

“粮食产业链数字化和创新技术研究” 特约专栏文章之二

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.03.002

李迅, 潘超. 全球先进数字农业技术体系在中国粮食种植的试点实践探索[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(3): 21-33.

LI X, PAN C. Pilot exploration of global advanced digital agricultural technologies in China's grain production[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(3): 21-33.

全球先进数字农业技术体系在中国 粮食种植的试点实践探索

李 迅^{1,2}, 潘 超²

(1. 北京大蚯蚓数字科技有限公司, 北京 100102;

2. 中国农业机械流通协会智慧农业产教融合专委会, 北京 100045)

摘 要: 针对国家粮食单产提升和社会化服务两大战略需要, 系统阐述了全球粮食生产所面临的气候变化等挑战和数字化时代的发展机遇, 分析了全球先进数字农业技术体系构成。并以河南内黄县玉米北斗+智慧农业示范基地建设实现单产提升和赋能社会化服务为例, 介绍了先进数字农业技术体系中的产量地图、土壤地图、精准(变量)播种、精准(变量)施肥、精准(变量)喷药、北斗导航和无人机遥感等技术的系统应用和效果, 以及专委会围绕上述技术体系的推广所做的示范。内黄县的实践表明, 系统性应用数字农业技术体系不仅实现了玉米大规模提升单产达 24.5%, 还可以极大改善谷物品质, 如降低真菌毒素, 且有更强韧性面对极端天气和病虫害灾害的影响。先进数字农业技术的推广也将有利于保障粮食安全和培育农业新质生产力, 推动乡村全面振兴长效机制的建立, 为到 2035 年实现建设农业强国战略目标的达成贡献力量。

关键词: 数字化技术; 智慧农业; 变量作业; 北斗导航; 单产提升; 社会化服务

中图分类号: TS210.3; S-1; F304 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)03-0021-13

网络首发时间: 2025-04-30 13:15:54

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250430.1038.002>

Pilot Exploration of Global Advanced Digital Agricultural Technologies in China's Grain Production

LI Xun^{1,2}, PAN Chao²

(1. Beijing Daqiuyin Digital Technology & Science Co., Ltd., Beijing 100102, China; 2. The United Board of Digital Agriculture of China Agricultural Machinery Distribution Association, Beijing 100045, China)

Abstract: In response to the two major strategic needs of increasing national grain yield per unit area and 3rd-party professional services, this paper systematically expounds on the challenges such as climate change faced by global food production and the development opportunities in the digital age, and analyzes advanced digital agricultural technology systems in the world. Taking the construction of the BeiDou + Smart

收稿日期: 2025-02-24; 修回日期: 2025-04-20; 录用日期: 2025-04-21

第一作者: 李迅, 男, 博士, 北京大蚯蚓数字科技创始人、CEO, 研究方向为数字农业技术产业化应用, E-mail: lx@daqiuyin.com

本专栏背景及第一作者介绍详见 PC6-12。

Agriculture Demonstration Base of Corn in Neihuang County, Henan Province by the United Board of Digital Agriculture of China Agricultural Machinery Distribution Association(UBDA of CAMDA) as an example, which has achieved an increase in yield per unit area and empowered 3rd-part professional services, this paper introduces the systematic application and effects of technology systems of digital agriculture, including yield maps, soil maps, precision (variable-rate) seeding, precision (variable-rate) fertilization, precision (variable-rate) spraying, BeiDou navigation, and UAV remote sensing. It also presents the demonstration and training activities carried out by the UBDA of CAMDA to promote above-mentioned technology systems. The practice in Neihuang shows that the systematic application of digital agriculture technologies has not only achieved a large-scale increase in corn yield per unit area by 24.5%, but also significantly improved the grain quality, such as reducing phyto-toxins. Moreover, it has enhanced the resilience to extreme weather and pests. The promotion of advanced digital agricultural technologies will also be conducive to ensuring national food security and the development of new quality productive forces, help establish a long-term mechanism for the comprehensive revitalization of rural areas and contribute to the achievement of the strategic goal of building an agricultural power by 2035.

Key words: digital technology; smart agriculture; variable-rate operation; Beidou navigation; increase in yield per unit area; 3rd-party professional service

全球人口在 2023 年突破 80 亿。尽管 2022 年主要作物产量比 2000 年增长了 56%,但全球受饥饿影响的总人口数量仍在 7.13~7.57 亿之间,较 2019 年增加了 1.22 亿^[1-2]。影响粮食安全的主要因素包括政治和军事冲突、经济危机、极端天气事件等。例如,2022 年俄乌战争爆发 3 个月内,国际谷物价格上升了 20%,对低收入国家构成严重突发性威胁^[3]。2024 年《全球粮食危机报告》估计,2023 年 59 个国家和地区的近 2.82 亿人面临严重突发性饥饿问题,比上年增加 2 400 万^[4]。2024 年中国进口粮食 15 752.6 万 t,其中谷物进口 5 020.3 万 t,油料进口 1.15 亿 t^[5],也存在较高的突发性供应链风险。

自上世纪 90 年代,全球社会逐步认识到气候变化是全人类面临的一个主要挑战^[6]。气候变化和由此产生的极端气象对生态系统的影响的研究(包括对农业的影响)已有较长历史。IPCC^[7]第六版评估报告进一步指出,气候变化对农业的影响包括温室气体排放增加、极端气候事件频发、土壤退化、水资源短缺、病虫害压力增大以及畜牧业和渔业排放增加。报告详细评估了上述方面在全球不同地区的影响程度并指出,气候变化对亚洲的主要作物有一定的影响,如玉米、大豆、小麦等主要是负面影响,对水稻是正负皆有^[7]。

对气候变化趋势更为清晰的评估和农业数据的获取使长周期定量模拟逐步深入。Li 等^[8]利用多种气候变化模型对全球变暖对粮食生产的影响进行的分析表明,全球温度每升高 1 °C,小麦产量下降幅度可达 3.0%,而玉米和水稻在许多地区潜在产量损失比之前预计的均高 5%~10%。气候变化的速度仍在加快^[7],世界气象组织最新的年度报告结果显示,在 2024—2028 年之间,有 80%以上概率,将会有某一年的全球平均气温超过 1850—1900 间的平均温度 1.5 °C,突破巴黎协定所希望控制全球变暖不超过 1.5 °C 的基本目标,并可能对全球产生重大影响^[9]。由此可推断,在全球气候变化影响下,过去的种植经验将受到极大挑战。例如,受更多高温天气影响,黄淮海地区的玉米生产抗高温的能力在近年来显得更为重要^[10]。农业微生物受气候变化的影响同样显著,或更为敏感^[7]。据估计,植物病虫害给全世界 8 种主要的粮食和经济作物造成了 42%的损失^[11],因此,有害生物受气候变化的影响的研究极为重要。

近年来,多个国际组织均强调国际社会应采取措施推动粮食体系转型,增强韧性,以应对全球粮食危机^[4,12-13]。数字技术随着计算机和互联网(特别是移动互联网)的普及,已深入到各行各业。2019 年,世界银行(World Bank)^[14]在展望

