

数字技术赋能农业绿色发展：内在机制与典型实践

胡霜, 王火根*, 肖丽香

(江西农业大学经济管理学院, 南昌 330044)

摘要: 推进农业绿色发展是实现农业现代化和建设生态文明的重要标志。本文基于我国农业绿色发展的现状和问题, 从要素配置效应、产业协同效应、信息共享效应和信息反馈效应4个维度剖析了数字技术赋能农业绿色发展的内在机制。结合当前农业企业数字技术的应用实践, 基于制度经济学视角阐述了数字技术赋能农业绿色发展的内在逻辑, 针对性提出了数字技术赋能农业绿色发展的二元驱动, 即自下而上的市场调节和自上而下的政府调控。在市场调节方面, 从生产端主动减污降碳、消费者对绿色农产品的需求不断攀升等方面分析了数字技术驱动下农业绿色化发展; 在政府调控方面, 建议采取政策制定与经济激励、数据共享与金融支持、科技创新与网络宣传等措施, 激励和引导农业可持续发展, 实现农业生产、生态、生活全过程、全方位的绿色化, 助力农业高质量发展。

关键词: 数字技术; 农业绿色发展; 内在机制; 典型实践; 二元驱动

中图分类号: F323 **文献标识码:** A

Digital Technology Enables Agricultural Green Development: Internal Mechanism and Typical Practice

Hu Shuang, Wang Huogen*, Xiao Lixiang

(School of Economics and Management, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330044, China)

Abstract: Promoting agricultural green development is crucial for achieving agricultural modernization and ecological civilization. Based on the current status and problems of agricultural green development in China, this study analyzes the internal mechanism by which the digital technology enables the agricultural green development from four dimensions: factor allocation, industrial synergy, information sharing, and information feedback effects. Combined with current application practices of the digital technology in agricultural enterprises, this study explores the internal logic of enabling agricultural green development through digital technology from the perspective of institutional economics and proposes a dual-driving force mechanism: market and government regulation. In terms of market regulation, the agricultural green development is driven by means of active pollution and carbon reduction at the production end and rising demand for green agricultural products at the consumer side. In terms of government regulation, the agricultural green development is incentivized and guided through measures such as policy formulation and economic incentives, data sharing and financial support, and scientific innovation and network publicity. These measures can help realize the all-round, entire-process greening of agricultural production, ecology, and life, and achieve the sustainable and high-quality development of agriculture.

Keywords: digital technology; agricultural green development; internal mechanism; typical practice; dual-driving force

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2023-10-17

通讯作者: *王火根, 江西农业大学经济管理学院教授, 研究方向为农业资源与环境; E-mail: 412163218@qq.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(71963018)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

随着科学技术的不断进步、农业机械和工业合成化学品的广泛应用，我国农业生产取得了革命性的改变，显著提高了土地生产率和农产品商品率，全国粮食总产量已经连续8年保持在 6.5×10^8 t以上，肉、蛋、菜、果、鱼等农产品产量稳居世界第一，农业综合生产能力不断提高，为确保国家粮食安全和农产品有效供给发挥了重要作用。然而，从农业生产供给角度来看，一方面，我国长期以来过度依赖化肥、农药等生产要素来保障粮食总量供给，致使出现耕地质量下降、生态环境污染和水资源短缺等问题^[1]；另一方面，我国“小农户”的分散经营模式和兼业方式制约了农业的规模化与现代化发展。从农业消费需求角度来看，随着社会经济的发展，居民消费观念从吃饱转变为吃好再到吃得安全，绿色农业产品和服务日益受到消费者重视，而传统农业生产所依赖的常规动能，如增加大量农业化学品投入等，已经无法满足多样化、个性化的商品和服务需求，农业绿色发展势在必行^[2]。

实施农业绿色发展是一项复杂、长期的系统工程，关键在于通过技术进步和制度创新转变传统农业发展方式，实现经济发展与生态保护的协同^[3]。近年来，随着新一代信息技术的快速发展和广泛应用，我国着力在数字农业领域进行布局，积极推进数字技术与农业农村经济的深度融合，发布了《数字农业农村发展规划（2019—2025年）》《数字中国建设整体布局规划》等政策规划，为实现农业绿色发展提供有力支撑。数字技术作为一种关键的生产要素，正在不断融入农业生产全过程全链条，推动农业资源的合理配置，驱动农业资源要素规模化、集约化和高效化，优化农业产业组织体系，提升生产主体的市场对接和决策能力，解决农业供给端和消费需求端之间的矛盾，提高农业生产效率^[4,5]，为不断推动我国农业绿色发展、保障国家食品安全、加快农业现代化开辟了新途径。

本文以数字技术与农业绿色发展为切入点，针对我国农业绿色发展面临的主要挑战，深入剖析数字技术赋能农业绿色发展的内在机制，结合当前农业企业数字技术应用实践，提出相应的实现路径。

二、我国农业绿色发展的面临的主要挑战

推进农业绿色发展，不仅是一场关乎农业结构和生产方式调整的经济变革，更是一次行为模式、消费模式的绿色变革。我国高度重视农业的绿色发展，作出了一系列重大决策部署，农业绿色发展取得一定成效，但农业绿色发展不充分不平衡的问题依然突出。全面推进农业绿色发展需走资源利用高效、产地环境友好、生态系统改善、绿色产品供给的农业现代化道路。

（一）农业生产资源方面

资源高效利用是农业绿色发展的基本特征。长期以来，我国以高投入、高消耗、低产出为特点的传统农业生产方式已难以为继，农业资源日益趋紧。

1. 耕地资源状况下降

在耕地数量方面，2009—2022年，我国耕地面积从 1.35×10^8 hm²跌至 1.28×10^8 hm²，减少了 2.7×10^7 hm²；人均耕地面积约为0.09 hm²，约占世界平均水平的40%^[6]。在耕地质量方面，依据《耕地质量调查监测与评价办法》《耕地质量等级》（GB/T 33469—2016），将全国耕地质量等级划分为10个等级，等级越小，表明耕地质量越好。我国耕地质量情况及主要分布区域如表1所示。全国耕地质量的平均等级为4.76等，1~4等级耕地的面积占全国耕地总面积的48.54%，主要分布在东北区、长江中下游区、西南区、黄淮海区等。其中，基础地力较高的1~3等级耕地的面积为 4.21×10^7 hm²，约占全国耕地总面积的31.24%；基础地力中等的4~6等级耕地面积为 6.31×10^7 hm²，占全国耕地总面积的46.81%，是今后粮食增产增效的重要突破口；基础地力相对较差、生产障碍因素突出的7~10等级的耕地面积为 2.96×10^7 hm²，占全国耕地总面积的21.95%^[7]。整体来看，我国耕地仍需持续开展农田基础设施建设和内在质量建设。

