全球智慧农业的模式比较与演化趋势

杨 明，胡冰川*

（中国社会科学院农村发展研究所，北京 100029，中国）

摘 要：［**目的/意义**］智慧农业是全球应对粮食安全、气候变化与劳动力老龄化挑战、培育农业新质生产力的战略选择。本文旨在系统比较全球智慧农业模式、揭示其分化机制与演化趋势，以期为中国构建自主可控且开放协同的智慧农业体系提供理论参考与实践依据。［**进展**］基于诱致性创新理论与制度比较分析视角，构建“驱动主体–制度环境–技术路径–价值取向”四维分析框架，识别出商业化大农场智慧农业的美国模式、绿色化集约智慧农业的欧盟模式、精细化协同智慧农业的日本模式、节水化创新智慧农业的以色列模式，以及集成化协同智慧农业的中国模式。分析发现，全球智慧农业正从单点技术引入、国别分散发展，向数据驱动、智能决策、开放协同的系统集成与趋同演化转变；然而仍面临核心技术封闭、数据治理碎片化、小农户接入鸿沟扩大与国际规则博弈加剧等挑战。全球智慧农业呈现出技术上从数字化精准作业到智能化自主决策、组织上从单主体推动走向开放生态共治、数据上从孤岛走向跨境互操作与要素市场化、价值上从单一增产走向绿色低碳与韧性导向、治理上从规则碎片化走向多边协同共建的演化趋势。［**结论/展望**］中国作为大国小农国情的代表性经济体，可在五维协同推进中承担技术供给者、制度试验者与规则共建者的复合角色，与各国共同推动全球智慧农业走向更具包容性的共生格局。

关键词：智慧农业；数据驱动；智能决策；新质生产力；农业基础模型；开放协同；大国小农

中图分类号：S126；F323 **文献标识码：**A **文章编号：**SA202605001

引用格式：杨明，胡冰川 . 全球智慧农业的模式比较与演化趋势[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(3): 1-12. DOI：10.12133/j.smartag.SA202605001

YANG Ming, HU Bingchuan. Comparison and Evolutionary Trends of Global Smart Agriculture Models[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(3): 1-12. DOI：10.12133/j.smartag.SA202605001 (in Chinese with English abstract)

0 引 言

加快建设农业强国、培育农业新质生产力是新时代中国农业现代化的战略主线，智慧农业则被视为支撑这一主线的重要载体。2024 年，农业农村部印发《关于大力发展智慧农业的指导意见》及《全国智慧农业行动计划（2024—2028 年）》，将智慧农业确立为建设农业强国的战略制高点；2025 年，《中共中央 国务院关于进一步深化农村改革 扎实推进乡村全面振兴的意见》首次将“农业新质生产力”写入中央一号文件，明确“支持发展智慧农业”。2026 年，《中共中央 国务院关于锚定农业农村现代化 扎实推进乡村全面振兴的意见》进一步提出“促进人工智能与农业发展相结合，拓展无人机、物联网、机器人等应用场景”，中国智慧农业正由顶层部署迈入加速落地的关键阶段。然而，中国推进智慧农业仍受大国小农基本国情的多重约束，耕地资源刚性紧约束、农村劳动力持续外流、小农户碎片化经营、高端传感器与农业基础模型核心算力存在“卡脖子”风险、农业数据要素市场化机制尚未健全等问题相互交织，由“加大部署”迈向“高质量落地”仍亟待破题。事实上，从全球范围看，受要素禀赋、制度传统与价值偏好的多重耦合作用，不同经济体并未沿单一最优路径展开，而是在驱动主体、制度环境、技术路径与价值取向等维度演化出高度差异化的实践形态。基于此，面向全球农业转型与中国农业现代化的双重战略目标，

收稿日期：2026-04-30

基金项目：国家社会科学基金项目（23ZDA045）

作者简介：杨 明，博士，助理研究员，研究方向为社会创业与智慧农业。E-mail：nfs-yangming@cass.org.cn

*通信作者：胡冰川，博士，研究员，教授，研究方向为农产品贸易与智慧农业。E-mail：hubch@cass.org.cn

copyright©2026 by the authors （登录 www.smartag.net.cn 免费获取电子版全文）

本文系统识别全球智慧农业典型模式的特征性分化，揭示其分化的形成机制，并研判其未来演化方向。这既有助于厘清全球智慧农业模式分化的形成逻辑，亦为中国参与全球智慧农业体系共建提供经验参照。

现有文献围绕智慧农业相关议题展开了广泛探讨，主要分为以下四类。一是国别模式比较与经验借鉴研究。从政策工具、技术路线与产业组织等维度系统刻画了美国、欧盟、日本、韩国、以色列等典型经济体的智慧农业实践，并提炼出对中国的启示[1,2]。二是技术体系与赋能机理研究。从早期的物联网架构与可互操作空间[3]转向人工智能物联网、计算机视觉与精准作业[4,5]，以及低空精准农业航空、智能装备本土化[6]，并进一步延伸至农业基础模型与多模态大模型应用[7,8]，同时强调发展中国家情境下智慧农业供给的迫切性[9]。三是测度评估与发展指数研究，重在从指数构建、规模刻画与效应识别等维度对中国智慧农业发展水平进行量化评估[10,11]。四是政策与社会影响研究，主要聚焦智慧农业的底层逻辑、运营模式，以及现实约束等方面[12,13]。既有研究为本文深入探究全球智慧农业模式奠定了良好基础，但仍存在明显不足：一是多以国别拼盘形式呈现，缺乏统一的比较分析框架；二是模式分化的形成机制解释多停留于要素禀赋层面，未能充分揭示诱致性创新、路径依赖、反垄断传统机制与规则博弈四重机制的时序触发与耦合作用；三是演化趋势研判偏重技术维度，对技术、组织、数据、价值、治理五维协同演进的整体把握尚显不足。

基于此，选取美国、欧盟、日本、以色列和中国5个具有代表性的经济体作为比较对象，构建涵盖驱动主体、制度环境、技术路径与价值取向的四维分析框架，系统刻画其智慧农业典型模式，在揭示模式分化形成机制的基础上，从技术、组织、数据、价值与治理5个维度提炼全球演化趋势。本文可能的边际贡献体现在三个层面：第一，在分析框架层面，运用该四维框架系统识别并阐释商业化大农场、绿色化集约、精细化协同、节水化创新与集成化协同5种典型模式的生成逻辑；第二，在机制解释层面，引入诱致性创新、路径依赖、反垄断与规则博弈四重机制，对其时序触发与张力耦合作用进行过程追踪式解释，深化全球智慧农业模式分化的形成机制理解；第三，在趋势研判层面，从技术、组织、数据、价值、治理五维共演的视角研判全球智慧农业演化趋势，为中国从模式分化走向协同共生、从技术跟跑走向规则共建提供路径参考。

1 全球智慧农业典型模式比较

1.1 全球智慧农业模式比较的四维分析框架

全球智慧农业的差异化实践，需要置于统一的分析框架下进行比较。本文基于诱致性创新理论与比较制度分析视角，构建“驱动主体-制度环境-技术路径-价值取向”四维分析框架。其中，驱动主体维度刻画推动智慧农业发展的核心行为体特征，包括私营企业研发投入占比、风险资本累计规模及国家专项资助强度等指标；制度环境维度刻画制度供给的强度与协同度，包括智慧农业相关专项法律法规数量、农业财政补贴占国内生产总值比重、数据治理规则的体系化程度等指标；技术路径维度刻画主导技术的代际特征与覆盖广度，包括主导技术所处代际、关键平台的农场覆盖率与设备采用率等指标；价值取向维度刻画发展目标的优先序列，包括官方政策文本中绿色低碳、可持续、韧性、小农包容性等关键词频次及硬性减排约束的法定程度等指标。