未来农业与粮食生产相关报告中明确提出, 数字技术将有显著潜力提高农业生产的效率, 并促进公平和环境可持续发展。在农业机械化革命后期, 数字化技术开始广泛应用, 并逐步与机械化一样成为重要的技术手段^[15]。

综上, 本文针对粮食单产提升和社会化服务两大战略需要, 阐述全球粮食生产所面临的气候变化等挑战和数字化时代的发展机遇。并以中国农业机械流通协会智慧农业产教融合专委会在河南省内黄县玉米北斗+智慧农业示范基地建设实现单产提升和赋能社会化服务为例, 介绍数字农业技术体系中的产量地图、土壤地图、精准(变量)播种、精准(变量)施肥、精准(变量)喷药、北斗导航和无人机遥感等技术的系统应用和效果, 以及专委会围绕上述技术体系的推广所做的示范, 旨在为保障粮食安全和农业新质生产力培育提供参考。

1 全球农业数字化转型

数字化转型主要可通过数字技术与业务深度融合, 提升效率、竞争力和创新能力。农业数字化转型正成为全球现代农业发展的关键趋势, 也是实现农业产业链和价值链效率提升、生产技术创新、生产要素配置优化、市场机会重构和跨一二三产业融合协作的重要推动力。

1.1 数字农业技术的市场分析与发展趋势

早在 2016 年, 高盛(The Goldman Sachs Group)^[16]就对数字农业的发展趋势和市场规模进行了较为全面的分析, 并评估了市场上主要数字农业技术服务商的发展情况。高盛认为, 以 2015 年为基准, 到 2050 年, 数字化技术应用能为全球作物生产贡献 70% 的产量提升, 数字农业潜在市场规模达 2 400 亿美元, 主要包括精准施肥、精准喷药、精准播种、智能农机、智能灌溉和田间监测以及数据管理。其中精准施肥市场可达 650 亿美元, 带来单产提升达 18%, 田间监测与数据管理市场可达 350 亿美元。

1.2 数字农业技术创新和产业链协同体系的国际解析

由于农业的复杂性, 数字化技术渗透到农业

领域是一个复杂跨学科且长期持续过程。国际著名行业咨询机构罗兰贝格(Roland Berger)2019 年所发布的针对数字技术与精准农业全球发展的系统性分析报告中, 对国际先进农业数字化技术体系和产业链协同模式进行了全面解析^[17]。首先, 数字农业主要技术体系被分为生物学(biologicals)、图像和传感器(imagery & sensors)、机器人和自动化(robotics & automation), 以及数字化和大数据(digitalization & big data), 这四大体系将原有工业或信息化领域的相关技术也纳入了农业相关领域, 表明数字农业推动了跨产业协同。报告还系统总结了拜耳公司(Bayer)建立的由生物学知识洞察, 到数据分析引擎, 再到精准田间执行为闭环的产业链协同下的数字农业平台战略, 其中生物学知识和精准田间执行为原有农业的产业链环节, 而数据分析引擎则体现了数字化转型过程中产生的创新型农业技术的重要性。在产品创新方面, 孟山都(Monsanto)数字农业部门气候公司(Climate Corporation)开发的 FIELDVIEW 产品目前已在全球 23 个国家推广, 服务面积超过 2.5 亿英亩^[18], 其推广速度与 2000 年前后转基因大豆和玉米在美国的推广速度类似^[19], 表明数字农业是革命性的技术体系。

1.3 数字农业技术在美国的应用成效

美国农业部经济研究局(The Economic Research Service of United States Department of Agriculture)系统调研了数字农业技术体系近年来在主要大田粮油经济作物中的应用成效, 并给出了明确的结论, 即数字农业技术对产量提升贡献极大^[20]。在其发布的数字时代的精准农业: 近年来在美国农场的应用(“Precision Agriculture in the Digital Era: Recent Adoption on U.S. Farms”)报告中, 数字农业技术体系被归纳为 7 类: 产量地图(yield map)、土壤地图(soil map), 变量播种(variable rate seeds), 变量施肥(variable rate fertilizer), 变量喷药(variable rate pesticide), 导航(guidance)和遥感(remote sensing)。据估计, 在美国的玉米、冬小麦、大豆、棉花、高粱 5 种作物中, 产量地图技术的应用对产量提升平均达 23%, 特别是玉米, 提升幅度可达 36%, 土壤地

图技术平均提升产量达 21%，变量施肥平均提升达 15%，遥感技术平均提升 16%^[20]。

1.4 中国智慧农业的发展现状与政策推动

中国智慧农业发展尚很薄弱。受小农户经营体制的限制，农业人口老化，以及机械化水平不足等影响，数字农业产业仍在起步阶段。农业从业人口教育素质偏低，阻碍先进数字化技术的普及。《中国劳动统计年鉴 2023》^[21]表明，农业从业人口中高中及以上教育程度只占 8.3%，远低于其它行业平均水平。据估计，2024 年中国智慧农业市场总规模约 924 亿元，主要由数字平台服务（37%），智慧种植（30%），植保无人机（20%），智慧畜牧（12%），以及农机自动驾驶（1%）构成^[22]。但这个市场构成与高盛报告中的美国市场构成^[16]差异较大，比如智慧种植并没有数字化种肥药等细分市场评估，表明中国智慧农业市场发展仍在早期。

《中国数字乡村发展报告（2022 年）》估计，2021 年全国小麦、稻谷、棉花 3 个农作物的生产信息化率分别为 39.6%、37.7%和 36.3%，玉米为 26.9%，表明数字化尚有极大应用空间^[23]。2024 年，农业农村部^[24]发布了《全国智慧农业行动计划（2024—2028 年）》，强调要实施智慧农业公共服务能力提升行动，实施智慧农业重点领域应用拓展行动，实施智慧农业示范带动行动。计划到 2028 年，在智慧农业公共服务能力、利用信息技术实现粮油作物节本增产增效、示范地区农业全产业链数字化方面得到极大提升，农业生产信息化率达到 32%以上。上述政策的发布表明数字化技术在农业的应用已得到政府高度重视并将推动产业进入快速发展的周期。

2 数字化赋能下的中试基地建设理念

联合国粮食及农业组织（Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO）^[25]在《农业发展过程中农场数据的管理、共享和服务》一书中系统地阐述了农场管理中数据的价值、不同类型数据的来源及管理原则，以及如何鉴别数据在场景中的应用；同时，FAO 指出了数字化对于发展中国家中承担大部分粮食生产的中小

农户在提升产量过程中的重要性。

中国农业机械流通协会智慧农业产教融合专委会成立于 2023 年 10 月 26 日，致力于智慧农业产教协同发展，推动农业技术与产业双变革，赋能农业高质量发展和新型农业人才培育。该专委会的主要职能包括：推动智慧农业技术的落地应用，促进农业产业深度转型升级，基于促进智慧农业供需对接，推动农业社会化服务组织的发展，提升其竞争力的理念，建设会展活动、产教融合、基地建设、商务开发、标准制定等工作平台。