2. 水资源稀缺与污染

我国水资源时空分布不均，2022年我国水资源总量为 2.66×10^{12} m³，年平均降水量为631.5 mm，水资源量和降水量都比多年平均值少。水资源利用方式比较粗放，2022年农田灌溉水的有效利用系数仅为0.572，与世界先进水平（0.7~0.8）存在一定

表1 全国耕地质量情况及主要分布区域

质量等级	面积/ $\times 10^7 \text{ hm}^2$	比例/%	主要分布区域
一等地	0.92	6.82	东北区、长江中下游区、西南区、黄淮海区
二等地	1.34	9.94	东北区、黄淮海区、长江中下游区、西南区
三等地	1.95	14.48	东北区、黄淮海区、长江中下游区、西南区
四等地	2.33	17.30	东北区、黄淮海区、长江中下游区、西南区
五等地	2.27	16.86	长江中下游区、东北区、西南区、黄淮海区
六等地	1.71	12.65	长江中下游区、西南区、东北区、黄淮海区、内蒙古及长城沿线区
七等地	1.21	9.00	西南区、长江中下游区、黄土高原区、内蒙古及长城沿线区、华南区、甘新区
八等地	0.87	6.48	黄土高原区、长江中下游区、内蒙古及长城沿线区、西南区、华南区
九等地	0.47	3.46	黄土高原区、内蒙古及长城沿线区、长江中下游区、西南区、华南区
十等地	0.41	3.01	黄土高原区、黄淮海区、内蒙古及长城沿线区、华南区、西南区

差距^[8]。不少区域存在水资源过度开发利用问题，水资源开发利用已逼近红线，如西北内陆河流开发利用已接近甚至超出水资源承载能力，引发了一系列生态环境问题。水体污染严重，水功能区水质达标率为63%。表2列出了2021年我国主要水系的水质状况评价结果。2021年，我国16.9%的河流水质状况评价结果低于劣Ⅲ类水，其中松花江、淮河、海河低于劣Ⅲ类水的占比分别高达38.9%、31.6%、19.6%^[9]。

3. 农业劳动力转移

随着城镇化进程的不断加快，大量农业劳动力向城市聚集，城乡二元体制下长期单向流动的城乡劳动力转移成为制约我国城乡均衡发展的重要阻碍^[10]。改革开放以来，我国城镇化率不断攀升，从1979年的17.92%上升至2022年的65.22%，而第一产业就业人员占比从1978年的70.53%跌至2022年的24.08%。城市对农业劳动力的吸纳并非是有限的，农业劳动力向城市转移及其市民化的过程通常滞后于城镇化发展过程^[11]。2021年，我国常住人口城镇化率与户籍人口城镇化率之间的差值为18.03%^[12]，这意味着我国有 2.55×10^8 个农业转移人口虽然在城

市工作，但未享受到户籍地相应的社会福利。在乡村振兴战略的引导下，通过返乡政策助力劳动力回流，推动人才、资本、技术等高质量资源要素进入农村，促进城乡要素资源重组、双向畅通，优化城乡要素结构，提高要素资源配置，拓展新发展格局的内需空间^[13]。

(二) 农业产地环境方面

产地环境友好是农业绿色发展的内在属性。现阶段我国农业面源污染主要来自化肥、农药、农膜等化学品的过量施用以及秸秆、畜禽养殖粪便不合理处置等行为^[14]。1991—2021年，我国化肥、农药、农膜的施用强度情况如图1所示。①化肥、农药、农膜等工业合成化学品的过量施用。1991—2021年，我国化肥的施用强度从187.52 kg/hm²上升至307.73 kg/hm²，增长了64.1%^[15]。自2015年实施“化肥使用量零增长行动”以来，化肥施用强度虽有所下降，但仍远

表2 2021年我国主要水系的水质状况评价结果

主要水系	监测断面数/个	分类水质断面在全部断面中的占比/%			
		I类	II类	III类	劣III类
长江	1017	7.5	70.7	18.9	2.9
黄河	265	6.4	51.7	23.8	18.1
珠江	364	9.1	62.1	21.2	7.6
松花江	254	—	15.0	46.1	38.9
淮河	341	0.9	19.4	60.1	19.6
海河	244	6.1	29.1	33.2	31.6
辽河	194	4.6	47.9	28.9	18.6

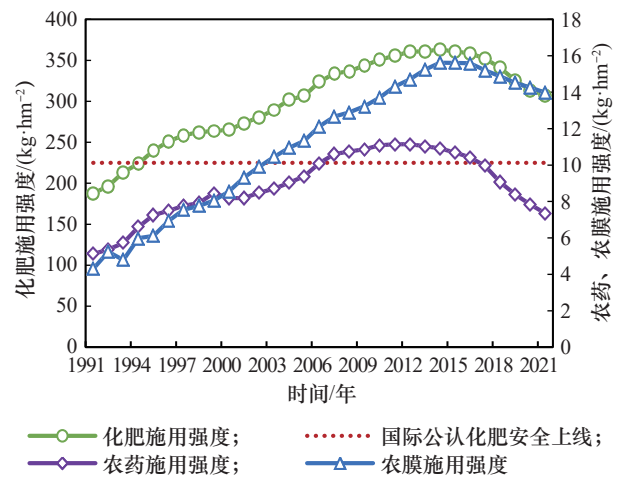


图1 1991—2021年我国化肥、农药、农膜的施用强度

超国际化肥安全上线 (225 kg/hm²)。1991—2021年, 农药施用强度从5.12 kg/hm²上升至7.35 kg/hm², 增长了43.58%; 农膜施用强度从4.29 kg/hm²上升至13.98 kg/hm², 增长了225.6%^[15]。由此看出, 我国农业生产依靠化肥、农药等工业合成化学品投入动能驱动的状况依然没有改变, 化肥中大量氮、磷等元素进入耕地土壤或流入地下水体, 对生态环境造成了一定的污染与破坏, 影响了农产品品质。② 秸秆、畜禽粪便等未进行合理处置, 资源化利用程度不高。2021年, 我国农作物秸秆产生量为8.65×10⁸ t, 秸秆综合利用率为88.1%; 用于配置饲料的秸秆约占秸秆总量的60%, 用于原料使用的秸秆占比较低(约为0.9%), 秸秆资源化利用程度不高^[16]。截至2021年年底, 全国畜禽粪便产生量为3.05×10⁹ t, 畜禽粪污综合利用率超过76%^[17], 但粪污产生量大、粪便无害化和资源化利用率不高。传统农业生产方式仍然面临诸多挑战, 亟需向绿色农业生产方式转型, 从根本上治理农业面源污染问题。