样本选取上，遵循理论代表性、全球影响力与数据可得性三重原则，选定美国、欧盟、日本、以色列和中国作为典型案例。理论代表性上，美国、欧盟、日本、以色列和中国分别对应市场驱动、规则驱动、政府引导、约束诱致与战略引领5种典型机制，覆盖了智慧农业发展的主要制度光谱；全球影响力上，美国、欧盟、日本、以色列和中国合计占据全球农业科技核心专利、农业食品科技融资与农业出口贸易额的主要份额；数据可得性上，美国、欧盟、日本、以色列和中国均具备较完整的官方统计、政策文本和第三方评估数据。此外，韩国、巴西、印度等同样具有重要参考价值的经济体未纳入主体比较，主要原因在于韩国智慧农业的发展逻辑与日本存在较强相似性，可视为“政府引导-平台共治”模式的延伸；巴西、印度等新兴经济体的智慧农业仍处在起步阶段，制度供给与技术路径尚未稳定成型。

1.2 商业化大农场智慧农业模式——美国

美国智慧农业模式以商业化驱动与大农场承载为特征，由风险资本、装备厂商与农化巨头构成的私营部门主导技术供给与扩散，依托高度规模化的大田经营释放规模红利。从驱动主体看，约翰迪尔

（Deere & Company, John Deere）、爱科、凯斯纽荷兰把持硬件层，气候公司、孟山都-拜耳通过并购整合将数字技术嵌入“种子-农药-农艺”整体方案；2024年美国农业食品科技融资约66亿美元、同比增长14%，占全球41%、居全球首位[14]，公共部门主要经国家食品与农业研究所的“人工智能研究院”系列扮演补充角色。从制度环境看，美国呈“轻规制、强基础设施”特征，2018年《农业法案》以补贴、贷款与担保强化农村宽带支持，并经“农村创新增强经济”计划推动数字基础设施建设[15]，“农村连接重建”计划累计投入约54亿美元用于偏远地区高速宽带[16]；数据治理无专门立法，主要依托Ag Data Transparent等行业自律框架，体系化程度较低。从技术路径看，主导技术处于第三代精准农业向第四代人工智能物联网过渡阶段。据美国农业部经济研究局2023年报告，六大作物自动导航辅助驾驶已覆盖过半种植面积，并呈大农场70%、中型52%、小型仅9%的梯度[17]；约翰迪尔变量喷雾系统2024年覆盖超40.5万 hm^2，较广播喷施平均降低除草剂用量59%[18]。从价值取向看，美国政策聚焦商业回报、规模经济、出口竞争力与供应链安全，绿色环境绩效主要依托自愿性补贴推动、硬约束相对薄弱[19]，《国防生产法》进一步将农业芯片、关键传感器纳入战略物资[20]。该模式以私营平台释放技术深度，却因寡头化加剧数据封闭，跨厂商互通虽经云对云接口在主要厂商间初步实现，但市场逻辑难以独自化解农业的公共物品属性，小农户接入门槛反高于规模化农场，构成美国模式向其他国家扩散的根本约束。

1.3 绿色化集约智慧农业模式——欧盟

欧盟智慧农业模式以荷兰、德国为主要代表，核心特征是绿色化规制与集约化生产相互嵌入：绿色化源自将生态价值嵌入农业治理的强规制传统，以硬约束指标驱动减药、减肥、减抗；集约化体现为单位面积高产出的园艺、温室与精准管理体系，以高科技投入换取土地资源的高效产出。从驱动主体看，欧盟由超国家规制机构、成员国农业部与农户协会构成“三元共治”，欧盟委员会经共同农业政策（Common Agricultural Policy, CAP）、《从农场到餐桌战略》设定目标函数，欧洲农民与农业合作社总会代表小农参与规则制定，公立科研体系承担基础技术供给，私营企业须在规制框架内组织扩散，与美国“私营主导”形成鲜明对比[21]。从制度环境看，欧盟构成全球最为体系化的农业治理框架，其体系化不仅在于财政投入的规模与稳定，更在于以预算硬约束将绿色目标嵌入政策内核：作为财政支柱，CAP在2021—2027周期预算约3 866亿欧元，其中第一支柱至少25%被硬性挂钩环境与气候目标[22]；《通用数据保护条例》《数据法案》《数据治理法案》经欧盟农业数据空间延伸至农业，2025年4月覆盖15个成员国的部署行动正式启动。从技术路径看，主导技术处于第三代精准农业的规模化合规嵌入阶段，数字创新中心网络覆盖27个成员国、超140个节点，DataConnect作为全球首个云对云农机数据互通协议于2021年扩展至多个品牌[23]；荷兰为高端集约代表，2025年农产品出口1 375亿欧元、居世界第二[24]，德国则将工业4.0延展至农机生态。从价值取向看，欧盟以绿色低碳、生物多样性、可持续与小农包容为核心序列，硬性减排约束法定化程度全球最高，《从农场到餐桌战略》明确2030年化学农药使用与风险减半、合成肥料减少20%、有机农业达25%；规制亦见显著成效，荷兰化学植保产品销售自2020年下降近25%、兽用抗生素自2009年下降75%[25]。

1.4 精细化协同智慧农业模式——日本

日本智慧农业模式的核心特征是精细化作业与多主体协同。精细化体现为单位耕地高密度精准管理与机器人代替人作业，协同则体现为政府、研究机构、农协与企业借助公共平台共治化解小农碎片化，其根源在于超老龄化与小规模分散经营的双重稀缺。从驱动主体看，日本由科研机构、农协（Japan Agricultural Cooperatives, JA）与本土企业构成政府主导色彩显著的协同格局：农研机构（National Agriculture and Food Research Organization, NARO）将智慧农业划分为遥感、人工智能、机器人三大方向并承担关键技术研发，农协凭借覆盖农业全流程的多层级服务体系，发挥联合政府、农民、高校与企业的枢纽作用，打通技术扩散的“最后一公里”，久保田、井关、洋马等本土企业则面向小型田块与丘陵山地推进装备的小型化、智能化转化[26]，与美国“私营主导”、欧盟“规制主导”形成鲜明对比。从制度环境看，日本以“基本计划+开放接口指南+协议会共治”为基础架构，2024年修订《食物、农业、农村基本法》并据此新订基本计划，将数据驱动型农业列为主攻方向；2021年《农业领域开放API建设指南》以非歧视性开放接

入与农业数据协同平台（Agricultural Data Collaboration Platform, WAGRI）兼容的标准化数据格式破除异厂商壁垒，WAGRI将基础数据与预测功能封装为标准化接口，其商业化应用程序接口（Application Programming Interface, API）由2019年的59个增至2025年8月末的223个，使数据价值由生产端向流通、销售环节传导[27]。从技术路径看，主导技术处于第三代为主、第四代起步阶段，WAGRI协议会成员由启动初期不足百家扩展至2026年1月的530社，成为亚太少有的公共数据基础设施样板；NARO联合企业研发的自动插秧机、果园采摘与设施巡检机器人陆续投入应用，并以小型无人机匹配零碎化田块，在小尺度精细作业与机器替人方向居全球前列[28]。从价值取向看，日本以老龄化适应、农村社区维系、食物自给率与小农包容为核心序列，2025年基干农业从业者降至约102万人、65岁以上占69.5%，人均耕地仅0.033 hm^2[29,30]，故“替人增效”而非“减药减肥”成为价值主导，硬性减排约束相对柔性。综合看，该模式以平台共治化解了小农碎片化，但单位平台投资回报偏低、跨语言数据出海受限，向海外扩张面临天花板。

