsc.go.kr/eng/pr010101/87276>

6. Talkington, I. (2026). Supply chain disclosure: What Scope 3 buyers are asking ag producers to prove. FarmRaise.
<https://www.farmraise.com/blog/2026-supply-chain-disclosure-scope-3-buyers-ag-producers>
7. Key ESG. (2026). CSRD food & agriculture sector report. Key ESG.
<https://resources.keyesg.com/hubfs/Whitepapers/CSRD%20Sector%20reports/KEY%20ESG%20CSRD%20Food%20&%20Agriculture%20Sector%20Report.pdf>
8. Verra. VM0042 v2.1 Frequently Asked Questions: Soil Carbon Measurement Requirements.
<https://verra.org/methodologies-main/frequently-asked-questions-vm0042/>
9. Committee on World Food Security. (2026). Harnessing AI, digitalization and data governance for food security and nutrition: Morning session [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=uQ-6ZL9UtvU>

6.3

An ninh lương thực toàn cầu và tương lai chuyển đổi số nông nghiệp

Khi tàu chở hàng rời cập cầu cảng ngũ cốc Nam Cảng Incheon, lúa mì, ngô và nguyên liệu thức ăn chăn nuôi được cần cầu dỡ xuống. Tỷ lệ tự túc ngũ cốc trung bình của Hàn Quốc trong giai đoạn 2023–2025 là 19.2 phần trăm, và có dự báo tỷ lệ này có thể giảm xuống 16.8 phần trăm vào năm 2035. Các tỷ lệ 1.5 phần trăm đối với lúa mì và 4.3 phần trăm đối với ngô là số liệu của năm 2024. Không được đặt số liệu trung bình và số liệu của một năm cụ thể như thể chúng thuộc cùng một thời điểm. Cơ chế giá cả và gián đoạn vận tải tại cảng nhập khẩu lan sang giá thực phẩm và thức ăn chăn nuôi trong nước bắt nguồn từ tỷ lệ tự túc thấp này.

Chỉ cần tàu cập bến này chậm một ngày, giá cả trong nước cũng dao động. Nhưng khi giá ngũ cốc thực sự tăng vọt, Hàn Quốc không phải quốc gia đầu tiên rơi vào nạn đói. Những quốc gia đang chìm trong xung đột và những nước không thể tự sản xuất ngũ cốc, phải hoàn toàn chịu tác động của giá mua vào, sẽ bị ảnh hưởng trước. Trong báo cáo năm 2026, Ngân hàng Thế giới dự báo chỉ số giá lương thực quốc tế sẽ tăng 2.5 phần trăm trong năm đó. Cơ quan này cảnh báo rằng nếu tình hình Trung Đông, thời tiết cực đoan và các biện pháp hạn chế xuất khẩu khiến nhiều nước cùng giữ ngũ cốc tại cảng xảy ra đồng thời, mức tăng hoàn toàn có thể vượt dự báo.

Theo báo cáo an ninh lương thực thế giới do Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc công bố năm 2026, có 645 triệu người chịu cảnh đói vào năm 2025. Con số này tương đương 7.8 phần trăm dân số thế giới và thấp hơn 43 triệu người so với mức đỉnh năm 2022. Số người chưa đến mức đói nhưng không đủ ăn là 2.1 tỷ người, giảm 86 triệu so với một năm trước. Dù vậy, vẫn có 2.7 tỷ người không đủ khả năng mua một chế độ ăn lành mạnh. Chi phí cho một chế độ ăn lành mạnh của một người trong một ngày đã tăng lên 4.28 đô la vào năm 2025.

Đây là mức tính theo sức mua tương đương (PPP), quy đổi mức giá khác nhau giữa các quốc gia về cùng một thước đo, và đã tăng rõ rệt so với 2.94 đô la năm 2017. Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc đặt tiêu đề cho báo

cáo lằn này là nạn đói không phải điều không thể tránh khỏi. Tiêu đề này xuất phát từ việc số người chịu cảnh đói đã giảm trong ba năm liên tiếp. Tuy nhiên, tốc độ giảm vẫn quá chậm để đạt mục tiêu năm 2030.