河南安阳市内黄县智慧农业区域示范基地和会客厅建设是专委会第一个系统级项目，其中以玉米、小麦单产提升和社会服务为主要建设内容的中试基地是一个专项级任务。以“联合起来，把地种好”为理念，通过中试基地建设，形成以智慧农业技术体系为核心，智慧农服联盟为骨干，新型社会化服务产业集群为能力的农业新质生产力发展新范式。

内黄县是河南典型玉米、小麦两熟制农业生产区域，在一定程度上也能反映山东、河北等周边区域农业生产的特点。内黄县土地集中度较低，主要仍由中小种植户构成。因此，内黄县开展数字农业技术体系的应用与推广，需要关注如何服务中小农户的问题。本文重点讲述内黄项目在玉米种植季中所采用的适用于中小农户的低成本数字化技术的应用示例以及成效。

3 中试基地主要数字农业技术体系的实践

农业数字化转型的核心也是与其它行业类似，即数字技术与业务深度融合，并对原有业务体系进行重构。数字农业技术体系极为复杂多样，场景丰富。从技术方面解析，前述罗兰贝格（Roland Berger）的报告构建了 4 个维度的技术体系全面描述了其涉及的关键技术领域^[17]，既包括大量通用技术，也有不少专用技术。但这种解析过于分散复杂，且与业务关联度低。而如果仅从战略上解析，则又过于简单。

中试基地为体现数字化对种肥药械水技术的融合，采用了滴灌水肥一体和微喷两种灌溉方式，并设置了十多个玉米品种以测试不同品种在不同

种植密度和水肥管理条件下的表现,并通过数字化技术进行全程管理。鉴于内黄项目以单产提升和社会化服务为核心目标,而目前主粮生产的核心场景较为清晰明确,主要包括耕、种、管、收。因此,本文从主粮生产核心业务体系的解析出发对内黄项目进行论述。同时,部分通用技术也在主粮生产的大量场景中使用,如导航、遥感等,因此又可以将此类技术在不同场景中的应用进行归类论述。为更好地与国际数字农业技术先进国家的应用情况作对比,本文进一步参考美国农业部报告^[20]所归纳的 7 大技术体系,对内黄县数字农业技术的应用进行系统介绍,以方便读者更好地理解每个技术体系的应用场景和作用。

项目实施时,根据中试基地可集成的技术体

系和场景及建设目标设计了如图 1 所示的总体技术框架,并在不同任务板块中融合了前述 7 大类技术体系。例如,产量地图、土壤地图、变量播种、变量施肥、变量喷药等技术体系的应用构成了图 1 的技术集成框架中的核心,即基于处方图的可变量操作和产量地图,或也可以理解为数字农艺的核心。而利用北斗导航的智能农机是数字农艺与农机融合的底层支持技术。无人机及卫星遥感主要用于数字化巡田系统的构建。最后,所有数据均由算法和模型体系所构成的多源数据分析引擎进行最终分析和知识提炼,形成决策体系。上述核心技术集成后,为图 1 中的平台开发,即支持数字农业社会化服务体系建设的低成本数据基础设施提供业务内核。

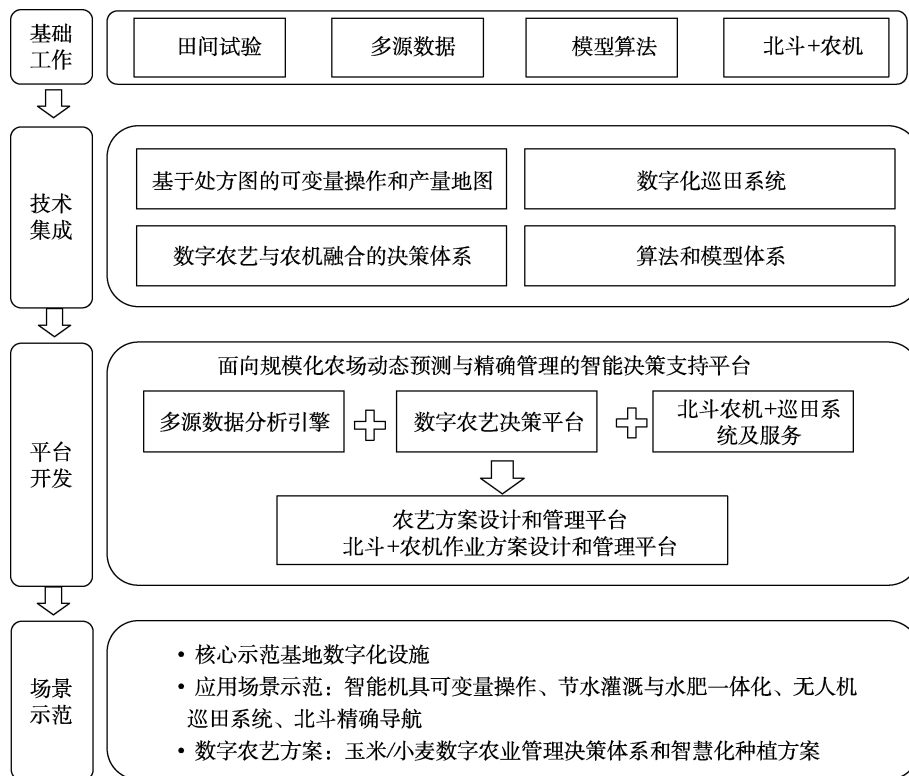


图 1 内黄中试基地技术体系框架设计

Fig.1 Technological framework of Neihuang demonstration base

3.1 产量地图

产量地图指利用感知技术和算法分析,对作物产量在特定区域内的空间分布情况进行精确评估,形成产量在区域内的分布图。产量地图可由收割机上的测产传感器所记录的产量数据通过算法生成,或通过遥感作物长势数据和算法估计产量的空间分布情况生成。产量地图数据不仅可帮

助用户掌握产量空间变异状况和地块整体产量水平,还是进行各种复杂数据分析和建模,特别是优化未来播种、施肥、打药或品种选择的重要依据。据美国农业部数据,产量地图应用在玉米、小麦等多种作物中可提升平均高达 23% 的产量,在 7 类数字农业技术中对产量提升贡献最大^[20]。

内黄项目的产量地图技术采用收割测产传感

器采集实时数据,通过算法生成产量地图。如图 2 所示,收割测产系统包括谷物流量传感器、割台高度传感器、高精度卫星定位设备、控制终端等。所收集的原始数据经过清洗与空间分析算法处理,才能形成产量地图(图 3)。



图 2 收割机上所安装的测产系统的基本构成

Fig.2 Components of combine-mounted yield monitor

3.2 土壤地图

土壤地图是反映田块或区域尺度内土壤属性在空间变异的一种数据呈现方式,主要用于评估土壤不同指标的空间异质性或用于指导精准管理,如精准施肥或播种等农事操作。常见的土壤地图有土壤数字地表模型图、土壤电导率分布图、土壤有机质分布图、土壤墒情图、各种土壤大中微量元素图等。