1.5 节水化创新智慧农业模式——以色列

以色列智慧农业的核心特征是水资源紧约束诱致的节水化技术演化与创新立国战略驱动的全链路升级，构成全球以单一资源约束发育出完整智慧农业产业的样本。从驱动主体看，以色列由国家研发体系、军工技术外溢、风险投资与基布兹/莫沙夫基层组织构成“四位一体”创新生态，创新管理局经“磁石计划”“先驱者计划”持续向农业科技投入，火山农业研究中心衔接基础研究与应用研究，军工部门的传感、通信与机器人技术向农业外溢，2018年成立的农业成长平台将初创企业、研究机构与全球伙伴拢入同一生态，基布兹与莫沙夫等基层组织作为新技术应用与商业化的试验场。从制度环境看，以色列以水资源立法、国家研发资助与创新政策的高度协同为特征，1959年颁布的《水法》将水资源国有化、授权主管机构统一调度，成为后续节水技术诱致创新的制度起点[31]；与美国“轻规制”、欧盟“重规制”不同，以色列形成“资源紧约束立法+国家创新研发资助”双重供给结构。从技术路径看，主导技术沿“滴灌-再生水-智能水分管理-温室-奶业-植保-传感”全链条扩展，第三代精准节水成熟、第四代人工智能水分管理领先；全球滴灌龙头耐特菲姆覆盖110个国家、约4 500名员工，2024年与菲泰克合作将精细传感与人工智能推荐嵌入精准滴灌方案[32]，据经济合作与发展组织评估，以色列逾87%的处理废水用于灌溉、最高水利用率可达95%、居全球首位[33]。从价值取向看，以色列以水资源安全、技术输出与国家品牌为核心序列，国土六成以上干旱半干旱使节水成为维系农业的刚性约束，市场规模有限则决定技术须以国际化为出路，塑造“以色列研发+全球应用”的输出导向。该模式难以被简单复制，根源在于其依赖独特的四位一体生态而非单一节水技术，且市场有限与地缘政治风险构成长周期资产的内在约束。

1.6 集成化协同智慧农业模式——中国

中国智慧农业的核心特征是多技术体系集成与多元主体协同，表现为国家战略主导下“大国小农”国情与北斗、5G、人工智能等数字基础设施领先优势耦合形成的发展路径。从驱动主体看，中国由国家战略、龙头企业、科研院所、合作社与小农户构成“五元协同”，龙头企业系统切入农业，国家级科研机构与企业形成“市场-科研”双轮驱动，中国科学院主导的伏羲农场整合跨学科力量，基层依托合作社与社会化服务组织实现技术下沉。从制度环境看，中国以高强度政策密度迭代为特征，形成“中央一号文件+部委专项计划+数据要素行动”三层叠加，如2025年以来连续两年中央一号文件将农业新质生产力培育与人工智能赋能农业纳入顶层框架，2024年《“数据要素×”三年行动计划》将农业列为重点领域之一，与《数据安全法》《个人信息保护法》共同构成数据治理基本架构。从技术路径看，主导技术处于第三代加速向第四代过渡阶段，关键平台覆盖率与设备采用率在大田规模化作业领域已居世界前列：2025年农业科技进步贡献率超64%、综合机械化率达76.7%、高标准农田累计建成6 667万 hm^2，植保无人飞机保有量30.9万架、作业约1.67亿 hm^2次、均居世界首位[34]；极飞科技2024年营收10.66亿元、同比增长73.4%、全球市占17.1%[35]，大疆农业累计无人机超30万台、作业超5亿 hm^2次、覆盖100多个国家和地区[36]；中国科学院伏羲农场以呼伦贝尔为示范基地完成1 213 hm^2黑土地无人化作业，其人工智能水肥一体化滴灌相比喷灌在节水36.7%条件下增产2.2%[37]。从价值取向看，中国以粮食安全、新

质生产力培育、乡村振兴、绿色低碳与科技自立自强为复合序列，兼顾底线约束与前沿突破的双重需求。该模式的内在张力在于高端传感器、农业基础模型核心算力与关键元器件存在“卡脖子”风险，小农户碎片化经营加大信息化适配难度，由“加大部署”迈向“高质量落地”仍面临中长期约束。

上述五种模式在形成根源、驱动主体、技术路径、价值取向等维度呈现出系统性差异，但又共同回应了如何在自身约束条件下实现农业现代化这一核心问题。商业化大农场模式凭借资本驱动与平台寡头化释放规模红利，却受困于数据封闭；绿色化集约模式以强规制塑造系统性公共物品，却面临合规成本高企；精细化协同模式以平台共治化解超老龄化但海外扩张受限；节水化创新模式以技术外溢实现“以小博大”但缺乏跨地缘扩张能力；集成化协同模式以国家战略整合多元主体实现梯度赶超但仍面临“卡脖子”风险与小农适配难题。各模式互为镜像，在相互比较中映射出全球智慧农业发展的多元路径，具体如表1所示。

表1　全球智慧农业典型模式比较

Table 1　Comparison of typical global smart agriculture models

比较维度	美国	欧盟	日本	以色列	中国
模式类型	商业化大农场智慧农业	绿色化集约智慧农业	精细化协同智慧农业	节水化创新智慧农业	集成化协同智慧农业
驱动主体	风险资本+装备厂商+农化巨头	超国家规制机构+农户协会	国家研究机构+农协+私营企业	国家研发体系+军工+风投	国家战略+龙头企业+科研院所
制度供给重心	立法授权+连接性补贴+研发资助	CAP+绿色硬约束+数据空间立法	基本计划+开放API指南+协议会共治	国家研发资助+创新政策+水资源立法	国家行动计划+政策密度迭代+示范项目
技术路径	大农场+自动导航+变量喷雾+数据平台	智能温室+变量施肥+绿色合规	小尺度+共享平台+机器替人	滴灌+再生水+精准节水+AI水肥	北斗+5G+植保无人机+集成大模型
代表平台/项目	Operations Center、Climate FieldView	Common European Agricultural Data Space、SmartAgriHubs、DataConnect	WAGRI、SIP、Smart Food Chain	Netafim、Volcani Center、GrowingIL	伏羲农场、国家智慧农业大数据平台
价值取向	商业回报+规模经济	绿色低碳+生物多样性+多功能	替人增效+老龄化适应	资源效率+技术输出	粮食安全+新质生产力

注：表中各项内容由作者根据各国官方政策文件、智慧农业行动计划、农技投资数据机构行业报告（2024—2025）、美国农业部ERS EIB-248（2023）及2024年Charts of Note、EU CAP战略计划（2023—2027）、日本农林水产省《食物、农业、农村基本法（2024—2025）》及OECD报告整理。

2　全球智慧农业模式分化的形成机制与动因

2.1　全球智慧农业模式分化生成机制

从时间序列看，四重机制的触发存在明显先后：早期由要素稀缺度差异诱致出不同技术替代方向，随后经收益递增锁定产业演化轨迹，数字平台阶段由制度规制传统决定平台型技术的组织形态分化，近年跨国规则博弈又对前三者产生反向重构。从耦合关系看，四重机制既相互强化亦存在张力：诱致性创新与路径依赖相互强化，路径依赖与制度规制相互嵌入，制度规制与规则博弈则呈现张力。因此，对模式分化的解释不能停留于单一机制的叠加罗列，而需在历史过程中追踪四重机制相互作用的耦合证据。

（1）诱致性创新机制。诱致性技术进步假说指出，要素相对稀缺会诱致替代该要素的技术演化[38]。该机制对五种模式的初始形成具有显著解释力：土地、劳动、水资源与前期产业基础相对稀缺度的差异，分别诱致出大田机械化、温室集约、机器替人、精准节水与集成赶超5条技术主线。进入数字时代，仅凭要素稀缺度已难以完整解释分化，尚需叠加创新生态相容性与制度回应方式两项新约束。

（2）路径依赖机制。路径依赖理论指出，初始技术选择一经收益递增锁定，便沿既有轨迹自我强化，其作用经三类渠道展开[39,40]。一是技术互补性投资锁定，荷兰自17世纪积累的玻璃温室与营养液栽培，在数字化阶段自然延伸为智能温室与垂直农业；日本1947年农地改革遗留的小规模分散经营与农协体系，使外来技术须经农协节点扩散，锁