(三) 农业生态系统方面

生态系统改善是农业绿色发展的根本要求。我国较为粗放的农业生产方式使农业生态系统出现了结构失衡、功能退化等问题, 环境形势严峻。目前, 我国土地退化问题依然严重, 2013—2022年, 耕地面积从1.53×10⁸ hm²减少至1.28×10⁸ hm², 减少了16.34%, 而建设用地面积从3.3×10⁷ hm²增加至8.2×10⁷ hm², 增加了148.48%^[6]。此外, 我国的水土流失严重, 2005—2022年, 累计水土流失治理面积从9.47×10⁷ hm²增长至1.56×10⁸ hm², 累计除涝面积从2.13×10⁷ hm²上升至2.416×10⁷ hm²^[18] (见图2)。随着人口增加和自然生态环境的破坏, 全球气候变暖, 极端天气事件频发, 我国面临生物栖息地丧失、生物多样性下降的严峻局面。因此, 必须重视生态环境保护与建设, 打好降污防治攻坚战, 推动人与自然和谐共生。

(四) 绿色产品供给方面

绿色产品供给是农业绿色发展的重要目标。我国农产品多而不优、品牌杂而不亮、绿色标准体系还不健全、优质优价的市场机制尚未完全形成、绿色食品生产企业销售理念落后, 还不能完全满足居民消费结构升级的需要。《中国绿色食品统计年报》的数据显示^[19], 2022年, 我国认证的绿色食品企业

有9460家, 产品总数为19 612个, 较2009年以来分别年均增长了11.50%和9.73%; 全国累计有效使用绿色食品标志的企业总数为25 928个, 产品总数为55 482个, 较2009年以来分别年均增长11.91%和10.19%, 总量规模稳步扩大。尽管如此, 我国绿色产品产地环境监测却在减少, 品牌效益不够明显。2022年, 全国产地环境监测面积为1.04×10¹¹ hm², 较2009年以来年均下降了3.5%; 国内销售额约为5400亿元, 出口额为31亿美元, 较2009年以来分别年均增长了4.2%和2.92%, 增长率较低^[19] (见图3)。目前, 我国农业仍存在生产资源利用效率低, 农业面源污染, 生态环境破坏和绿色农产品供给不足等问题。数字技术与农业深度融合, 助力解决农业生产、生态和生活过程中存在的诸多问题, 在实现农业绿色发展中发挥重要作用。

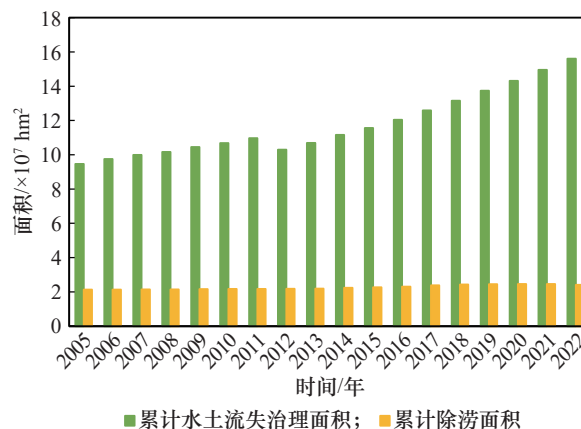


图2 2005—2022年我国累计水土流失治理面积和累计除涝面积

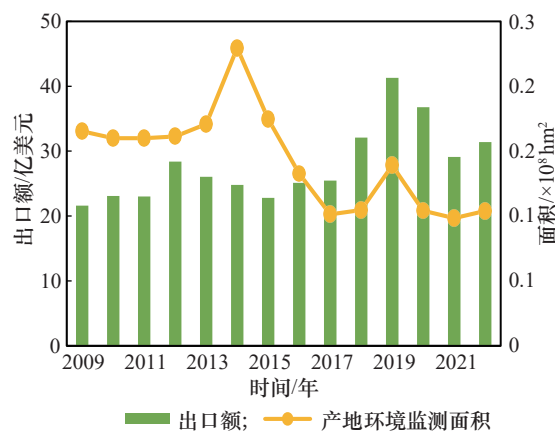


图3 2009—2021年我国农产品出口额和产地环境检测面积

三、数字技术赋能农业绿色发展的内在机制

数字技术是推动农业产业结构转型升级的重要动力^[20]，助力解决农业生产和消费过程中存在的诸多问题，在实现农业绿色发展中发挥重要作用。数字技术赋能农业绿色发展指在农业要素、农业生产、流通等环节的全面数字化，通过优化要素配置、建立产业协同、实现信息共享和反馈机制，实现合理利用农业资源、降低生产成本、改善生态环境、提高农产品品质和市场品牌影响力的目的^[21]。数字技术赋能农业绿色发展的实现路径如图4所示。

(一) 要素配置效应

2019年，我国首次将数据要素提升至生产要

素的战略高度^[22]。数据作为一种重要的生产要素纳入到生产函数中，在促进农业绿色发展发挥关键作用。① 农业生产中的数据要素可以改进生产流程、优化组织形式、根据市场需求决定生产产量，解决农业生产要素的不合理配置现象，进而让产出接近潜在产能。② 将现代信息技术如计算机技术与农学、生态学、土壤学等基础学科有机结合，在农业生产过程中实现测土配方、选种育种、病虫害、水肥状况等信息的定期获取，生成动态空间信息系统，进而根据目标产量精准调控与农作物生产状况相关的各个环节的资源需求量，显著降低对农业资源的消耗，提高农业劳动生产率。③ 利用建立的农业信息平台，提升信息交互效率，缓解信息不对称问题，优化产品匹配与交易，实现农业生产

