

气候变化驱动的农业土地利用系统管理研究进展与展望

邓祥征^{1,2,3,*}, 李志慧^{2,3}, 韩 赧^{2,3}, 高云霄^{2,3}, 余珮珩^{2,3}

1. 北京工商大学, 北京 100048;
2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 101408



摘 要 : 农业土地利用系统是一个以土地利用为中心的复杂且相互关联的系统, 包括所有人类活动及其在利用农业土地上的结果。随着气候变化和食品安全等问题的出现, 人-地耦合系统受到了学者们的广泛关注。因此, 建立一个支撑可持续利用资源、固碳减排、稳步提高粮食产量的农业土地利用系统管理机制至关重要。本研究阐明了农业土地利用系统管理的理论框架和方法论的进展, 包括气候变化背景下农业土地利用碳排放与管理的研究、农业土地利用系统保障粮食安全的资源环境承载力评估以及优化农业土地布局以提升土地利用能力的相关研究。在应对气候变化、确保营养和粮食安全、提供生态系统服务以及推动环境可持续发展等方面, 有效的农业土地利用系统发挥着至关重要的作用。在我国土地科学的众多领域中, 农业土地利用的理论研究和实证研究起步较晚。当前, 我国正处于加快推进乡村振兴和全面建设社会主义现代化国家的关键时期, 迫切需要构建更加完善的农业土地利用管理体系, 助力促进中国农业土地的可持续利用, 加快转型步伐, 支持国家的高质量发展和生态文明建设。

关 键 词 : 土地利用优化; 农业资源配置; 农业碳排放与管理; 土地资源承载力; 农业综合生产能力

中图分类号 : X24; P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-4981(2025)01-0135-14
DOI: 10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2024-0025

Research Progress and Perspectives of Agricultural Land-Use System Management Driven by Climate Change

DENG Xiangzheng^{1,2,3,*}, LI Zhihui^{2,3}, HAN Ze^{2,3},
GAO Yunxiao^{2,3}, YU Peiheng^{2,3}

1. Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

Abstract : The agricultural land-use system (ALUS) is a complex and coupled system centered on land use, which includes all human activities and their outcomes in utilizing agricultural land. With the emergence of issues such as climate change and food security, the land-human coupling system has received widespread attention from scholars. Therefore, it is crucial to establish an ALUS management mechanism that sustainably utilizes resources, sequesters carbon, and reduces emissions while steadily improving food production. In this study, progress is clarified in the theoretical framework and methods of ALUS management, including relevant research about agricultural land-use carbon emissions and management in the context of climate change, evaluation of the resource-carrying capacity of an ALUS for food security, and layout optimization of agricultural land to improve land use capacity. Effective agricultural land use systems play a vital role in addressing climate change, ensuring nutrition and food security, providing ecosystem services, and promoting environmental sustainability. In many fields of land science in China, the theoretical and empirical research on agricultural land use started late. At present, China is in a critical period of accelerating rural revitalization and comprehensively building a modern socialist country, and it is urgent to build a perfect agricultural land use management system

收稿日期: 2024-11-08; 接受日期: 2024-11-18

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目 (72221002)

通讯作者: 邓祥征 (1971—), 男, 研究员, 主要研究方向为资源安全与食品经济、全球变化与区域发展、大数据分析 with 智能决策等。

E-mail: dengxz@igsnrr.ac.cn

to help promote the sustainable use of agricultural land in China, accelerate the pace of transformation, and support the high-quality development of the country and the construction of ecological civilization.

Key Words:

land use optimization; agricultural resource allocation; agricultural carbon emissions and management; land resource carrying capacity; agricultural comprehensive production capacity