定平台共治。二是组织能力沉淀锁定，美国土地赠予大学、农业推广与资本市场早在20世纪初已形成公私互动的创新生态；以色列则以研发资助、军工外溢与国际化输出形成闭环，不致发育出依赖外部资本的脆弱路径。三是制度回应方式锁定，中国2004—2014年持续推进的农机购置补贴与高标准农田建设，使智慧农业切入口叠加于既有机械化基底，北斗辅助驾驶、植保无人机替代人工施药与5G专网数据回传，由此构成集成化协同模式最具识别度的技术组合。

（3）反垄断传统机制。反垄断哲学与产业集中度的耦合差异，塑造出平台寡头化与互通化两条组织路径。美国以芝加哥学派消费者福利标准为底色，对横向并购长期相对宽容，叠加农机产业数字化前已高度集中，数字平台沿数据维度放大既有集中度而形成全栈寡头；欧盟承继秩序自由主义对滥用市场支配地位的严格审查，将互操作性与可携带性义务前置嵌入产业，迫使头部厂商以数据互通而非独占组织市场。公共-私营边界的传统差异则决定平台由商业资本抑或公共部门承建：日本根植“政府-农协-产业”协同传统，由公共机构承建基础平台；中国依托纵向贯通的行政体系与产学研用一体化，形成公共基础设施引导、跨主体集成的形态。可见，反垄断哲学、产业集中度与公共-私营边界三组变量，是塑造美国寡头化、欧盟互通化、日本公共化与中国集成化四条平台路径的关键先决条件。

（4）规则博弈机制。平台化格局形成之后，跨国规则供给经外溢对前三重机制反向重构，全球规则由此塑造技术扩散的边界条件，并通过三组博弈展开[41]。绿色规则博弈以欧盟为主要供给者，其共同农业政策（2023—2027）改革推动脱钩支付“绿色化”并新设生态计划，引导有机农业与碳农业等实践[42]，再经农产品贸易外溢，倒逼其他模式向欧盟绿色标准靠拢。数据规则博弈呈多极格局：欧盟以《通用数据保护条例》《数据法案》《数据治理法案》界定数据权属与跨境流动，外溢为事实上的全球基准；美国以《农业法案》《国防生产法》延伸关键技术管控；中国以《数据安全法》《个人信息保护法》《数据出境安全评估办法》及“数据要素×”行动构筑本土规则[43]；日本则以开放接口指南提供亚太轻规制范本。技术规则博弈集中于核心技术管控与共建，美国以《芯片与科学法案》将农业芯片纳入半导体管控，欧盟以《数字市场法》施加守门人义务，中国经国家创新中心与重大科技专项加快自主突破。三组博弈表明，跨国规则供给已成为重构各模式演化方向的关键力量。

2.2 全球智慧农业模式分化的形成动因

四重机制揭示的是模式分化的过程性逻辑，而模式分化背后的深层根源，需要进一步从动因层面加以剖析。本文从禀赋约束、组织体制与价值序位三个层面，系统考察全球智慧农业模式分化的形成动因。

第一，禀赋约束型动因。禀赋约束是模式分化的物质起点。智慧农业不同于一般信息技术，其技术形态对所在国的耕地结构、劳动力构成、水资源条件与前期产业基础高度敏感。耕地块均规模决定了装备技术的可行边界，劳动力老龄化程度决定了“替人”还是“增效”成为主线，水资源稀缺度决定了节水技术是核心命题还是边缘补充，前数字时代的农机产业集中度决定了平台型技术由何种主体承建。其禀赋变量并非政策可以短期再造，而是构成各国模式起点的物理边界与产业边界。从美国、欧盟、日本、以色列和中国比较看，美国户均经营178 hm^2，叠加高度集中的农机硬件格局，催生大田自动驾驶与商业化数据平台的全栈形态[44]；欧盟户均仅16 hm^2、小农传统深厚，催生跨品牌互通与生态合规导向的精细数字农业[45]；日本户均不足2 hm^2、近七成基干从业者超65岁，催生小尺度协同与机器替人[26]；以色列年均降水不足全球均值四分之一，叠加“创新立国”战略，催生精准节水体系与海水淡化产业[46]；中国1.279亿 hm^2耕地与70%农户户均不足0.52 hm^2的国情，催生北斗、5G与集成大模型三位一体的集成化协同[47]。可见禀赋约束并非抽象的发展水平差异，而是各模式扎根的物质前提，与诱致性创新机制构成最直接的因果对应。

第二，组织体制型动因。在禀赋既定的条件下，究竟由谁承担技术研发、谁组织技术扩散、谁吸收技术风险，各国答案截然不同。这一差异源于各国在数十年乃至上百年间形成的产学研组织传统、反垄断哲学与政企边界划定方式，具有明显的体制嵌入性。一国的智慧农业模式只能在该国既有的创新体制基础上生长，无法跨越体制鸿沟简单移植。如前文所述，美国、欧盟、日本、以色列、中国分别形成私营主导、超国家共治、公共-农协协同、国家研发接力与五元协同的差异化主体格局，

核心创新主体在私人部门与公共部门之间的配置各有侧重。这种组织体制差异并非政策短期可以逆转，而是嵌入各国制度演化的稳态结构，与路径依赖机制及反垄断传统机制共同发挥作用，前者锁定主体配置的演化轨迹，后者塑造平台型技术的组织形态边界。

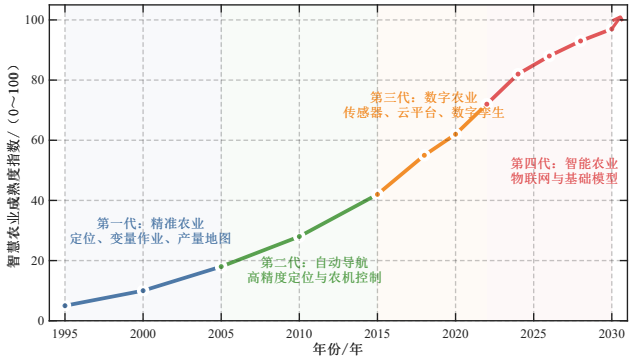
第三，价值序位型动因。同一项技术，在不同国家被嵌入不同的价值序列，服务不同的优先议题。这种价值序位差异不仅决定了“什么样的智慧农业模式被视为成功”，也决定了该国主导供给何种规则，与规则博弈机制形成耦合。如表1与前文各国价值取向分析所示，美国、欧盟、日本、以色列、中国分别将“商业回报+规模效率”“绿色低碳+生态合规”“老龄化适应+社区维系”“水资源安全+技术输出”“粮食安全+农业新质生产力培育”置于各自价值序列前位，并据此选择差异化的政策工具。以上5种价值序位在目标优先级、政策工具合法性与公平性认知上存在根本差异，使各主要经济体在各自认同的价值轨道上强化制度创新与话语建设，由此从规范层面巩固了模式分化的合法性基础。

3　全球智慧农业演化趋势

模式分化与机制耦合的双重作用下，全球智慧农业并未停留于静态均衡，而是沿着代际更替与维度共演的复合轨迹持续演进。技术、组织、数据、价值与治理五个维度并非彼此孤立，而是在相互嵌入与相互形塑中构成整体性变革。其中，技术升级催生新的组织形态，新组织形态推动数据治理升级，数据治理重塑价值评价标准，价值标准又反向塑造全球治理规则，由此构成“五维共演”的结构性特征。