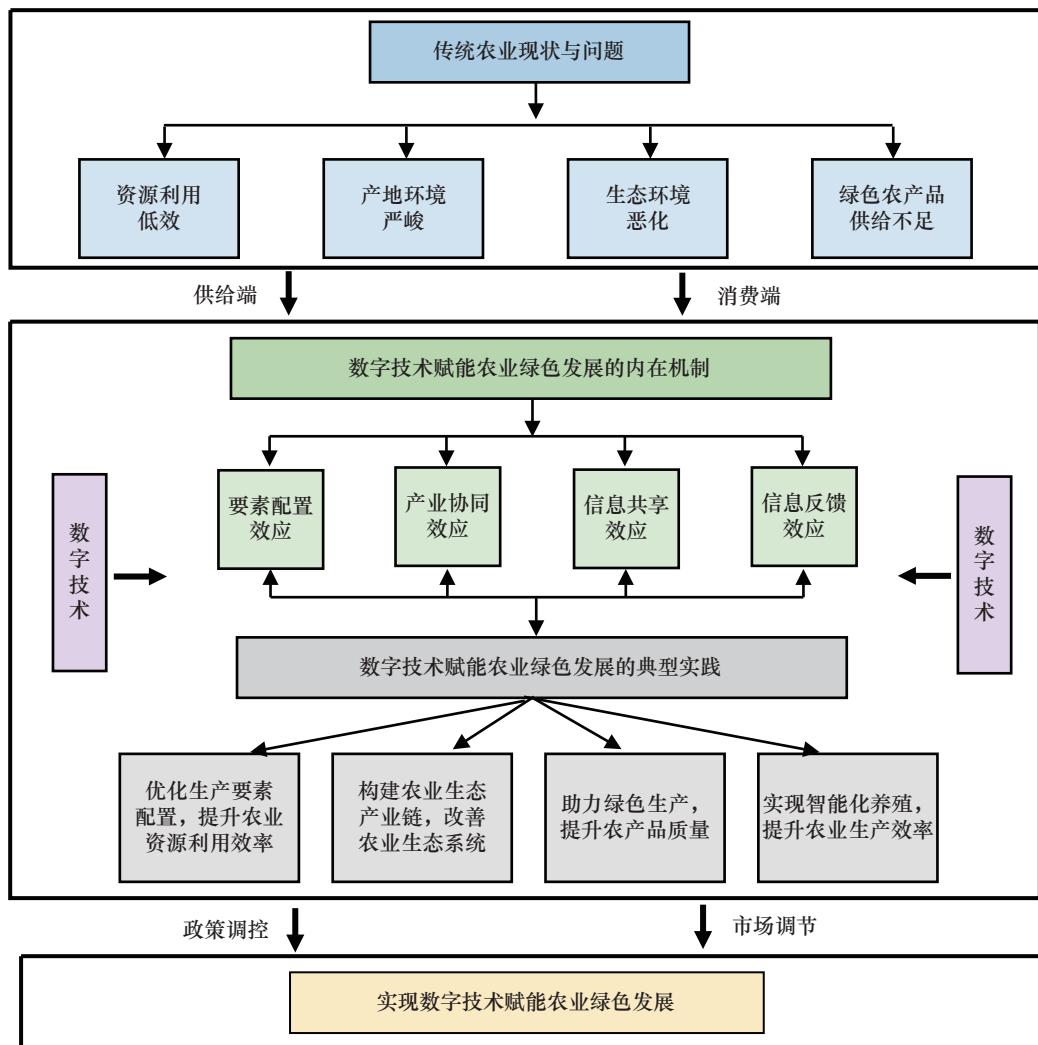


图4 数字技术赋能农业绿色发展的实现路径

要素的合理流动，减少企业和用户的搜寻成本，提升农业生产资源的配置效率，最终实现农业绿色发展^[23]。

（二）产业协同效应

数字技术为农业产业链发展创造了更多合作与交流的机会，通过数据共享与整合、供应链优化、资源共享与节约等举措，可以更好地发挥协同作用，促进农业各系统的绿色协调发展。① 数字技术的应用打破了农业生产活动中的“信息孤岛”，使绿色生产技术等相关数据的获取、传输和共享更为便捷。一方面，农业产业链上下游的企业和组织可以共享、整合和分析彼此的信息数据，帮助企业更好地了解消费者对绿色农产品的市场需求，作出更加明智的决策；另一方面，农业社会服务平台的农用物资直供、农作物病虫害专业化统防统治服务可以节约不同农业经营主体的农业机械、物流仓储空间等资源，实现安全、科学、合理用药，提高资源利用效率，保护农业生态环境。② 数字技术助力农业供应链数字化转型，实现农业供应链各环节之间的协同。通过数字化技术，农业生产商可以实时监测库存水平、预测需求、优化生产计划，而供应商则可以根据需求情况灵活调整供货计划。通过农业产业的紧密协同，可以降低库存成本、提高交付效率，有利于农业生产、流通、销售等全产业链的绿色化发展。

（三）信息共享效应

数字技术可以突破时间和地点的约束，促使信息传输、经济交易等行为在更小的跨度上实现，促进农业信息的整合和共享，加强农民、农业专家、科研机构和政府之间的合作与交流，为农业生产决策提供了更全面、准确的依据，推动农业生产的绿色化和现代化进程。① 数字技术可以实时、精准地采集大量农业数据，如土壤水分、气象信息、作物生长状况、病虫害监测、市场价格等，农民、农业专家和行业主管部门可以获取到全时空、全方位的农业数据，更好地促进信息共享和交流，有助于提高有机绿色农产品的产出率。② 通过数字技术，农业专家可以将农业管理、种植技术、病虫害防治等方面的专业知识和经验整合到知识库中，农民可以通过访问这些知识库获得来自专家的实时指导和农

业技术知识，增强绿色生产意识。③ 数字技术可以在农产品溯源中发挥重要作用。运用物联网、区块链等技术，可以记录和追踪农产品的种植、生产、运输等数据，确保产品质量和安全；消费者可以通过扫描产品上的追溯信息，了解产品的来源和生产过程，实现信息的共享和透明，提高消费者对绿色农产品的认可度。

（四）信息反馈效应

发挥数字技术在实时数据收集与监测、数据分析与处理、农业决策支持、智能化农业管理、效果评估与优化、创新推动等方面的作用，为农民和农业从业者提供更多有益的信息和工具，推动农业可持续发展和绿色化转型。① 利用传感器、监测设备等进行实时数据反馈，并通过数字平台帮助农民与专家在线沟通，使农民和农业从业者能够实时获得有关农业生产的重要信息与建议，为其作出更优决策，如灌溉、施肥、喷药的合适时机，种植计划优化，突发自然灾害应对等。② 数字技术可以通过控制系统对农业生产过程进行反馈控制，优化农业生产策略。利用传感器和自动化控制技术，实现自动控制灌溉、施肥等操作，对土壤水分、氮气含量等数据进行精准控制；利用大数据分析和机器学习技术，分析不同因素对农作物生长的影响以优化灌溉、施肥等策略，提高农业生产效率和产量。③ 利用数字信息平台及时、准确、连续地获取农产品价格和销售等市场信息，适应性地调整农业生产结构和农产品销售策略，实现农业生产、交易和服务环节的互通互融，减少农产品无效供给，确保农产品价值增值。

四、数字技术赋能农业绿色发展的主要实践

（一）数字技术优化农业生产要素配置，提升农业资源利用效率

农业生产要素的精准控制关系到农业产量稳定，关系到化肥、农药、农膜等化工合成品使用所产生的污染排放以及农业资源利用的可持续性。因此，精准调控化肥、农药等投入的农业数字技术成为实现农业绿色发展的重要手段，如水肥一体化数字技术。以数据为关键生产要素，将互联网、物联网、大数据等现代信息技术与农业生产中的土地、