内黄项目实施中按 1 公顷取 1 个土样的密度建立了完整的土壤大中微量元素的土壤地图,如图 4 所示。从地图中可以直观看到营养分布的空

间异质性较高,而通过土壤地图明确这种异质性,将使作物营养的精准管理在施肥操作环节中成为可能,进而指导可变量施肥或播种。土壤地图也明确了整个区域地力分布,例如,氮和钾均较低,而磷则偏高。

土壤地图的获得可以通过多种手段。例如,可利用遥感数据,包括卫星遥感技术(如 Landsat、Sentinel-2)获取土壤表面的光谱信息,或者用多光谱(高光谱)无人机或载有相应土壤理化特征扫描传感器的农机平台,如加装了可见光/近红

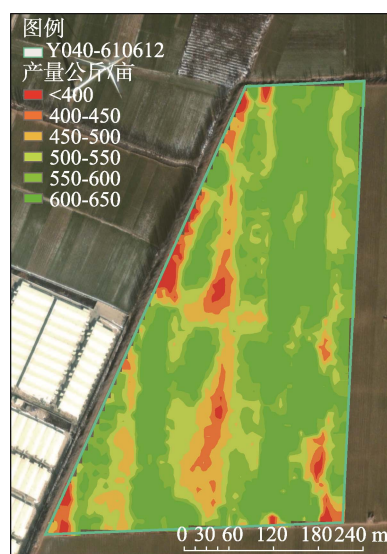
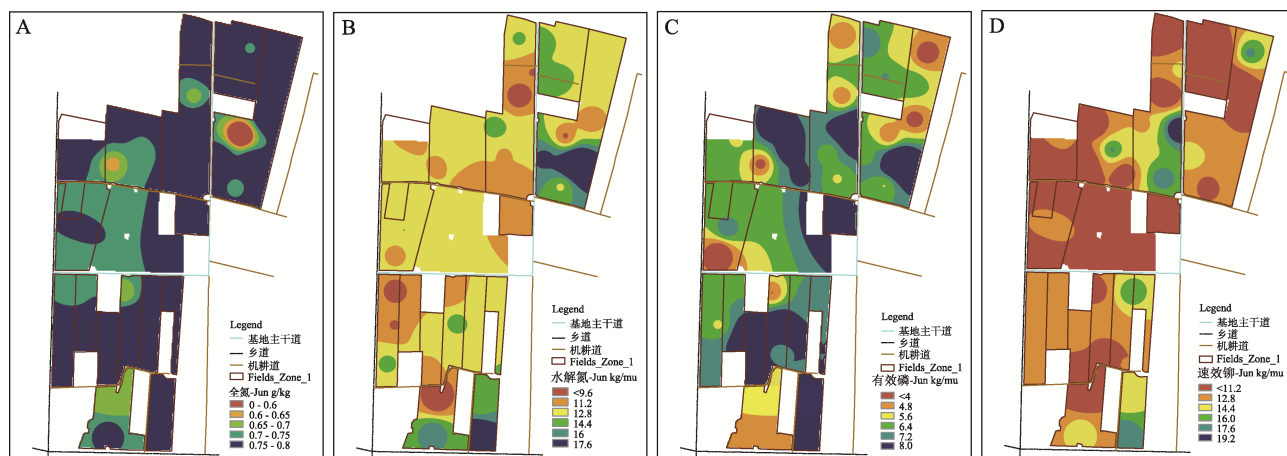


图 3 由安装在内黄县某农机合作社收割机上的测产传感器实收数据分析后形成的小麦测产地图

Fig.3 A yield map generated by the data from a yield monitor on a combine operated by an ag-machinery cooperative in Neihuang



注: A、B、C、D 分别为基地全氮、水解性氮、有效磷、速效钾的分布。

Note: A, B, C, and D represent the distributions of total nitrogen, hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the base, respectively.

图 4 基于多点取样和检测分析数据生成的土壤地图

Fig.4 Soil maps generated by testing results of multiple soil samples showing distribution of total nitrogen, hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium

外 (Visible light/near infrared, VIS/NIR) 光谱扫描仪的农机。土壤地图还可以利用地面监测点调查数据, 如通过实地采样和实验室分析获取土壤的物理、化学属性, 再通过相关插值算法形成土壤地图。

简单的土壤地图可以是单一指标的, 如图 4 所示全氮地图, 仅反映一个土壤指标, 也可以通过复杂算法或多指标融合形成的指数图, 如土壤肥力地图。此外, 还可以通过诸如机器学习模型或神经网络融合高维度指标, 或多时相遥感数据形成的土壤数据立方体 (Soil data cube) 生成可变量施肥处方图等。土壤地图的应用对于产量提升和土壤健康可持续发展十分重要, 全球农业发达国家均有较多研究, 但对于中小农户如何应用土壤地图实现精准施肥还需要解决低成本数据获取和精准执行机械配套等问题^[17,20,26]。

3.3 精准 (变量) 播种

精准播种 (Precision seeding) 是数字农业领域发展较早的技术, 自上世纪 90 年代以来, 特别是以美国 Precision Planting 等公司为代表的精准播种技术逐步推广, 并发展到可变量播种 (Variable rate seeds)^[27], 对产量提升可达 10% 以上^[16,20]。作为中国和美国种植面积最大的作物, 近几十年玉米种植密度的提升是其单产提升的主要因素之一, 如美国玉米在 1987—2016 年间, 农艺优选密度从 75 000/ha 增加到 93 000/ha, 产量由 9.3 t/ha 增加到 12.7 t/ha, 平均密度每年增加 700/ha^[28]。因此, 玉米的精准播种极为重要。中国玉米的种植密度平均不到 60 000/ha, 较美国仍有较大差距, 在通过提高种植密度来提升产量方面仍有极大潜力^[29]。

美国的研究表明^[30], 当代杂交玉米种植密度与产量的关系可用二项式 $Y=a+b \cdot X-c \cdot X^2$ 描述, 其中 Y 为产量, X 为种植密度, 低密度条件下, 当密度上升, 产量也随之上升, 但密度超过一定合适水平, 产量则反而会下降。目前美国较为理想的种植密度约在 90 000~100 000/ha^[28]。内黄中试基地采用了高密度种植精准播种和水肥一体化技术。参考美国高产玉米种植, 设置多个种植密度水平, 包括: 67 500, 75 000, 82 500, 90 000, 105 000 和 120 000/ha。

为实现不同密度播种, 设置了两种行距, 有针对低密度的等行距 (60 cm, 67 500~75 000/ha) 和针对高密度的宽窄行 (40~80 cm, 82 500~120 000/ha)。图 5 显示了 38 个不同地块或小区的产量与种植密度的数据, 可见二者呈现高度的线性正相关, 表明在精准水肥管理条件下, 高密度种植对产量的提升是显著的。因此, 如何在提高种植密度同时确保密植条件下的水肥充足和减少病虫气象灾害的影响, 有效管理是实现基于现有品种和农田条件下提高单产的关键。而这些则涉及出苗后的精准施肥、灌溉和植保。