Đằng sau từng số liệu thống kê là con người. Khi giá ngũ cốc tăng ở một khu chợ vùng Sahel, người mẹ sẽ giảm khẩu phần của mình trước. Bát của con vẫn đầy như cũ, còn bát của mẹ chỉ có nước canh. Ở một số trại tị nạn bên kia biên giới, khẩu phần bị giảm xuống còn một bữa mỗi ngày. Bữa ăn học đường là tuyến phòng thủ cuối cùng chống lại nạn đói, nhưng khi ngân sách bị cắt giảm, tuyến phòng thủ đó bị hạ xuống trước tiên. Những cảnh tượng này không hiện trên bảng thống kê. Bảng chỉ ghi tổng số 645 triệu.

Đằng sau con số này có hai nhóm nông dân. Một bên là những chủ nông trại có cánh đồng thường xuyên được vệ tinh quét qua. Trí tuệ nhân tạo đọc đồng thời ảnh đa phổ do drone chụp và giá trị cảm biến cắm trong đất, rồi dự báo trước sản lượng tháng tới và nguy cơ sâu bệnh. Trí tuệ nhân tạo còn chia nhỏ đất để chỉ ra thời điểm và lượng nước cần tưới, cũng như khoảnh nào cần bón thêm phân theo phương thức bón phân biến đổi theo vị trí. Khi giá ngũ cốc bắt đầu dao động, chủ nông trại này có điều kiện khóa trước giá trên thị trường kỳ hạn hoặc đẩy sớm thời vụ gieo trồng.

Bên kia là các nông hộ nhỏ ở châu Phi và Nam Á. Tại các nước đang phát triển, nông hộ nhỏ chiếm 80 phần trăm tổng số nông dân, nhưng trong tay họ thường chỉ có một chiếc điện thoại phổ thông với màn hình nứt vỡ. Có nơi, cước dữ liệu liên lạc trong vài ngày tương đương chi phí cho một lần sử dụng ứng dụng chẩn đoán. Một nghiên cứu công bố năm 2026 chỉ ra các yếu tố tạo nên khoảng cách này gồm kết nối internet không ổn định, giá thiết bị vượt khả năng chi trả, trình độ kỹ năng số thấp và mất điện thường xuyên. Trí tuệ nhân tạo có sức mạnh thay đổi nông nghiệp, nhưng sức mạnh ấy trước hết nghiêng về phía những nông hộ đã có sẵn nguồn lực.

Ngay cả khi một nông hộ nhỏ ở ven ruộng tại Kenya hoặc Rwanda chụp chiếc lá bị bệnh và định tải lên ứng dụng chẩn đoán, kết nối bị ngắt sẽ khiến ảnh không được gửi đi, còn biểu tượng tải cứ quay trên màn hình. Trái lại, máy gặt đập liên hợp ở Iowa gửi dữ liệu sản lượng lên đám mây liên tục ngay cả khi đang chạy. Ảnh vệ tinh chụp vào ngày mây dày có thể không đọc đúng bề mặt đất khiến dự báo sai lệch, nhưng phía có nhân lực và thiết bị để hiệu chỉnh sai số vẫn là nông trại giàu

nguồn lực. Các mô hình trí tuệ nhân tạo phần lớn được huấn luyện bằng ảnhnhững cánh đồng rộng ở Hoa Kỳ hoặc châu Âu.

Vì vậy, khi nhìn ảnh những thửa ruộng châu Phi nhỏ hẹp trồng xen nhiều loại cây, mô hình thường đưa ra câu trả lời sai.

Ngôn ngữ cũng là một rào cản. Phần lớn mô hình ngôn ngữ lớn được huấn luyện trước bằng những ngôn ngữ có nhiều người dùng như tiếng Anh, tiếng Trung Quốc và tiếng Tây Ban Nha. Những ngôn ngữ như Swahili hoặc Hausa, dù có hàng chục triệu người sử dụng nhưng ít được lưu lại dưới dạng văn bản trên internet, bị xếp sau. Khi một nông hộ nhỏ Kenya hỏi về sâu bệnh bằng tiếng Swahili, có trường hợp mô hình trả lời sai hoặc hoàn toàn không hiểu. Ngôn ngữ có nhiều dữ liệu hơn giúp mô hình chính xác hơn, và độ chính xác ấy lại thu hút thêm người sử dụng ngôn ngữ đó. Ngôn ngữ ít dữ liệu vẫn nằm ngoài vòng tuần hoàn này.