劳动、机械等传统生产要素深度融合，精准鉴定农作物种子品质，精准感知农业灌溉用水供求，利用光触媒、传感技术等手段智能控制施肥施药，及时预防病害、虫害、草害，同时联动农机控制设备、卫星遥感、远距离可视化实时监控等，形成优种、精播、精施、精控等高效化策略，实现对农业生产各环节的精准把控，优化生产要素配置，降低生产要素投入成本，减少环境污染，保障粮食增产增效。

德国拜耳公司重视将数字化技术应用于农业种植以提升核心竞争力。该公司以FieldView数字化农业平台为依托，积极推进农业生产方式绿色转型和农业高质量发展。FieldView平台是一个集数据集成、分析、决策支持、全球覆盖和碳价值项目为一体的多功能数字化农业平台。FieldView平台在推动数字技术优化农业生产要素配置，提升农业资源利用效率方面具有以下优势。①可以提供安全的数据存储和管理功能，确保农民所需的种植数据得以保护和备份。平台会记录和跟踪种子性能、作物性状、作物产量与质量等数据，为要素配置提供数据支持，用户可以随时随进行访问和查看。②内置高级数据分析工具和智能种植决策系统。用户可以根据历史数据、土壤分析和天气预测等内容，通过地图和可视化图表直观收集、分析和实时监测土壤环境、育苗、秧苗、移栽、播种、施肥等种植全过程的关键信息，为其提供智能种植决策支持，优化农业生产要素配置，降低资源浪费，提高农业资源生产利用率。③支持数据共享和合作。平台应用已扩展到23个国家，覆盖了广泛的农场和种植者。用户可以与农场顾问、合作伙伴和其他农业专业人员共享数据，以缓解信息不对称问题，减少企业和用户的搜寻成本，提升农业生产资源有效配置效率。④推出碳价值项目，生产低碳饲料、燃料和纤维产品，帮助农业产业链下游降低碳排放，促进种植业可持续发展。

（二）数字技术构建农业生态产业链，改善农业生态系统

长期以来，农业产业链存在系统设计不足、产业链短、资源利用效率低、中小型生产经营主体融入难度大等问题，再加上许多农业经营主体的经营能力有限、产业链上下游信息不对称等，致使农业

产业链的“信息孤岛”现象依然严峻^[24]。为解决这一难题，可以利用数字技术将农业产业链上的各经营主体构建成一个完整的农业信息生态系统。农业信息生态系统拥有各生产主体的生产、交易和物流数据，利用大数据技术的统计功能，可以很容易地获取各经营主体的经营状况和信用状况，进而识别出产业链上的短板与弱项，帮助农业经营主体解决实际经营问题；还可以促进农业产业链上下游企业之间的合作和价值交换，通过跨区域协同作业，进一步提升农产品的流动效率，最终实现合作共赢^[25]。

北京农信互联科技集团有限公司（农信互联）将人工智能、物联网、大数据等信息技术与传统养猪业深度融合，创建了生猪产业链大数据智能服务平台——“猪联网”^[26]。该平台以生猪交易为入口，构建了以猪为核心的农信生态链，包括猪企网、猪小智、猪交易、猪金融和猪服务五大核心体系。①猪企网可以对猪生产的全生命周期进行监管，如猪放养过程的投苗计划管理、养护放养结算管理、猪育种性能测定、遗传进展分析、育种数据管理等，从而提高了猪场绩效和生产成绩。②猪小智通过互联网、云计算和大数据技术，对猪场生猪健康、母猪繁殖、设备维护、经营预警监测等进行全方面的统一决策管理，推动企业养殖数智化升级。③猪交易通过国家生猪市场、农信商城和农信直选，实现了猪饲料、生猪、屠宰食品企业以及消费者的直接交易、集中采购和买猪可追溯，实现了生产有记录、质量可追溯、责任可追究，解决了购买信息不对称问题。④猪金融依托于农信网、农富宝和农信贷等平台，为农民提供农业种养殖技术和农产品供需等信息，同时也提供理财产品以解决农民闲置资金的增值问题，以及为农民提供小额信贷服务以解决资金不足问题。⑤猪服务依托猪病通、行情宝和智农大讲堂等构建了农信数据中心，通过在线远程服务进行病猪诊断，解决了基层技术不足和检测设施薄弱等问题；提供最新的生猪价格及预测等信息；提供优质的猪课程，实现用大数据技术服务于养猪。农信互联上游通过“饲联网”连接饲料企业，中游用“猪联网”服务多家猪场，下游依托“食联网”打通屠宰食品企业，最后通过“企店”等数字营销系统到达终端消费的“最后一千米”，运用数字与实体融合和产业协同创新，打造数字化生态产业链，实现合作共赢。

（三）数字技术助力绿色生产，提升农产品质量

数字技术作为一种全新的投入要素，可以全面赋能传统农业各环节，促使农产品生产的精细化、标准化和科学化，提高农产品质量和标准化水平。数字技术通过监测土壤情况，配置最适宜的生产条件，筛选出饱满优质的种子，针对养分类型和施肥时间精准最佳施肥量，借助计算机图形识别技术去除病害农作物，实时监测土壤水分并精准供水，有效控制因外部环境因素变化带来的农作物生产不确定性，提升农产品质量和绿色化水平。通过数字技术搭建农产品“三品一标”认证平台，规范认证机构资质，并及时向消费者传递农产品质量信息，为消费者提供安全保障。

北京北菜园农业科技发展有限公司的有机蔬菜品牌“北菜园”，已获得50多种蔬菜的有机认证。通过数字化技术构建了一套较为完整的有机蔬菜种植、加工、销售的系统解决方案，规范了蔬菜的种植管理标准。在有机蔬菜生产过程中，“北菜园”严格实施源头有机、有机种植、病虫害防治和品质保险系统，实现了从源头到餐桌的多重安全保障，确保蔬菜本真味道。①在源头有机上，精选优质非转基因蔬菜种子育苗，采用有机饲养的奶牛或蛋鸡的粪便与有机种植的作物秸秆发酵精制的有机肥，杜绝病虫害传染源和重金属污染；②在有机种植上，通过覆盖可降解膜以闷死杂草和人工除杂草，杜绝除草剂使用，并通过滴灌技术与地膜覆盖技术相结合以维持土壤结构，使土壤内部保持作物生长适宜状态并对害虫侵袭和微生物滋生起到良好的防护作用；③在病虫害防治上，采用土壤消毒、空间消毒和种子消毒三级环境消毒，清除影响蔬菜播种的有害物质和病菌；④在品质保鲜上，运用大数据和云存储技术，建立有机蔬菜的品质追溯系统，为每一颗蔬菜建立一个二维码，消费者可扫描二维码对农产品进行溯源。“北菜园”自2011年应用农业物联网体系以来，年销售额稳步增长，2018—2020年的营业额从2100万元上升至3400万元，增长了61.9%^[27,28]。