3.1　技术演化：从数字化精准作业到智能化自主决策

图1展示了四代技术演化的阶段特征与典型标志，各国代际位置虽异，技术内核却共同向“以人工智能模型为决策核心”汇聚。第一代（1990年代末至2000年代中期）以全球定位系统（Global Positioning System, GPS）、地理信息系统（Geographic Information System, GIS）与变量作业为标志，核心是基于地理位置的差异化投入；第二代（2000年代末至2010年代中期）以实时动态载波相位差分全球定位系统（Real-Time Kinematic Global Positioning System, RTK-GPS）自动导航普及为标志，玉米、棉花、水稻、大豆等大田作物自动导航采用率突破50%；第三代（2010年代末至2024年前后）以传感器、云计算、大数据与数字孪生为标志，并孕育出智慧农业雏形，其关键变化在于数据由田间作业的副产品转变为生产决策的核心要素，如WOLFERT等[48]将由此引发的农业价值链重构概括为“智慧农业”，KLERKX等[49]厘清了它与精准农业、数字农业的概念边界，VERDOUW等[50]以“农业数字孪生”刻画物理农场与虚拟模型的实时映射与反馈调控。第四代（2024年至今）则以人工智能物联网、领域大模型与自主智能体为标志，进入“农业基础模型时代”，LI等[7]首次系统提出农业基础模型概念，吴华瑞等[51]构建了基于多模态融合大模型的作物知识问答系统。展望2026—2030年，农业基础模型将由实验性应用升级为核心技术底座，自主智能体在田间作业、温室管控、水肥协同等场景承担感知-决策-执行-评估的闭环职能。



注：数据来源于USDA ERS《数字时代的精准农业》报告（2023年）、欧盟智慧农业枢纽（SmartAgriHubs）项目年度评估报告（2019—2024年）、日本农林水产省《食物·农业·农村基本计划》（2024—2025年）及日本农业数据协同平台协议会成员数据、欧盟农业数据空间蓝图（CEADS Blueprint, 2024年）。

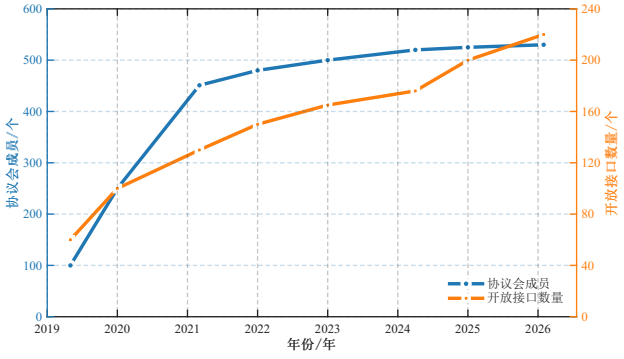
图1　全球智慧农业演化阶段

Fig. 1　Evolutionary stages of global smart agriculture

3.2　组织演化：从单主体推动到开放生态共治

智慧农业的组织演化经历了从“单主体推动”到“开放生态共治”的重要转型。早期的精准农业由国际农机装备制造商，如John Deere、科乐收（CLAAS KGaA mbH, CLAAS）等单线推动；数字农业阶段则呈现出“装备厂商+种业巨头+独立软件”多主体并行格局；进入AIoT与基础模型阶段，组织形态加速向开放生态共治演化。DataConnect首次实现John Deere、CLAAS、365FarmNet、CNH Industrial四大厂商的云对云互通；WAGRI协

议会在日本汇集政府、NARO、农协、企业、农户五元主体，截至2026年1月WAGRI协议会会员数达530社（图2）；欧洲共同农业数据空间（Common European Agricultural Data Space, CEADS）由来自15个欧盟国家的36个合作伙伴共同推进；中国《全国智慧农业行动计划》明确提出“政府引导、企业主体、社会参与”的多主体协同格局。这一转型的深层动因在于，单一主体既难独力承担数据基础设施的公共投入，亦难凭一己之力打通跨厂商、跨国别的数据壁垒。展望未来5—10年，组织形态将沿“装备厂商寡头协议+独立平台联盟+公共数据基础设施+小农户友好接入层”方向稳态演化。



注：数据来源于日本农林水产省（Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, MAFF）、NARO官方公告、亚太地区粮食与肥料技术中心（Food and Fertilizer Technology Center, FFTC）技术报告（2019）、WAGRI协议会成员页（截至2026年1月5日协议会总成员数530社）。

图2 日本WAGRI平台演化曲线

Fig. 2 Evolution curve of Japan's WAGRI platform

3.3 数据演化：从孤岛到资产化与要素市场化

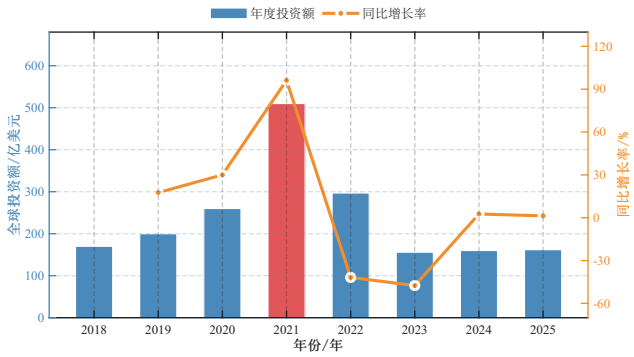
数据演化是智慧农业最具变革意义的趋势之一。早期农业数据以机器孤岛、平台孤岛、国别孤岛形式存在，可用性极低，WOLFERT等[48]即指出数据所有权与数据质量是大数据农业的两大核心瓶颈。近年来，全球农业数据治理同步向三个层次推进：技术层互通，以DataConnect跨平台连接机制、基于ISO 11783标准的可扩展标记语言数据交换格式（ISO 11783-Based Extensible Markup Language Data Exchange Format, ISOXML）和API开放机制为代表的技术体系，正逐步成为支撑跨设备、跨品牌和跨平台数据流通的新型基础设施。制度层确权，欧盟《数据法案》（2024）确立用户对设备数据的访问与共享权，中国2022年12月《数据二十条》明确数据“三权”分置框架，2024年“数据要素×”行动将农业列为重点领域；市场层定价，CEADS力图建立数据空间内的可计量交易机制，上海、北京、深圳等地数据交易所已挂牌农业数据产品。三个层次进展并不同步，技术互通相对成熟而确权与定价仍处探索期，数据权属界定模糊、跨境流动受限与定价机制缺失，仍是制约数据要素价值释放的主要瓶颈。展望未来，数据资产化与要素市场化的交互，将成为影响智慧农业商业价值能否充分释放的关键。

3.4 价值演化：从增产导向到绿色低碳与韧性导向

智慧农业的价值导向正经历深刻重构。早期精准农业以“增产-节本-增收”为单一目标，“产量监测器+变量施肥”是典型工具；但在气候变化、生态退化与公共健康议题凸显下，价值序列发生根本变化。其一，绿色低碳成为新底线，欧盟《从农场到餐桌战略》将减药50%、减肥20%写入硬约束，中国《全国智慧农业行动计划》提出“节本增产增效、绿色低碳”。其二，韧性成为新关键词，联合国粮农组织在《粮食与农业状况》中提出“韧性农业食品系统”。其三，多重价值集成成为新共识，智慧农业不再被视为单一生产工具，而是同时实现粮食安全、生态保护、农户增收、乡村振兴与文化传承的系统工程。价值演化亦印证于投资规模，农业食品科技投资数据呈“扩张-峰值-回调-企稳”曲线（图3）：由2018年170亿美元升至2021年517亿美元峰值，2022年回落至约295亿美元、2023年进一步降至约156亿美元，2024、2025年分别企稳于160亿、162亿美元。规模回调并非重要性下降，而是由风险资本驱动的扩张期转入价值落地驱动的整合期，单纯追求规模的早期标准正被“经济-生态-社会”多维评估取代。

3.5 治理演化：从国别碎片化到全球规则竞合

智慧农业的国际治理正从“国别碎片化”加速进入“全球规则竞合”阶段。一方面规则碎片化加剧，欧盟以《通用数据保护条例》《数据法案》《数据治理法案》设定数据治理高标准，美国以《农业法案》《国防生产法》《芯片与科学法案》构筑技术供应链管控，中国以《个人信息保护法》《数据安全法》《数据出境安全评估办法》形成本土规则。另一方面规则竞合深化，联合国粮农组织通过全球重要农业文化遗产系统与国际农业科技信息系统推