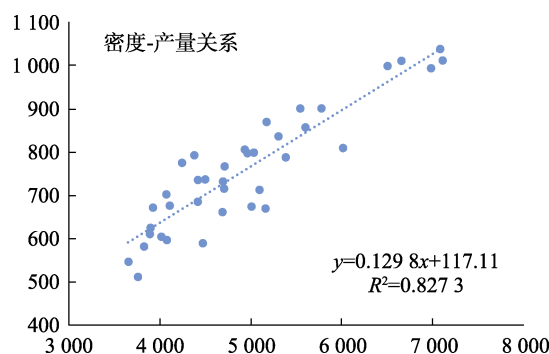


图 5 不同地块播种密度与产量的关系

Fig.5 The relationship of plant density and yield among different fields

3.4 精准 (变量) 施肥

高盛 2016 年估计, 精准施肥是数字农业技术应用价值体现最大的板块^[16], 由精准施肥更进一步的可变量施肥的增产效果可达 15% 以上^[20]。精准施肥或变量施肥的基本决策依据是土壤肥力检测数据和作物需肥规律以及生长发育过程中实际环境影响下的多种要素的综合分析。由图 4 可知, 中试基地的肥力分布很不均匀, 在根据种植密度和目标产量设置好需肥量的条件下, 根据土壤肥力调整 NPK 配比并精准施用就变得非常重要。

内黄项目根据土壤检测数据首先针对每块地和每个品种设计了施肥基础方案, 包括基肥和追肥比例, 然后根据出苗后的长势、营养和天气情况, 基于无人机遥感长势监测和营养诊断以及天气情况进行追肥操作。整个项目区平均 $N-P_2O_5-K_2O$ 用量为 229.5-40.5-73.5 kg/ha。由于土壤检测结果表明有效磷水平较高, 因此磷肥使用量相对较低。与农户普遍采用 750 kg/ha 基肥相比, 内黄项目基

肥根据灌溉方式不同采用了 300 kg/ha 和 600 kg/ha 两种方案，同时加强了钾肥的使用。

表 1 中为几块代表性地块的肥料平均使用情况，数据显示，在水肥一体化条件下半紧凑型品种在高密度种植（大于 90 000/ha）或相对常规密度种植（67 500~75 000/ha）均可有较好的产量。但松散型品种（万盛 69）则产量对肥料用量的反应相对较低。水肥一体化条件下，氮肥的偏生产力在 45.5~66.4 kg/kg 之间，而喷灌方式下，在 30.2~75.5 kg/kg 之间，整体上，水肥一体化条件

下，氮肥利用率综合相比要更高。值得注意的是，在免耕条件下，华西 812 在 75 000/ha 种植密度下表现出了较高的氮肥利用率（偏生产力达 75.5 kg/kg）。测土结果显示，6 月初出苗期，区域水解性氮平均为 75.7 mg/kg，到 9 月，上升为 82.9 mg/kg，速效钾由 73.8 mg/kg 上升到 82.2 mg/kg，有效磷从 40.3 mg/kg 下降到 37.8 mg/kg。氮与钾的上升有利于灌浆期的植株健康和高产，而磷的水平略有下降，显示在减少磷肥施用情况下，作物有效利用了土壤中已有的磷。

表 1 代表性品种和田块在不同种植密度下的实际施肥量与产量
Table 1 Yield responses to the actual fertilization of specific cultivars under different plant densities

灌溉方式	玉米品种	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O/kg	密度/(株/ha)	产量/(t/ha)	耕整地方式
代表性水肥一体高产地块	育玉 315	210-39-134	120 000	14.0	深翻
	华西 836	210-39-134	67 500	13.6	深翻
	MY73	255-45-109	82 500	12.6	深翻
	万盛 69	240-62-146	105 000	11.1	深翻
	迪卡 688	260-45-109	82 500	11.8	深翻
代表性普通喷灌地块	MY73	297-30-86	75 000	10.7	深翻
	万盛 69	297-30-86	75 000	9.0	深翻
	MY73	272-36-48	75 000	10.1	免耕
	华西 812	140-48-45	75 000	10.5	免耕
	郑单 958	240-30-36	75 000	11.1	深翻

3.5 精准（变量）喷撒

植保无人机进行药剂和肥料的喷撒是中国智慧农业发展的一个特色领域，也是全球领先的一项技术。玉米生产中，由于植株冠层密度大，因此喷撒需要结合多种技术手段，包括地面机械和无人机，针对不同场景因地制宜、因时制宜进行。精准喷撒的主要场景包括病虫草防治，或根据需要使用生理调控剂，如苗期控旺，以及叶面肥和追肥等应用。而另一方面比较重要的是数字化的病虫草害监测分析与预报。因此，精准喷撒作业既有基于处方图在空间维度进行精准或变量喷撒的应用，也有在时间维度，对于病虫草或生理调控在何时进行精准喷撒的应用。

黄淮海地区玉米生产最重要的病害是玉米南方锈病，另外杂草管理也是玉米种植所必需的环节。中试基地主要开展了精准除草、追肥以及基于病害预报进行的叶部病害防治等精准（变量）喷撒作业。例如，受 2024 年 6 月玉米播种出苗期

干旱和强降雨快速转换天气的影响，部分田块出现了严重的出苗晚和杂草问题，对控旺和除草操作形成了较大的挑战。为减少除草剂对低叶龄苗的影响，利用无人机巡田数据对杂草分布密度进行了分析（图 6），并形成了精准作业方案，以利用地面机械进行大用水量除草，保证除草效果。

在 7 月下旬，受强台风“格美”的影响，黄淮海地区普遍有强降雨，而这种天气使南方锈病流行^[31]。为精准进行病害预防，对南方锈病区域发生风险进行了数值预报（图 7）。预报结果分为 1~4 级风险等级，即 1 级：无风险，2 级：低风险，3 级：中风险，4 级：高风险，对应的农事操作为 1 级：无操作建议，2 级：按正常管理安排进行巡田，3 级：加强巡查，如种植感病品种，应在 5~7 天内作好药剂防治的作业准备，但不需要立即作业，可根据巡田结果发现的初侵染情况或后续病害风险预报结果决定作业时间；4 级：5~7 天内作好药剂防治准备，并在后续合适的作业条件下开展作业。



注：紫色区域代表遥感数据识别出来的杂草密集区域，需要采用大剂量除草剂。

Note: the purple area represents the weed-intensive area identified by remote sensing data, which requires the use of large doses of herbicides.

图 6 7 月上旬田间杂草分布密度情况

Fig.6 Weed density distribution in fields in early July



注：1~4 级，分别对应无风险，低风险，中风险，高风险。

Note: grade 1~4, corresponding to no risk, low risk, medium risk and high risk.