Trước và sau khủng hoảng ngoại hối, nhiều công ty hạt giống trong nước Hàn Quốc đã rơi vào tay vốn nước ngoài. Seoul Seed, Hungnong Seed và Joongang Seed lần lượt bị bán, còn Cheongwon Seed, được biết đến khi đó là doanh nghiệp đứng thứ bảy trong ngành, cũng bị một công ty nước ngoài mua lại. Xu hướng không chỉ đi theo một chiều. Năm 2012, FarmHannong đã mua lại một phần quyền kinh doanh hạt giống của Monsanto Korea. Muốn hiểu nguy cơ dữ liệu hạt giống và máy nông nghiệp tập trung trên máy chủ của một số ít doanh nghiệp, phải xem xét cả hai chiều bán đi và thu hồi.

Chính phủ Ấn Độ khởi động giai đoạn 1 của Bharat Vistaar vào ngày 17 tháng 2 năm 2026. Hệ thống này kết nối tri thức nông nghiệp và dịch vụ công bằng AI, còn UFSI của AgriStack trao đổi dữ liệu trên cơ sở được cấp phép và có sự đồng ý của nông dân. Việc được kết nối không có nghĩa bất kỳ ai cũng có thể truy xuất mọi dữ liệu. CIMMYT cung cấp nguồn vật liệu di truyền miễn phí hoặc với chi phí tối thiểu cho mục đích nghiên cứu, chọn tạo giống và đào tạo. Việc thương mại hóa hạt giống hoàn chỉnh sử dụng giấy phép không độc quyền hoặc gần như độc quyền.

Một bản tin năm 2026 về đầu tư vào các công ty khởi nghiệp công nghệ nông nghiệp và thực phẩm Hàn Quốc đưa tin mức tăng là 171 phần trăm dựa trên số liệu chưa làm tròn. Nếu chỉ tính từ hai số liệu được nêu cùng trong bài là 97 triệu đô la và 253 triệu đô la, mức tăng vào khoảng 161 phần trăm, vì vậy phải xem số tiền trước khi làm tròn. Theo AgFunder, đầu tư công nghệ nông nghiệp và thực

phẩm toàn cầu năm 2025 là 16.2 tỷ đô la. Thị trường AI nông nghiệp và tổng đầu tư công nghệ nông nghiệp và thực phẩm là hai thị trường có phạm vi khác nhau. Muốn so sánh các con số, trước hết phải xem chúng có đo cùng một phạm vi hay không.

Trong năm năm tới, nhiều khả năng ảnh vệ tinh, mô hình chạy trên thiết bị, dịch vụ giọng nói bằng ngôn ngữ địa phương và dịch vụ cho thuê máy nông nghiệp sẽ được mở rộng. Tuy nhiên, đây là dự báo của tác giả, không phải sự thật hiện tại đã được xác nhận. Thời điểm các nông trại ở nước thu nhập trung bình nhận được cảnh báo chính xác hơn và giống chống chịu đến được với nhiều nông hộ nhỏ hơn phụ thuộc vào mạng viễn thông, đăng ký giống và chuỗi cung ứng hạt giống. Dự báo rằng hạ tầng công tương tự Bharat Vistaar sẽ xuất hiện ở nhiều quốc gia cũng được trình bày như một kịch bản có điều kiện.

Lưới điện, tháp viễn thông và mạng lưới phân phối hạt giống thay đổi chậm hơn mô hình trí tuệ nhân tạo. Cấu trúc dữ liệu và bằng sáng chế tập trung vào một số ít doanh nghiệp, cùng vấn đề các hiện tượng thời tiết cực đoan chưa từng có làm mô hình dao động, cũng khó biến mất trong thời gian ngắn. Chưa xác định được thời điểm chủ quyền dữ liệu nông hộ trở thành điều ước quốc tế và máy tính lượng tử tính toán toàn bộ lượng nước và carbon của Trái Đất. Trong khi từng con chip giá rẻ được cắm xuống bờ ruộng, quy mô máy chủ tập trung dữ liệu có thể tăng nhanh hơn thế.