注：数据来源于 AgFunder Global AgriFoodTech Investment Report 2019—2025。

图3　全球农业食品科技投资规模演化

Fig. 3　Evolution of global agri-food tech investment

动数据互通，国际农业研究磋商组织的大数据农业平台成为全球公共数据合作枢纽，G20、亚太经合组织、金砖等机制中智慧农业议题渐由边缘走向核心；2024—2025年世界气象组织与粮农组织签署谅解备忘录，粮农组织与绿色气候基金合作筹集1.51亿美元支持气候适应，反映全球治理正构筑“分立-协同”双层结构。预计2026—2030年，围绕农业数据流动、农业基础模型互操作性与绿色低碳标准互认的国际博弈将成为新焦点。如图4所示，技术、组织、数据、价值、治理并非孤立推进，而是相互嵌入、相互塑造，构成全球智慧农业的整体演进逻辑。

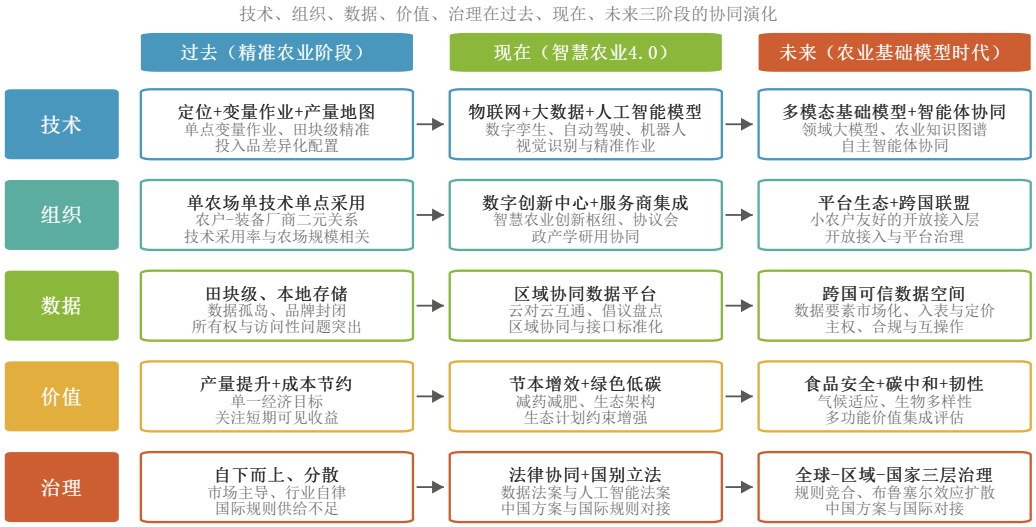


图4　全球智慧农业“五维共演”趋势框架

Fig. 4　The "Five-dimensional co-evolution" trend framework of global smart agriculture

4　结论与展望

4.1　主要结论

全球智慧农业已从技术引入与概念倡导阶段进入模式分化与路径竞争阶段，本文构建“驱动主体-制度环境-技术路径-价值取向”四维分析框架，对全球智慧农业典型模式与演化趋势进行系统刻画，得到如下研究结论：第一，模式分化是要素禀赋、制度结构与历史路径多重耦合下的稳态均衡，不存在“普适最优”：美国“商业化大农场”根植于大田规模与资本市场，欧盟“绿色化集约”根植于生态价值偏好与强规制传统，日本“精细化协同”根植于超老龄化与小农传统，以色列“节水化创新”根植于水资源极度稀缺与“创新立国”战略，中国“集成化协同”根植于国家战略动员能力与大规模场景资源。第二，分化背后存在以数据为生产要素、以模型为决策内核、以生态为组织形态、以可持续为价值底线的趋同内核，其共性逻辑不因模式差异消解，反在演化中持续强化，构成跨国互鉴与规则协同的基础。第三，技术、组织、数据、价值与治理的“五维共演”是分析全球智慧农业演化趋势的核心框架，技术从数字化精准作业走向智能化自主决策，组织从单主体推动走向开放生态共治，数据从孤岛走向资产化与要素市场化，价值从增产导向走向绿色低碳与韧性，治理从国别碎片化走向全球规则竞合。

4.2　政策启示

第一，技术供给的封闭领跑格局难以维系，农业基础模型、农机互通协议与传感器等关键技术若能形成共建共享的公共属性，技术鸿沟才能真正缩小。第二，组织形态需要走出单主体推动的窠臼，

平台寡头、独立联盟、公共数据基础设施和小农友好接入层的多层并存，是可持续的产业组织安排。第三，数据治理必须在主权与流动之间找到新的平衡，跨境互操作、数据空间互认与要素市场化定价已是绕不开的议题，单一国家的本土规则体系难以独自支撑全球智慧农业的下一步演进。第四，价值评估应当摆脱单一增产逻辑，将绿色低碳、气候韧性、生态修复与农户福祉同步纳入评估框架，让复合维度的评价标准取代单一的产量与效益指标。第五，全球治理须由规则竞争走向规则共建，使发展中国家的真实诉求在规则制定中获得更具实质性的代表权。在全球农业现代化进程中，中国应依托《全国智慧农业行动计划（2024—2028年）》和2026年《中共中央 国务院关于锚定农业农村现代化 扎实推进乡村全面振兴的意见》“人工智能+农业”部署，加快建成一批国家级智慧农场示范点、培育一批跨区域智慧农业产业平台，将集成化协同模式逐步转化为可向“一带一路”国家输出的中国方案，从智慧农业全球规则的参与者升级为共建者。

4.3 未来展望

立足全球智慧农业模式比较与演化趋势的整体判断，未来全球智慧农业应当沿着“技术包容、生态开放、价值多元、治理协同”的方向深度演进，构建既能释放“数据-模型-生态”系统价值、亦能兼顾各国差异化国情与小农户基本权益的全球智慧农业新格局。以农业基础模型为代表的新一代技术供给应当从少数国家与企业的封闭领跑，转向以共建共享为导向的全球公共技术供给，缓解技术鸿沟与“卡脖子”风险；以平台与数据空间为载体的产业组织应当从国别孤岛走向跨境互操作，建立既尊重数据主权又支持要素流动的全球互信机制；以可持续为底线的价值评估应当从单一经济效率指标走向“绿色-韧性-多功能”复合维度，将粮食安全、气候适应、生态修复与农户福祉同步纳入智慧农业的成果评价；以国家、区域与多边机制为支柱的治理结构应当从规则博弈走向规则共建，让发展中国家在全球智慧农业规则制定中获得更具实质性的代表权。中国正处于“梯度赶超、逐步并跑、重点领跑”的关键窗口期，已在北斗终端、植保无人机、农机自动化与集成创新等环节形成局部领跑，未来应进一步加快在高端传感器、核心元器件、农业基础模型核心算力与数据要素市场化机制方面的发展，为人类共同应对粮食安全、气候变化与可持续发展挑战贡献中国智慧与中国方案。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献：

[1] 张绮雯, 林青宁, 毛世平. 国际视角下中国智慧农业发展的路径探寻[J]. 世界农业, 2022(8): 17-26.
ZHANG Q W, LIN Q N, MAO S P. Exploring the path of China's smart agriculture under an international perspective[J]. World Agriculture, 2022(8): 17-26.

[2] 邓悦, 肖杨. 智慧农业的国际实践与中国农业现代化发展[J]. 农业经济与管理, 2026(1): 96-104.
DENG Y, XIAO Y. International practices in smart agriculture and the development of China's agricultural modernization[J]. Agricultural Economics and Management, 2026(1): 96-104.