图 7 7 月下旬利用病害数值预报模型生成的内黄区域南方锈病在 8 月上中旬的发生风险等级（示意图）

Fig.7 A map generated by a numerical disease forecast model of southern corn rust in late July showing the grades of regional disease risk in early to middle August (sketch map)

从 7 月 24 日生成的预报图上可见，在 8 月上中旬，内黄区域属于南方锈病发生风险从中等级（3 级）向高等级（4 级）过渡区域（黄色到红色），绝大部分区域为高风险，因此，需要采取药剂喷施预防病害初侵染的措施。据此，基地在 7 月底进行了针对南方锈病的无人机飞防作业。根据 8 到 9 月的田间观察情况，即使是高密度种植的感病品种万盛 69 上，整体上仅有零星发病，表明防治是及时且成功的。

3.6 北斗导航与无人机遥感

中国已建成世界先进水平的北斗全球导航定位系统。基于北斗导航技术的无人机飞防，农机辅助驾驶，路径规划，精准作业和无人农场已有较多应用，覆盖了棉花、水稻、玉米、小麦等作物管理中的多种场景^[32-33]。内黄中试基地的导航技术应用主要分两类，一类是基于路径规划的农机作业精准辅助驾驶或自动巡航，如精准播种环节、无人机飞防、遥感巡田。二类是作业过程的取样点定位数据的获取，如收割测产传感器获取的产量地图数据主要包括时间序列数据、空间坐标数据和各坐标点的产量数据（图 8）。

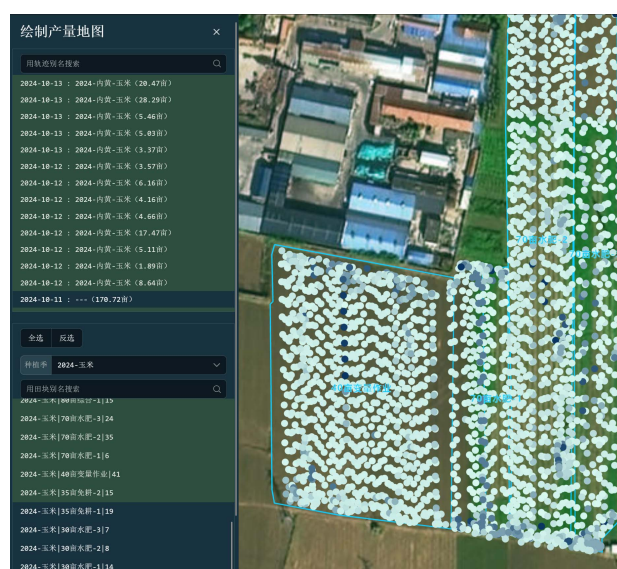


图 8 玉米测产数据与北斗导航系统采集的坐标数据在管理系统中的可视化展示

Fig.8 Visualization of corn yield data and Beidou navigation system data in a management system

玉米密植高产常采用宽窄行种植，人工驾驶的播种机很难在百米以上距离保持直线和精准行距。因此，播种机按设定的宽窄行精准行走是发挥北斗技术效果的关键场景之一，可以保证出苗均匀和更高齐苗率，以及后续农机作业按已记录轨迹精准执行，可实现全程智能机具作业。同时，采用北斗导航辅助驾驶使农机作业时间窗口可延长到夜间无光照条件下进行，大大提高夏玉米抢收抢种其间农事作业效率，特别是高标改造过的超长地块，如 400 m 以上的地块的作业速度和质量。

另一项关键应用是基于北斗导航技术和多光

谱传感器的无人机遥感巡田用于日常工作和数据采集。内黄项目建立了一个支持快速巡田数据采集和处理的云计算平台(图9),可在2~6 h内完成千亩级多光谱无人机巡田数据的分析与出图。此技术有利于快速查找田间可能存在问题的位置,解决技术人员管理大规模农田时无法面面俱到或有针对性地现场诊断问题的难题。多光谱遥感数据生成的多种植被指数如归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI),

红边植被指数(Normalized difference red edge index, NDRE),绿光植被指数(Green normalized difference vegetation index, GNDVI)等可用于长势、营养、病虫害和气象灾害监测,也可以与土壤地图、产量地图配合使用,生成处方图或进行高级数据分析。另一个重要应用是无人机快速巡田,为周边中小农户提供多种低成本数字化管理技术支持,如出苗率、内涝、倒伏等问题,均可通过无人机快速评估。

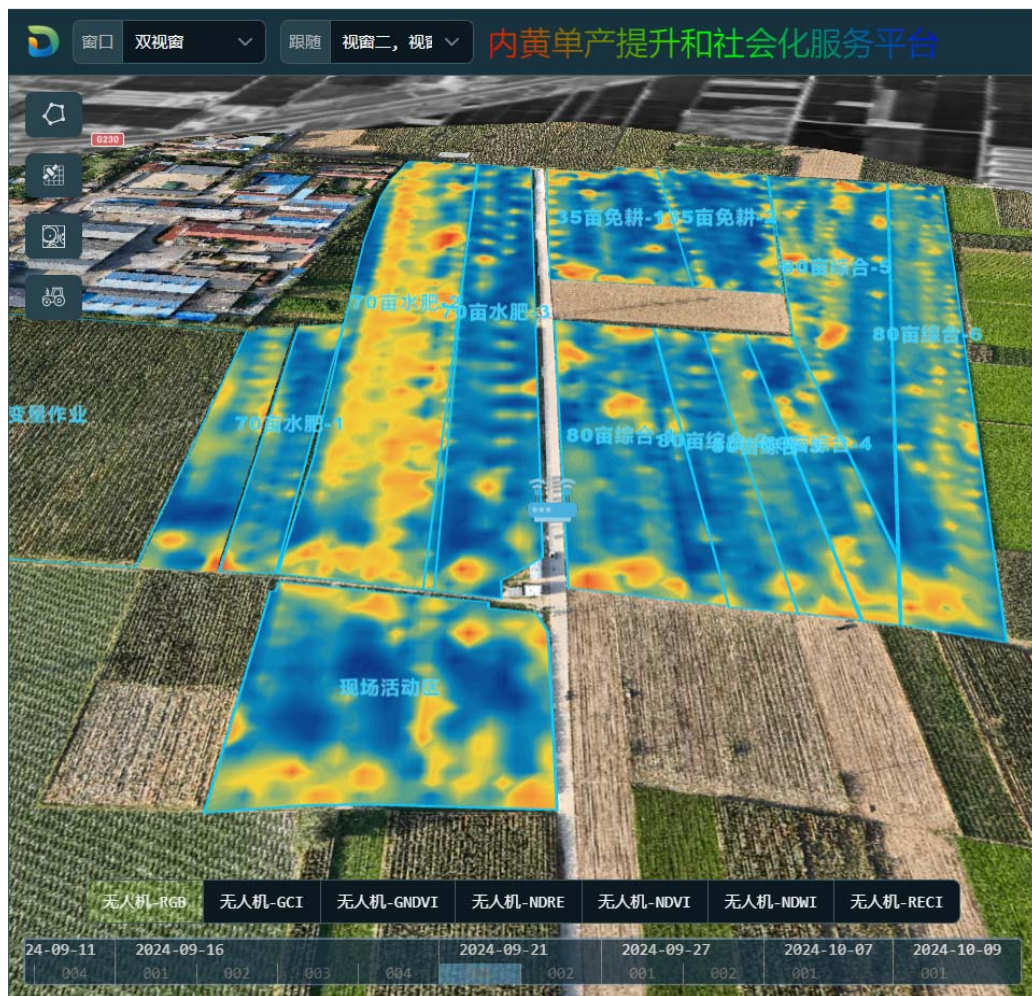


图9 可为中小农户提供数据服务的无人机遥感巡田数据与产量地图数据处理及服务系统

Fig.9 A data processing and service platform for small and mid-sized famers to provide UAV field scouting data and yield maps