Cần cầu ở cảng Incheon hôm nay vẫn xúc lúa mì. Cho đến khi lúa mì ấy trở thành mì sợi và bánh mì trên bàn ăn, nông hộ nhỏ cầm chiếc điện thoại phổ thông nứt màn hình không xuất hiện ở bất kỳ đâu trong phép tính này. Khi trong vòng năm năm, trí tuệ nhân tạo dùng ảnh vệ tinh đã rẻ hơn và chip nhanh hơn để đọc từng góc ngách của cánh đồng ngô và lúa mì, ai sẽ là người đầu tiên nhận được kết quả tính toán đó?

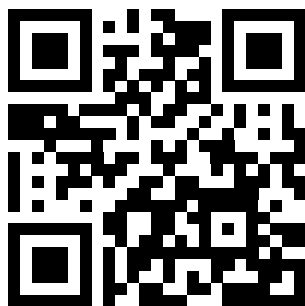
Nguồn và tài liệu tham khảo

1. Sangwa, S., & Mutabazi, P. (2025). Artificial Intelligence in Agriculture: Ethical Stewardship, Responsible Innovation, and Governance for Sustainable Food Systems. *Intelligent Agriculture*, 1(2). <https://doi.org/10.54963/ia.v1i2.1684>
2. Press Information Bureau, Government of India. (2026). Rollout of BHARAT-VISTAAR Platform. <https://www.pib.gov.in/PressReleaseframePage.aspx?PRID=2239788>
3. SHARE GENES. (2026). Predictive Breeding: Bridging Genetics, Artificial Intelligence and Agriculture | Dr. B. M. Prasanna [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FWcxeEC90JA>

4. Committee on World Food Security. (2026). Morning Session: Harnessing AI, Digitalization and Data Governance for Food Security and Nutrition [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=uQ-6ZL9UtvU>
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2026). SOFI 2026: Hunger not inevitable, FAO says as global hunger report shows progress. FAO Newsroom.
<https://www.fao.org/newsroom/detail/sofi-2026--hunger-not-inevitable--fao-says-as-global-hunger-report-shows-progress/en>
6. World Bank. (2026). When risks stack up: Threats to global food markets in 2026. World Bank Blogs.
<https://blogs.worldbank.org/en/developmenttalk/when-risks-stack-up--threats-to-global-food-markets-in-2026>
7. Financial News. (2026). Tỷ lệ tự túc ngũ cốc của Hàn Quốc dự kiến rơi xuống mức 16 phần trăm vào năm 2035...an ninh lương thực trở nên mong manh.
<https://www.fnnews.com/news/202607020630507050>
8. AgFunder. (2026). Global AgriFoodTech Investment Report 2026.
<https://agfunder.com/research/agfunder-global-agrifoodtech-investment-report-2026/>
9. Phys.org. (2026). AI offers promise for agriculture, but smallholder farmers risk being left behind.
<https://phys.org/news/2026-06-ai-agriculture-smallholder-farmers-left.html>
10. NewsPim. (2026, ngày 22 tháng 6). [Đọc kinh tế bằng AI] Kỳ nguyên hạt giống trở thành quyền lực bá chủ..."cuộc chiến hạt giống trị giá 62 tỷ đô la" đã bắt đầu.
<https://www.newspim.com/news/view/20260622000833>
11. NewsPim. (2026, ngày 23 tháng 6). [Đọc kinh tế bằng AI] Những hạt giống bị IMF bán đi...25 năm chủ quyền hạt giống của Hàn Quốc.
<https://www.newspim.com/news/view/20260622001057>
12. NewsPim. (2026, ngày 27 tháng 6). [Đọc kinh tế bằng AI] Sau bán dẫn K là hạt giống K...hãy chuyển Cơ quan Phát triển Nông thôn thành nền tảng công nghiệp.
<https://www.newspim.com/news/view/20260626000833>

Hãy ủng hộ cuốn sách này

Nếu cuốn sách này hữu ích với bạn, hãy hỗ trợ các bản dịch,
ấn bản công khai và dự án tri thức AI mở qua PayPal.



PayPal

<https://paypal.me/kimkjkj>

Quét mã QR hoặc mở liên kết ở trên.