（四）数字技术实现智能化养殖，提升农业生产效率

依托数字技术手段，探寻农业生产管理的潜在需求规律，驱动农业资源要素的集约化、标准化、规范化、协作化和高效化，优化产业分工合作模

式，改进生产管理流程，优化组织形式，推动生产方式创新，为企业科学决策提供态势感知和智力支持，提升农业生产效率。

江苏天成科技集团有限公司（天成集团）是一家综合性企业，主要经营饲料生产、种禽繁育、商品蛋鸡规模化养殖、品牌蛋销售和蛋品深加工等业务。该公司秉承将数字化建设融入生产管理的理念，长期致力于蛋鸡养殖数字化工艺的研究应用；从饲养过程自动化、生产管理智能化到养殖全程数字化，逐步实现了蛋鸡全生命周期管理的数字化，提高了精准饲喂、精准环境控制、精准识别、精准管控等方面的数字化水平。在提高蛋鸡饲养效率方面，天成集团不断探索蛋鸡养殖数字化建设，经历了以下3个阶段：①数字化1.0阶段，即饲养过程自动化。通过引进具备数据采集、存储、反馈控制功能的中央控制自动化饲喂和环境控制设备，实现了自动喂料、喂水、集蛋、清粪和环境控制。②数字化2.0阶段，即生产管理智能化。通过引入企业资源计划系统、自动办公系统、金蝶财务管理软件等信息化管理系统，实现了数据数字化，为管理者提供了分析和决策报表，提高了管理效率。③数字化3.0阶段，即养殖全程数字化。在每栋鸡舍布置称重传感器、数字化水表、鸡蛋计数器、温湿度传感器等设备，自动采集和传输每栋鸡舍的每日喂料数量、饮水数量、产蛋数量、环境信息等并上传至大数据平台。运用巡舍机器人，精准收集鸡舍内不同区域的环境数据，及时发现死亡鸡只并清除；还能识别出低产鸡或绝产鸡，及时提醒养殖人员剔除。通过养殖全程数字化，公司实现了养殖场所有智能设备的互联互通，将实时数据收集到智慧农场管理系统平台上进行呈现、分析、预警和报警，显著提高了管理效率，降低了养殖风险。据公司介绍，1×10⁶只鸡规模的鸡场每日可节约饲料500 kg（成本约为1700元），年节约成本60万元以上。通过运用大数据平台，实现了设备互联、数据互通，综合效益显著^[29]。

五、数字技术赋能农业绿色发展的路径探讨

（一）数字技术赋能农业绿色发展的内在逻辑

农业绿色发展旨在实现资源高效、安全生产、环境友好等多目标的协同发展，涉及政府、企业、

农民、消费者等利益主体。本文基于制度经济学视角，从诱致性制度变迁和强制性制度变迁等主面分析农业绿色发展的驱动因素和制度逻辑，提出通过自下而上的需求拉动和自上而下的政府推动以促进农业绿色发展转型^[29]。从安全性成本与供给经济学视角分析^[30]，数字技术赋能农业绿色发展的内在逻辑主要有以下两方面。① 绿色农产品的供给是有成本的。一类成本是保障农产品正常生产、养殖过程产生的成本；另一类成本是生产养殖过程中出现的粮食作物干旱、涝灾等意外灾害以及畜禽剔除产生的成本，这类成本可以通过保险购买或财政补贴方式风险转移。② 绿色生产成本得到全部补偿可能会导致绿色农产品供给不足。市场价格的波动给农产品生产者和消费者双方传递信息，引导市场价格体系有效运作。然而，有时候市场价格并不能完全反映生产者和消费者的活动，即绿色农产品的成本不能在价格中全部得以体现，因而产生外部性。根据微观经济学理论，当绿色农产品的生产具有正的外部性时，绿色农产品往往表现为供给不足；在具有负的外部性时，则表现为供给过剩。

在市场机制的调节下，绿色农产品供不应求并非是人类生产、消费行为下制度环境和自然条件不同而进行的选择。这种自发形成的交易行为对人类长期发展并非有益，而解决办法就是寻求政府宏观调控下制度环境的转变。政府与市场合作是资源配置优化和产业结构升级的必然趋势。对此，数字技术赋能农业绿色发展需要处理好政府与市场的关系，遵循市场规律、善用市场机制、把握市场需求，同时利用政府的宏观调控机制，纠补市场失灵，发挥有为政府与有效市场的协同作用。

（二）数字技术赋能农业绿色发展的二元驱动

1. 市场调节：数字技术赋能农业绿色发展的驱动机制

顺应农产品需求和消费价值观念的转变，以数字技术为驱动，促进自下而上的市场需求从生产端和消费端更加智能、高效地朝环保、可持续的方向发展，驱动农业绿色发展模式的新探索，逐步实现农业生产高效化、生态持续化和生活智能化。

一是生产端主动减污降碳。为摆脱农业资源和生态环境的双重约束，农业经营主体应积极利用数字技术进行绿色化生产。① 实现绿色信息共享。农业

生产者通过数字技术平台积极学习绿色农业技术和管理经验，通过在线培训、绿色农业知识库等学习方式，提高自身的环保意识和绿色发展能力；② 加快绿色供应链建设。顺应数字中国建设需要，以全国数据要素大市场为依托，以平台龙头企业为引领，吸引农业产业链上下游融入生态，建立跨区域、跨产业、跨专业的互联网生态链，形成从源头生产到消费者之间的高效流通，实现产业数字化及绿色化资源实时监测、动态更新和跨域共享，促成“面”空间产业供需信息有效匹配对接，提升产业生态链的稳定性、韧性和连续性，加速产业数字化与绿色化协同转型进程。③ 实施绿色认证与溯源。建立数字化的绿色认证体系和农产品溯源系统，通过数字技术记录农产品生产的全过程，方便消费者查看农产品的绿色认证和溯源信息，有助于提高绿色产品的认可度和市场竞争力，从而鼓励农业生产者采取更环保的生产方式。

二是消费者对绿色农产品的需求不断攀升。随着居民生活水平的逐步提升，消费者更倾向于购买绿色农产品。对此，消费者对绿色农产品的高需求、高要求倒逼农产品供给者提高生产标准，推动农业绿色化生产方式转型升级。数字技术赋能农业绿色发展，通过要素配置、产业协同、信息共享和信息反馈效应，利用市场价格机制，有效激励农业生产者采取绿色化生产方式，保障优质农产品的绿色生产，从源头上促进农业生产方式向绿色、生态、可持续发展转变。