[3] ROUSSAKI I, DOOLIN K, SKARMETA A, et al. Building an interoperable space for smart agriculture[J]. Digital Communications and Networks, 2023, 9(1): 183-193.

[4] MUHAMMED D, AHVAR E, AHVAR S, et al. Artificial Intelligence of Things (AIoT) for smart agriculture: A review of architectures, technologies and solutions[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2024, 228: 103905.

[5] GHAZAL S, MUNIR A, QURESHI W S. Computer vision in smart agriculture and precision farming: Techniques and applications[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2024, 13: 64-83.

[6] 兰玉彬, 王朝锋, 孙贺光, 等. 低空技术赋能智慧农业: 技术体系、应用场景及挑战建议[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(6): 18-34.
LAN Y B, WANG C F, SUN H G, et al. Low-altitude technology empowering smart agriculture: Technical system, application scenarios, and challenge recommendations[J]. Smart Agriculture, 2025, 7(6): 18-34.

[7] LI J J, XU M L, XIANG L R, et al. Foundation models in smart agriculture: Basics, opportunities, and challenges[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 222: 109032.

[8] GARG S, RUMJIT N P, ROY S. Smart agriculture and nanotechnology: Technology, challenges, and new perspective[J]. Advanced Agrochem, 2024, 3(2): 115-125.

[9] GOEL R K, YADAV C S, VISHNOI S, et al. Smart agriculture – Urgent need of the day in developing countries[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2021, 30: 100512.

[10] 李娜, 张馨月, 张美慧. 中国智慧农业发展指数测度与分析[J]. 经济与管理评论, 2025, 41(1): 135-147.
LI N, ZHANG X Y, ZHANG M H. Measurement and analysis of China's smart agriculture development index[J]. Review of Economy and Management, 2025, 41(1): 135-147.

[11] 张少华, 陈壬涛, 黎美玲. 中国智慧农业的规模测度与效应评估[J]. 贵州财经大学学报, 2025(2): 22-31.
ZHANG S H, CHEN R T, LI M L. Scale measurement and effect evaluation of China's smart agriculture[J]. Journal of Guizhou University of Finance and Economics, 2025(2): 22-31.

[12] 殷浩栋, 霍鹏, 肖荣美, 等. 智慧农业发展的底层逻辑、现实约束与突破路径[J]. 改革, 2021(11): 95-103.
YIN H D, HUO P, XIAO R M, et al. The underlying logic, practical constraints and breakthrough path of the development of smart agriculture[J]. Reform, 2021(11): 95-103.

[13] 顾雪微, 赵向豪. 智慧农业赋能农业绿色转型的逻辑、障碍与建议——基于技术革新视角[J/OL]. 智慧农业(中英文). (2025-09-01) [2026-04-27]. https://www.smartag.net.cn/CN/rich_html/10.12133/j.smartag.SA202505010.
GU X W, ZHAO X H. Logic, impediments and suggestion of smart agriculture enabled green transition in agriculture: Based on the perspective of technological innovation[J/OL]. Smart Agriculture. (2025-09-01) [2026-04-27]. https://www.smartag.net.cn/CN/rich_html/10.12133/j.smartag.SA202505010.

[14] AgFunder. Global agrifoodtech investment report 2025[R/OL]. AgFunder, 2025. [2026-04-27]. https://research.agfunder.com/agfunder-global-agrifoodtech-investment-report-2025.pdf.
[15] 清华大学二十国集团创业研究中心. 美国《农业法案》为农村创新提供新途径[EB/OL]. (2019-09-12)[2026-06-14]. https://www.g20e.tsinghua.edu.cn/contents/169/289.html.
[16] United States Department of Agriculture. ReConnect loan and grant program [EB/OL]. [2026-04-27]. https://www.usda.gov/reconnect.
[17] MCFADDEN J R, NJUKI E, GRIFFIN T W. Precision agriculture in the digital era: Recent adoption on US farms[R/OL]. Washington D. C.: USDA Economic Research Service, 2023 [2026-04-27]. https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details?pubid=105893.
[18] Deere & Company. See & Spray herbicide savings[EB/OL]. [2026-04-27]. https://www. deere. com/en/news/all-news/see-spray-herbicide-savings/.
[19] United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Environmental Quality Incentives Program (EQIP) [EB/OL]. [2026-04-27]. https://www. nrcs. usda. gov/programs-initiatives/environmental-quality-incentives-program.
[20] Federal Register. Promoting the National Defense by Ensuring an Adequate Supply of Elemental Phosphorus and Glyphosate-Based Herbicides[EB/OL]. [2026-04-27]. https://www.federalregister. gov/documents/2026/02/23/2026-03628/promoting-the-national-defense-by-ensuring-an-adequate-supply-of-elemental-phosphorus-and.
[21] European Commission. The common agricultural policy at a glance [EB/OL]. [2026-04-27]. https://agriculture. ec. europa. eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cap-2023-27_en.
[22] European Parliament. Financing of the CAP: Facts and figures [EB/OL]. [2026-04-27]. https://www. europarl. europa. eu/factsheets/en/sheet/106/financing-of-the-cap.
[23] Business Wire. DataConnect is now available globally across six major digital platforms[EB/OL]. (2021-07-01) [2026-04-27]. https://www.businesswire.com/news/home/20210701005365/en/.
[24] Centraal Bureau voor de Statistiek, Wageningen University & Research. Agricultural exports continue to grow, imports grow faster [R/OL]. [2026-04-27]. https://www. wur. nl/en/news/agricultural-exports-continue-grow-imports-grow-faster.
[25] GROOT M J, BERENDSEN B J A, CLETON N B. The next step to further decrease veterinary antibiotic applications: Phytogenic alternatives and effective monitoring; the Dutch approach[J]. Frontiers in veterinary science, 2021, 8: 709750.
[26] 胡鹤鸣, 王应宽, 李明, 等. 日本以农协为主推进智慧农业发展经验及对中国的启示[J]. 农业工程学报, 2024, 40(8): 299-310.
HU H M, WANG Y K, LI M, et al. Experience in promoting smart agriculture development with a focus on Japanese Agricultural Cooperatives and its implications for China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(8): 299-310.
[27] 国旭, 茹蕾, 张怀墨, 等. 日本构建开放型智慧农业生态系统的经验与启示[J]. 世界农业, 2025(12): 146-149.
GUO X, RU L, ZHANG H M, et al. Experience and enlightenment of Japan's construction of an open smart agriculture ecosystem[J]. World Agriculture, 2025(12): 146-149.
[28] WAGRI Council. Member statistics: As of 5 January 2026[EB/OL]. [2026-04-27]. https://wagri.naro.go.jp/wagri_council/.
[29] 日本農林水産省. 2025年農林業センサス結果の概要(概数値)[EB/OL]. (2025-11-28)[2026-05-14]. https://www. maff. go. jp/j/tokei/kekka_gaiyou/noucen/040909/index.html.
[30] 日本農林水産省. 令和7年耕地面積(7月15日現在)[EB/OL]. (2025-10-29)[2026-05-14]. https://www. maff. go. jp/j/tokei/kekka_gaiyou/sakumotu/menseki/r7/kouti.html.
[31] 人民日报. 以色列节水是国家头等大事[EB/OL]. (2006-10-17)[2026-05-14]. https://www. ndrc. gov. cn/fggz/hjyzy/sjyybh/200610/t20061017_1133503.html.
[32] Netafim. Company profile and global operations[EB/OL]. [2026-04-27]. https://www.netafim.com/.
[33] OECD. Environment at a Glance: Israel [R/OL]. [2026-04-27]. https://www. oecd. org/en/publications/environment-at-a-glance-country-notes_59ce6fe6-en/israel_8321d563-en.html.
[34] 中华人民共和国农业农村部. 以创新为笔 绘丰收画卷——“十四五”农业科技创新成就综述[EB/OL]. (2025-12-17)[2026-04-27]. https://kjs. moa. gov. cn/gzdt/202512/t20251217_6479981.htm.
[35] 刘婧汐. 来自广州, 全球排名第二的农业无人机公司冲刺港交所[EB/OL]. (2026-03-27)[2026-05-13]. https://www. 21jingji.com/article/20260327/herald/ac0abb16d85da1dff9ae53fbf9a0cb64.html.
[36] 大疆农业. 农业无人机行业白皮书(2023)[R/OL]. 深圳: 深圳市大疆创新科技有限公司, 2024[2026-05-14]. https://ag.dji.com/cn/newsroom/ag-news--cn-white-paper-2023
[37] 张玉成, 张晓博, 高树琴, 等. "伏羲农场": 智慧农业技术集成创新的实践探索与思考[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(2): 301-309.
ZHANG Y C, ZHANG X B, GAO S Q, et al. The Fuxi Farm: Practice and reflection on integrated innovation of smart agriculture technology[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(2): 301-309.
[38] HAYAMI Y, RUTTAN V W. Factor prices and technical change in agricultural development: The United States and Japan, 1880-1960[J]. Journal of Political Economy, 1970, 78(5): 1115-1141.
[39] DAVID P A. Clio and the Economics of QWERTY[J]. The American Economic Review, 1985, 75(2): 332-337.
[40] ARTHUR W B. Competing technologies, increasing returns, and lock-In by historical events[J]. The Economic Journal, 1989, 99 (394): 116-131.
[41] BRADFORD A. The Brussels effect: How the European Union rules the world[M]. Oxford: Oxford University Press, 2020.
[42] 曾寅初, 计薇. 欧盟共同农业政策2023—2027年改革的动向及其启示[J]. 农业经济问题, 2023(6): 43-57.
ZENG Y C, JI W. Common agricultural policy 2023—2027 reform in European Union: Trends and enlightenment[J]. Issues in Agricultural Economy, 2023(6): 43-57.
[43] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国数据安全法[Z/OL]. (2021-06-10)[2026-06-14]. http://www. npc. gov. cn/npc/c2/c30834/202106/t20210610_311888.html.
[44] United States Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service. 2017 Census of Agriculture Data Now Available[EB/OL]. (2019-04-11)[2026-04-26]. https://www. usda. gov/about-usda/news/press-releases/2019/04/11/2017-census-agricul - ture-data-now-available.
[45] 袁祥州, 黄恩临. 欧盟智慧农业发展经验及其借鉴[J]. 世界农业, 2022, (5): 27-36.
YUAN X Z, HUANG E L. Experience and Reference of Smart Agriculture Development in European Union[J]. World Agriculture, 2022, (5): 27-36.
[46] 易小燕, 吴勇, 尹昌斌, 等. 以色列水土资源高效利用经验对我国农业绿色发展的启示[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(10): 37-42, 77.
YI X Y, WU Y,YIN C B, et al.The enlightenment of Israel's efficient utilization of land and water resources to the green development of agriculture in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(10): 37-42, 77.
[47] China Daily. Small farms key to taking on hunger [N/OL]. (2024-11-18) [2026-04-26]. https://www. chinadailyhk. com/hk/article/597989.
[48] WOLFERT S, GE L, VERDOUW C, et al. Big data in smart farming: A review[J]. Agricultural Systems, 2017, 153: 69-80.
[49] KLERKX L, JAKKU E, LABARTHE P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda[J]. NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences, 2019, 90: 100315.
[50] VERDOUW C, TEKINERDOGAN B, BEULENS A, et al. Digital twins in smart farming[J]. Agricultural Systems, 2021, 189: 103046.
[51] 吴华瑞, 赵春江, 李静晨. 基于多模态融合大模型架构Agri-QA Net的作物知识问答系统[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(1): 1-10.