4 数字化技术系统性应用的效果及未来展望

内黄中试基地数字化技术对玉米的单产提升产生了极大的效果。通过与基地内由小农户按传统种植方式的插花地块的玉米产量(约680 kg/亩)进行对比测产,数字化技术支持下的高密度水肥一体化种植在多个品种中平均增产可达24.5%,达

854 kg/亩,最高产量超过1 000 kg/亩。

数字农业能实现持续发展与商业化应用的核心是能创造更多价值,且投入低于产出。中试基地的几项主要技术体系的应用均依托较为成熟的国产化装备或软件,整体成本较低。在有配套灌溉管网系统的高标准农田基础设施上,玉米种植季数字化总投入可控制在1 500~3 750元/ha范围

内, 其中主要包括支持水肥一体化种植的滴灌系统的管网耗材、分布式气象传感器和墒情仪、高性能多光谱巡田无人机以及土壤数据采集和分析成本。同时在收获时应采用安装有测产传感器的联合收割机以生成产量地图。

根据测算, 在 3~6 ha 统一灌溉管理的区域, 配一套国产化的墒情传感器系统, 每公顷平均成本仅增加约 220~300 元。以大疆 M3M 农用多光谱无人机进行巡田数据采集, 单次飞行可覆盖 30~60 ha, 单日即可完成 120~240 ha 的巡田普查。而批量采集的土壤样本的分析成本则根据需要的指标数量变化, 一般在 100~300 元/ha 范围内。测产传感器如由收割机生产商前装, 则仅需要利用社会化服务平台进行数据分析。利用低成本的多源数据融合管理平台提供的卫星遥感和公共气象数据服务, 可满足区域农服在上万公顷范围内开展部分公益性农场级的数字化管理, 如灾害预警等。根据农田基础设施条件和服务类型, 尽管 2024 年玉米价格整体低迷, 但中试基地实现的整体增产效益 (增产 150~200 kg/亩) 仍大于数字化技术投入的成本, 而此成本随着服务面积的扩大, 还将进一步降低, 并且还会因数字化管理节省农资或劳力, 因此具有商业化推广的价值。

另一项重要成果是数字化技术使玉米在全生育周期的健康状态均得到有效管理, 特别是扬花期到灌浆期的叶部病害和穗腐病的发生均轻微, 有效地控制了由穗腐导致的真菌毒素问题, 提升了籽粒品质。对基地 6 个不同地块所取的穗样进行真菌毒素检测结果表明, 所有检测指标均远低于国家对于食品或饲料原料的相关毒素标准^[34-35], 大部分要小一个数量级, 或未检出, 如未检出黄曲霉素等。在抗逆性方面, 数字化管理下的玉米在 2024 年内黄连续遭受高温干旱、强降雨、大风等极端天气条件下, 没有出现倒伏和严重病害爆发问题, 表明数字化技术大大提高了高密度种植下的植株抗逆性和保持健康的能力。

FAO 近年来多次强调要提高农业粮食体系韧性, 即面对各种冲击和压力时, 农业粮食体系能够维持其功能并迅速恢复的能力。增强农业粮食体系的韧性需要加强支持中小农业粮食企业、合

作社和社会保护计划^[13]。在 2022 年, FAO 进一步强调了农业自动化, 包括机械化、数字化和机器人技术的应用, 对农业粮食体系提高生产效率、减少劳动强度和优化资源利用的影响^[15]。FAO 认为, 农业自动化可以创造新的就业机会, 但也可能导致失业, 特别是在劳动力充足的地区, 因此应确保农业自动化过程具有包容性, 并惠及所有人, 特别是中小农户。

FAO 自 80 年代以来, 在全球包括中国开展农民田间学校 (Farmer field school, FFS), 推动农业技术推广和有害生物综合治理 (Integrated pest management, IPM) 并取得巨大成效^[36-37]。在早期的农民田间学校培训中, 数字化理念或技术也有应用, 例如, 李绍石^[38]在 FAO 中国棉花 IPM 项目中编写了系列教材, 指导农民使用简单的数据图表和统计学方法开展田间记录工作。互联网技术发展使数字化技术的应用更为方便。在内黄中试基地建设中, 为更好服务中小农户, 不仅开发了适合中小农户使用的数字化服务云平台 (图 9), 智慧农业专委会在县相关部门领导下, 组织周边农业合作社成立了农服联盟, 开展产量地图、无人机巡田、现场演示、云数据服务等推广活动, 其中提供免费测产地图面积超过 200 ha, 现场活动十余次, 讲解参观和演示示范人次超过 1 000, 同时基地数字化技术的种植效果也取得了周边农户的高度认可。数字农业技术服务于单产提升和支持社会化服务并产生可持续的商业化推广效益是其发展的根本, 在《加快建设农业强国规划 (2024—2035 年)》^[39]的指引下, 内黄中试基地成果必将更加丰富更加深入, 并成为区域智慧农业发展的标杆。

致谢: 本文是在 2024 年中两次亚太经合组织 (Asia-Pacific Economic Cooperation, APEC) 农业与粮食相关会议报告基础上形成的, 以中国农业机械流通协会智慧农业产教融合专委会内黄中试基地北斗+智慧农业服务玉米单产提升项目主要工作为核心的简要综述。在内黄项目实施过程中, 得到了农业农村部信息中心、河南省农业农村厅、河南农业大学的悉心指导, 得到了中国磷

复肥工业协会、中国种子贸易协会、中国农药工业协会等行业组织的大力支持。项目还得到以下种、肥、药、械、水技术企业的支持，包括中种国际种子有限公司、新疆华西种业有限公司、河南省豫玉种业股份有限公司、新洋丰农业科技股份有限公司、开封高富聚脲醛实业有限公司、施可丰化工股份有限公司、浙江利民控股股份有限公司、中科滕森（山东）智能装备有限公司、雷肯农业机械（青岛）有限公司、阿玛松农业机械天津有限公司、山东圣大节水科技有限公司、武汉霖阳科技有限公司、耐特菲姆（银川）农业科技有限公司的积极协助，充分体现了数字化技术融合下的种肥药械水“联合起来，把地种好”的理念。最后，特别感谢国家粮食和物资储备局科学研究院粮食储运研究所唐芳研究员在真菌毒素检测方面对本项工作提供的大力支持。