2. 政府宏观调控：数字技术赋能农业绿色发展的制度设计

在数字技术背景下，自上而下的政府宏观调控可以从整体视角对数字技术赋能农业绿色发展的多个方面、功能、要素进行科学布局 and 系统谋划。通过政策制定与经济激励、数据共享与金融支持、科技创新与网络宣传等措施，形成农业绿色发展格局，有效激励和引导农业朝着更环保、绿色的方向发展。

一是政策制定与经济激励。通过大数据分析和人工智能技术，政府能够对农业生产数据进行深入分析并了解农业发展的趋势和问题，制定更为精准、科学的政策和指导意见，构建农业绿色发展的数字化乡村共同体，实现政务部门、人民群众、社会力量的多元共治^[30,31]，实现农业绿色发展目标总体效能的“帕累托最优”。采用奖励补贴、项目扶

持、贷款贴息等方式，引导资金向农业数字基础设施建设倾斜，如土地整治、田间道路修建、种子鉴定、水肥管理、农产品仓储及冷链、信息传送、服务平台等，注重农村网络、千兆光网、遥感卫星等信息基础设施建设。

二是数据共享与金融支持。① 注重数据共享与监测，构建“农民友好化”的农业信息交流平台，实时监测、收集和整合农业生产、流通、销售全产业链的相关数据，为政府决策提供科学依据，为农业经营主体之间迅速、准确地获取农业信息并及时交流提供便利；健全产品标准与质量控制，利用数字技术建立绿色认证和信息公示平台，行业主管部门可以通过制定和发布绿色安全产品标准来规范农产品质量，也可以从农产品生产者在线提交的绿色生产证明材料中获取绿色认证标志的农产品信息公示，让消费者了解产品的绿色属性，促进绿色产品的需求拓展和市场发展。② 加大绿色金融支持力度。数字技术提供了便利的金融服务渠道，利用数字化金融手段为绿色农业发展提供更多贷款和投资支持，鼓励农业生产者进行绿色技术改造。

三是科技创新与网络宣传。① 加强数字技术创新和推广。行业主管部门积极引导数字技术在农业种业、耕地保护利用、农机装备、生物安全、绿色发展技术供给、乡村发展科技支撑等领域的科技创新，建立数字化科研平台和技术推广平台，推动农业科技创新和推广，加速农业绿色技术的研发和普及，提高农业生产的绿色水平。② 开展网络宣传与教育。利用数字技术开展农业绿色发展的网络宣传和教育活动，通过社交媒体、网络直播等渠道，向广大农民传播绿色农业的知识和理念，引导其更加积极地参与农业绿色发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: September 15, 2023; **Revised date:** October 17, 2023

Corresponding author: Wang huogen is a professor from the School of Economics and Management of Jiangxi Agricultural University. His major research fields include agricultural resources and environment. E-mail: 412163218@qq.com

Funding project: National Natural Science Foundation project (71963018)

参考文献

[1] 万宝瑞. 加快提高我国农业竞争力的思考[J]. 农业经济问题, 2016, 37(4): 4-8.

- Wan B R. Thoughts on speeding up the improvement of China's agricultural competitiveness [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2016, 37(4): 4-8.
- [2] 钟钰. 向高质量发展阶段迈进的农业发展导向[J]. 中州学刊, 2018 (5): 40-44.
- Zhong Y. Agricultural development orientation towards high quality stage [J]. *Academic Journal of Zhongzhou*, 2018 (5): 40-44.
- [3] 马文奇, 马林, 张建杰, 等. 农业绿色发展理论框架和实现路径的思考[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1103-1112.
- Ma W Q, Ma L, Zhang J J, et al. Theoretical framework and realization pathway of agricultural green development [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(8): 1103-1112.
- [4] 谢康, 吴瑶, 肖静华. 数据驱动的组织结构适应性创新——数字经济的创新逻辑(三)[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2020, 19(3): 6-17.
- Xie K, Wu Y, Xiao J H. Adaptive innovation of data-driven organizational structure: The innovation logic of digital economy (3) [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition)*, 2020, 19(3): 6-17.
- [5] 李文睿, 周书俊. 数字经济背景下我国农业生产方式变革: 机理、矛盾与纾解[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2023, 43(1): 65-73.
- Li W R, Zhou S J. Reform of agricultural production mode in China under the background of digital economy: Mechanism, contradiction and solution [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 2023, 43(1): 65-73.
- [6] 中华人民共和国自然资源部. 2022年中国自然资源统计公报[EB/OL]. (2023-04-12)[2023-12-04]. <https://www.mnr.gov.cn/sj/tjgb/>.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. The 2022 China natural resources statistics bulletin [EB/OL]. (2023-04-12)[2023-12-04]. <https://www.mnr.gov.cn/sj/tjgb/>.
- [7] 中华人民共和国农业农村部. 2019年全国耕地质量等级情况公报[EB/OL]. (2020-02-06)[2023-12-04]. <http://www.ntjss.moa.gov.cn/zcfb/202006/P020200622573390595236.pdf>.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. The 2019 national cultivated land quality grade communiqué [EB/OL]. (2020-02-06)[2023-12-04]. <http://www.ntjss.moa.gov.cn/zcfb/202006/P020200622573390595236.pdf>.
- [8] 中华人民共和国水利部. 2022年中国水资源公报[EB/OL]. (2023-06-30)[2023-12-04]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202306/t20230630_1672556.html.
- Ministry of Water Resource of the People's Republic of China. The 2022 China water resources bulletin [EB/OL]. (2023-06-30)[2023-12-04]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/202306/t20230630_1672556.html.
- [9] 国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴(2022)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- National Bureau of Statistics, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China environmental statistics yearbook 2022 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [10] 马晓河, 杨祥雪. 城乡二元结构转换过程中的农业劳动力转移——基于刘易斯第二转折点的验证[J]. 农业经济问题, 2023, 44(1): 4-17.