WU H R, ZHAO C J, LI J C. Agri-QA net: Multimodal fusion large language model architecture for crop knowledge question-answering system[J]. Smart Agriculture, 2025, 7(1): 1-10.

Comparison and Evolutionary Trends of Global Smart Agriculture Models

YANG Ming, HU Bingchuan*

(*Rural Development Institute*, *Chinese Academy of Social Sciences*, *Beijing* 100029, *China*)

Abstract: [Significance] Smart agriculture represents a strategic choice for addressing the global challenges of food security, climate change, and an aging agricultural labor force, and for cultivating new-quality productive forces in agriculture. Shaped by factors such as factor endowments, institutional traditions, and value preferences, economies have not converged upon a single optimal path, but have instead formed highly heterogeneous practical configurations across driving actors, institutional environments, technological pathways, and value orientations. Existing research remains largely confined to the parallel enumeration of country-specific experiences and lack a unified comparative framework; their mechanistic explanations seldom move beyond the single dimension of factor endowments, leaving the multidimensional, co-evolutionary dynamics inadequately understood. In view of this, the archetypal models of global smart agriculture were systematically compared, the mechanisms underlying their divergence were uncovered, and their evolutionary trends were assessed, so as to provide theoretical references and practical guidance for China to build an autonomous, controllable, and openly collaborative smart agriculture system and in advancing from technological follower to co-builder of rules. **[Progress]** Drawing on the theory of induced innovation and a comparative institutional analysis perspective, a four-dimensional analytical framework of "driving actors-institutional environment-technological pathway-value orientation" was constructed, and five representative economies, the United States, the European Union, Japan, Israel, and China, were selected to distill five archetypal models. The commercialized large-scale farm model exemplified by the United States is one in which the private sector leads and releases economies of scale through large-scale field operations. The green and intensive model exemplified by the European Union is one in which intensive production is steered by binding green constraints. The refined collaborative model exemplified by Japan is one in which platform-based co-governance alleviates super-aging and smallholder fragmentation. The water-saving innovative model exemplified by Israel is one in which a full-chain water-saving technology system has developed under acute water scarcity. The integrated collaborative model exemplified by China is one in which national strategy integrates multiple actors, coupling the 'large-country-with-smallholders' condition with leading digital infrastructure such as BeiDou, 5G, and AI. On this basis, four mechanisms, induced innovation, path dependence, the antitrust tradition, and rule-based contestation, were introduced to provide a process-tracing account of model divergence in terms of sequential triggering and tension-laden coupling, the underlying drivers of this divergence were traced across the three dimensions of endowment constraints, organizational systems, and value hierarchies, and thereby the distinct value sequences of the five models were identified. Five dimensions of global evolutionary trends were assessed: technology, organization, data, value, and governance. Technologically, from digital precision operations toward intelligent autonomous decision-making. Organizationally, from single-actor-driven development toward open-ecosystem co-governance. In data terms, from isolated silos toward cross-border interoperability and factor marketization. In value terms, from a singular pursuit of yield growth toward green, low-carbon, and resilience-oriented goals, and in governance, from national fragmentation toward global regulatory coopetition. **[Conclusions and Prospects]** Model divergence constitutes a stable equilibrium under the multiple coupling of factor endowments, institutional structures, and historical paths, and no universally optimal model exists; beneath this divergence lies a convergent core in which data serve as a factor of production, models as the decision-making engine, ecosystems as the organizational form, and sustainability as the value baseline. Looking ahead, global smart agriculture should evolve along the trajectory of technological inclusiveness, ecological openness, value pluralism, and governance synergy. China is well positioned to assume the composite role of technology provider, institutional experimenter, and rule co-builder, working with other nations to advance global smart agriculture toward a more inclusive and symbiotic configuration.

Keywords: smart agriculture; data-driven; intelligent decision-making; new quality productive forces; agricultural foundation models; open collaboration; large country with smallholder farming

Foundation items: The National Social Science Fund of China (23ZDA045)

First author: YANG Ming, E-mail: nfs-yangming@cass.org.cn
***Corresponding author:** HU Bingchuan, E-mail: hubch@cass.org.cn