参考文献：

- [1] UNICEF. The State of Food Security and Nutrition in the World 2024: financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms[R]. 2024.
- [2] UNICEF. The state of food security and nutrition in the world 2023: urbanization, agrifood systems, transformation and healthy diets across the rural-urban continuum[R]. 2023.
- [3] JIA N, XIA Z, LI Y, et al. The Russia-Ukraine war reduced food production and exports with a disparate geographical impact worldwide[J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5(1): 765.
- [4] FSIN/GNAFS. Global report on food crises 2024[R]. Rome, 2024.
- [5] 2024 年 1—12 月我国农产品进出口情况[EB/OL]. Import and export of agricultural commodities of China from January to December 2024[EB/OL]. https://www.moa.gov.cn/ztl/nybrl/rllx/202501/t20250120_6469303.htm.
- [6] IPCC. Climate change 2001: synthesis report[R]. Cambridge University Press Cambridge, 2001.
- [7] IPCC. Climate Change 2023: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Core Writing Team H L, J. Romero, Geneva, Switzerland: IPCC, 2023: 184.
- [8] LI C, CAMAC J, ROBINSON A, et al. Predicting changes in agricultural yields under climate change scenarios and their implications for global food security[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 2858.
- [9] WMO. WMO global annual to decadal climate update 2024-2028[R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2024: 27.
- [10] ZHANG Y, DONG X, WANG H, et al. Maize breeding for smaller tassels threatens yield under a warming climate[J]. Nature Climate Change, 2024, 14(12): 1306-1313.
- [11] OERKE E C, DEHNE H W, SCHONBECK F, et al. Crop production and crop protection: estimated losses in major food and cash crops[M]. Amsterdam, Denmark, Netherland: Elsevier, 1994.
- [12] UNICEF. The state of food security and nutrition in the world 2021: making agrifood systems more resilient to shocks and stresses[R]. 2021.
- [13] FAO. The state of food and agriculture 2021: making agrifood systems more resilient to shocks and stresses[R]. Rome: FAO, 2021.
- [14] World Bank Group. Future of food: harnessing digital technologies to improve food system outcomes[R]. Washington, DC: World Bank, 2019.
- [15] FAO. The state of food and agriculture 2022: leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems[R]. Rome: FAO, 2022.
- [16] REVICH J, BOROUJERDI R D, SCOTT-GALL H, et al. Precision farming: cheating malthus with digital agriculture[R]. EQUITY RESEARCH New York, 2016.
- [17] AULBUR W. Farming 4.0: How precision agriculture might save the world[R]. Roland Berger Focus, Munich, Germany, 2019.
- [18] Bayer's recent FieldView release turns farm information into answers[EB/OL]. <https://www.bayer.com/en/us/news-stories/fieldview-features>.
- [19] JAMES C. Global status of commercialized biotech/GM crops: 2013[R]. Ithaca, New York, U.S.A.: International Service For the Acquisition of Agri-biotech Applications, 2013.
- [20] MCFADDEN J, NJUKI E, GRIFFIN T. Precision agriculture in the digital era: recent adoption on U.S. farms[R]. EIB, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, 2023.
- [21] 国家统计局. 中国劳动统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [22] 中研普华研究院. 2024 年中国智慧农业市场规模及行业投资前景分析[R]. 2024.
- [23] 农业农村部信息中心. 中国数字乡村发展报告(2022 年)[R]. 2023.
- [24] 农业农村部. 全国智慧农业行动计划(2024—2028 年)[R]. 北京: 农业农村部, 2024.

- 京, 2024.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs. National smart agriculture action plan (2024-2028)[R]. Beijing, 2024.
- [25] FAO. Farm data management, sharing and services for agriculture development[M]. 2021.
- [26] CHEN S, ARROUAYS D, LEATITIA MULDER V, et al. Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: a review[J]. *Geoderma*, 2022, 409: 115567.
- [27] ŠARAUSKIS E, KAZLAUSKAS M, NAUJOKIENĖ V, et al. Variable rate seeding in precision agriculture: recent advances and future perspectives[J]. *Agriculture*, 2022, 12(2): 305.
- [28] ASSEFA Y, CARTER P, HINDS M, et al. Analysis of long term study indicates both agronomic optimal plant density and increase maize yield per plant contributed to yield gain[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4937.
- [29] LUO N, MENG Q, FENG P, et al. China can be self-sufficient in maize production by 2030 with optimal crop management[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2637.
- [30] ASSEFA Y, VARA PRASAD P, CARTER P, et al. Yield responses to planting density for US modern corn hybrids: a synthesis-analysis[J]. *Crop Science*, 2016, 56(5): 2802-2817.
- [31] 施艳, 袁虹霞, 李庆伦, 等. 2021 年黄淮地区夏玉米南方锈病流行因素分析及防控对策[J]. *植物保护*, 2023, 49(4): 309-311, 356.
- SHI Y, YUAN H X, LI Q L, et al. Epidemic factors of southern corn rust and control techniques used in Huanghuai area in 2021[J]. *Plant Protection*, 2023, 49(4): 309-311, 356.
- [32] 陈学庚, 郝哲. 北斗导航技术在现代农业中的应用[J]. *中国测绘*, 2020(1): 6-13.
- CHEN X G, HAO Z. The application of Beidou navigation technology in modern agriculture[J]. *China Surveying and Mapping*, 2020,(01):9-13.
- [33] 罗锡文, 胡炼, 何杰, 等. 中国大田无人农场关键技术研究与实践[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(1).
- LOU X W, HU L, HE J, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(1): 1-16.
- [34] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 国. 食品安全国家标准食品中真菌毒素限量 GB2761—2017, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-maximum levels of mycotoxins in foods GB2761—2017, 2017.
- [35] 国家标准化管理委员会 国. 饲料卫生标准 GB13078—2017, 2017.
- National Standardization Administration of China. Hygienic standard for feeds GB13078—2017, 2017.
- [36] BRAUN A, DUVEKOG D. The farmer field school approach-history, global assessment and success stories. Background paper for the IFAD rural poverty report 2010[R]. 2008: 39.
- [37] 肖长坤, 郑建秋. 国内外农民田间学校现状、问题与对策[J]. *北京农业职业学院学报*, 2008, 22(4): 72-75.
- XIAO C K, ZHENG J Q. Current situation, issues and countermeasures of farmer field schools at home and abroad[J]. *Journal of Beijing Vocational College of Agriculture*, 2008, 22(4): 72-75.
- [38] 李绍石. 农民能学会用的简单图示统计分析第一讲: 观测资料的算术平均数和标准差[J]. *植保技术与推广*, 2002, 22(9): 41-42.
- LI S S. Simple graphical statistical analysis that farmers can learn to use, lecture 1: arithmetic mean and standard deviation of observational data[J]. *Plant Protection Technology and Extension*, 2002, 22(9): 41-42.
- [39] 中共中央, 国务院. 加快建设农业强国规划(2024-2035 年)[R]. 北京, 2025.
- The Central Committee of the Communist Party of China, The State Council. Planning for accelerating the construction of an agricultural power (2024-2035)[R]. Beijing, 2025. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。