- Ma X H, Yang X X. Agricultural labor migration in the process of urban-rural dual structure transformation: A validation based on lewis' second turning point [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2023, 44(1): 4-17.
- [11] 夏金梅, 吴梦秋. 新发展格局下农业劳动力城乡流动的政治经济学阐释 [J]. *江汉论坛*, 2022 (5): 25-31.
- Xia J M, Wu M Q. Political economic explanation on the urban-rural mobility of agricultural labor under the pattern of new development [J]. *Jiangnan Tribune*, 2022 (5): 25-31.
- [12] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发改委印发《2022 年新型城镇化和城乡融合发展重点任务》[EB/OL]. (2022-03-22)[2023-12-04]. https://www.gov.cn/zhengce/202203/22/content_5680376.htm.
- The Central People's Government of the People's Republic of China. The National Development and Reform Commission issued the *key tasks for new urbanization and urban-rural integrated development in 2022* [EB/OL]. (2022-03-22)[2023-12-04]. https://www.gov.cn/zhengce/202203/22/content_5680376.htm.
- [13] 夏金梅, 孔祥利. “城归”现象: 价值定位、实践基础及引导趋向 [J]. *经济学家*, 2019 (12): 58-67.
- Xia J M, Kong X L. “City to rural” phenomenon: Value orientation, practical basis and guiding trend [J]. *Economist*, 2019 (12): 58-67.
- [14] 金书秦, 沈贵银. 中国农业面源污染的困境摆脱与绿色转型 [J]. *改革*, 2013 (5): 79-87.
- Jin S Q, Shen G Y. To get rid of the predicament and green transformation of agricultural nonpoint source (NPS) pollution [J]. *Reform*, 2013 (5): 79-87.
- [15] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴(2022) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- Rural Social and Economic Survey Department of the National Bureau of Statistics. *China rural statistics yearbook 2022* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [16] 中华人民共和国农业农村部. 《全国农作物秸秆综合利用情况报告》发布 [EB/OL]. (2022-10-10)[2023-12-04]. http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010_6412962.htm.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. The *national report on the comprehensive utilization of crop straw* was released [EB/OL]. (2022-10-10)[2023-12-04]. http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010_6412962.htm.
- [17] 中华人民共和国农业农村部. 对十三届全国人大五次会议第 0509 号建议的答复 [EB/OL]. (2022-08-25)[2023-12-04]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/xmsyj/202208/t20220825_6407761.htm.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Reply to recommendation No. 0509 of the Fifth Session of the Thirteenth National People's Congress [EB/OL]. (2022-08-25)[2023-12-04]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/xmsyj/202208/t20220825_6407761.htm.
- [18] 国家统计局. 中国统计年鉴(2023) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- National Bureau of Statistics. *China statistics yearbook 2023* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [19] 中国绿色食品发展中心. 2022 年绿色食品统计年报 [EB/OL]. (2023-06-20)[2023-12-04]. <http://www.greenfood.agri.cn/ztzl/tjnb/lvsptjnb/>.
- China Green Food Development Center. The 2022 annual report on green food statistics [EB/OL]. (2023-06-20)[2023-12-04]. <http://www.greenfood.agri.cn/ztzl/tjnb/lvsptjnb/>.
- [20] 刘学侠, 陈传龙. 数字技术推动农业产业结构转型升级路径研究 [J]. *行政管理改革*, 2022 (12): 57-65.
- Liu X X, Chen C L. The path of digital technology promoting the transformation and upgrading of agricultural industrial structure [J]. *Administration Reform*, 2022 (12): 57-65.
- [21] 李海艳. 数字农业创新生态系统的形成机理与实施路径 [J]. *农业经济问题*, 2022, 43(5): 49-59.
- Li H Y. The formation mechanism and implementation path of digital agriculture innovation ecosystem [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022, 43(5): 49-59.
- [22] 钟真, 刘育权. 数据生产要素何以赋能农业现代化 [J]. *教学与研究*, 2021 (12): 53-67.
- Zhong Z, Liu Y Q. How can data as a production factor empower agricultural modernization? [J]. *Teaching and Research*, 2021 (12): 53-67.
- [23] 高星, 李麦收. 数字经济赋能经济绿色发展: 作用机制、现实制约与路径选择 [J]. *西南金融*, 2023 (2): 31-43.
- Gao X, Li M S. Digital economy enables green economic development: Action mechanism, reality constraint and path selection [J]. *Southwest Finance*, 2023 (2): 31-43.
- [24] 朱齐超, 李亚娟, 申建波, 等. 我国农业全产业链绿色发展路径与对策研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(1): 73-82.
- Zhu Q C, Li Y J, Shen J B, et al. Green development of agricultural whole industry chain: Pathway and countermeasures [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(1): 73-82.
- [25] 许玉韞, 张龙耀. 农业供应链金融的数字化转型: 理论与中国案例 [J]. *农业经济问题*, 2020, 41(4): 72-81.
- Xu Y Y, Zhang L Y. Digital transformation of agricultural supply chain finance: Theory and case study [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2020, 41(4): 72-81.
- [26] 梁琳. 数字经济促进农业现代化发展路径研究 [J]. *经济纵横*, 2022 (9): 113-120.
- Liang L. Research on the development path of digital economy to promote agricultural modernization [J]. *Economic Review Journal*, 2022 (9): 113-120.
- [27] 刘刚. 农业绿色发展的制度逻辑与实践路径 [J]. *当代经济管理*, 2020, 42(5): 35-40.
- Liu G. The institutional logic and practice path for green development of agriculture [J]. *Contemporary Economic Management*, 2020, 42(5): 35-40.
- [28] 北京北菜园农业科技发展有限公司 [EB/OL]. (2021-12-19)[2023-12-04]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/xxhsfjd/sfjdfc/scx/202112/t20211229_6385929.htm.
- Beijing Beicaiyuan Agricultural Technology Development Co., Ltd. [EB/OL]. (2021-12-19)[2023-12-04]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/xxhsfjd/sfjdfc/scx/202112/t20211229_6385929.htm.
- [29] 江苏省农业农村厅. 【智慧畜牧】蛋鸡养殖全程数字化实践 [EB/OL]. (2022-12-13)[2023-12-04]. http://nynct.jiangsu.gov.cn/art/2022/12/13/art_12086_10705459.html.
- Jiangsu Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs.

Smart animal husbandry: Digital practice of the whole process of egg chicken breeding [EB/OL]. (2022-12-13)[2023-12-04]. http://nynct.jiangsu.gov.cn/art/2022/12/13/art_12086_10705459.html.

- [30] 刘东英. 生鲜食品市场上安全性需求与供给的经济学分析 [J]. 财贸经济, 2005 (2): 85-87.
- Liu D Y. Economic analysis of safety demand and supply in fresh food market [J]. Finance & Trade Economics, 2005 (2): 85-87.

- [31] 翟云, 程主, 何哲, 等. 统筹推进数字中国建设 全面引领数智新时代——《数字中国建设整体布局规划》笔谈 [J]. 电子政务, 2023 (6): 2-22.

Zhai Y, Cheng Z, He Z, et al. Promoting the construction of digital China as a whole and leading the new era of digital intelligence in an all-round way—*On the overall layout planning of digital China construction* [J]. E-Government, 2023 (6): 2-22.