0 引言

近几十年来,快速的人类活动引发了严重的环境问题,全球环境变化对社会经济的可持续发展构成了严重威胁^[1]。该背景下,人类活动与全球变暖之间的关系引起了广泛关注。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的报告指出,人类使用化石燃料和改变土地利用方式所排放的温室气体是导致全球变暖的主要原因,其中粮食系统排放的温室气体总量约占全球人为温室气体排放总量的三分之一^[2]。在这种情况下,世界主要发达国家已逐渐意识到农业部门的温室气体排放,特别是非二氧化碳的温室气体排放带给实现全球温度控制目标的压力和挑战,并开始制定多尺度的综合管理和减排方案。对于我国而言,农业土地利用是温室气体的重要来源之一,1980—2020年我国农业系统温室气体排放量呈波动增长趋势,增长了近46%。甲烷(CH₄)是农业系统排放贡献最大的温室气体,占总排放量的47.33%^[3]。同时,农业土地还承担着保障粮食供给的重要角色,2022年,我国粮食产量连续八年超6.5亿吨,粮食总产量为6.87亿吨,达到截至2022年的历史最高点。大米、小麦、玉米三大主粮的国内自给率长期维持在95%左右,肉蛋奶等重要农产品总量一直呈增长之势,为解决中国人的吃好问题提供了重要支撑^[4]。因此,我国农业土地利用系统面临节能减排及高质量发展的双重挑战,亟需建立起具有中国特色的碳减排与粮食安全导向下农业土地利用系统优化管理体系与创新理论方法。

农业土地利用系统是一个以土地利用为核心的系统性、复杂性和耦合性系统,农业土地利用系统不仅包括土地利用本身,还涉及人类利用农业土地从事的所有活动及其结果。农业土地利用系统的复杂性、资源有限性、政策与实践的脱节以及地区差异与耦合性等因素共同构成了对农用地利用系统进行有效管理的巨大挑战。近年来,中国的农业土地利用系统发生了深刻变化。首先,国际经济形势不容乐观,农产品供需矛盾日益突出,加剧了实现农业均衡增产的压力。其次,为适应和减缓持续的气候变化,迫切要求农业土地利用系统优化管理体系的落地和实施。同时,受资源和环境的制约,农业生产面对诸多挑战,如耕地质量下降、污染日益加剧等。最后,随着科学技术的不断发展,农业科技创新为推动农业产业持续高质量发展、突破环境约束、实现农业可持

续利用指明了新的方向,创造了新的机遇与挑战。新形势下,建立一个能够适应气候变化,稳步提高粮食产量,实现资源可持续利用与固碳减排相结合的农业土地利用系统已成为一种必然选择。农业土地利用系统与诸多行业和要素密切相关,包含林业、农业、粮食生产等行业,以及水资源、土地资源和气候变化等要素,同时需要城市和农村地区之间的相互协调。

在全球土地计划与土地系统科学的指导下,农业土地系统研究成为了土地系统科学的一个重要方向。这一研究旨在明确农业土地系统的概念,梳理其研究的技术方法、内容对象以及关键科学问题,以促进全球气候变化、粮食安全及农业可持续发展方向的研究^[5]。来自世界各地的案例研究强调了农业土地利用系统管理的多样化方法。例如,在巴西实施集成的作物-畜牧-林业系统,显著改善了土壤健康,提高了生产力和碳固存^[6]。在肯尼亚,农民采用气候智能型农业技术,在提高产量的同时,提升了资源利用效率并减少了对环境的影响^[7]。在荷兰,居民通过自我组织以及将51%的土地面积分配给农业,为城市区域的可持续粮食供应做出了贡献^[8]。聚焦气候变化对农业土地利用系统影响的实证分析阐明了一些关键发现。有强烈证据表明,气温上升、降水模式改变和极端天气事件频率增加正在全球范围内对作物产量和粮食安全产生不利影响^[9]。与此同时,实施气候智能型农业实践已被证明可以缓解其中部分影响,为增强农业土地利用系统的韧性和可持续性提供了途径。中国已进入加快乡村振兴、全面建设社会主义现代化国家的关键时期。充分发挥农业土地利用系统在应对气候变化、保障营养与食品安全、提供生态系统服务、促进环境可持续发展等方面具有重要意义。然而,中国对农业土地利用系统的理论和实证研究起步较晚,且我国农业土地利用系统具备时空异质性、尺度敏感性、自然与社会综合性以及系统反馈效应等特征,因此而导致的复杂性问题是我国农业土地利用系统管理研究的难点,因此我国亟需建立更完善的管理体系,以加快农用地可持续利用转型,从而支撑高质量发展和生态文明建设。

基于此,本研究旨在深入总结和归纳国内外在农业土地利用系统管理领域的研究进展(图1),为科学合理地利用农田资源、实现农业可持续发展提供理论支持。研究内容包括:探讨农业土地利用系统管理的建模方法和机理分析;在气候变化的大背景下,研究农田利用的碳排放问题及管理策

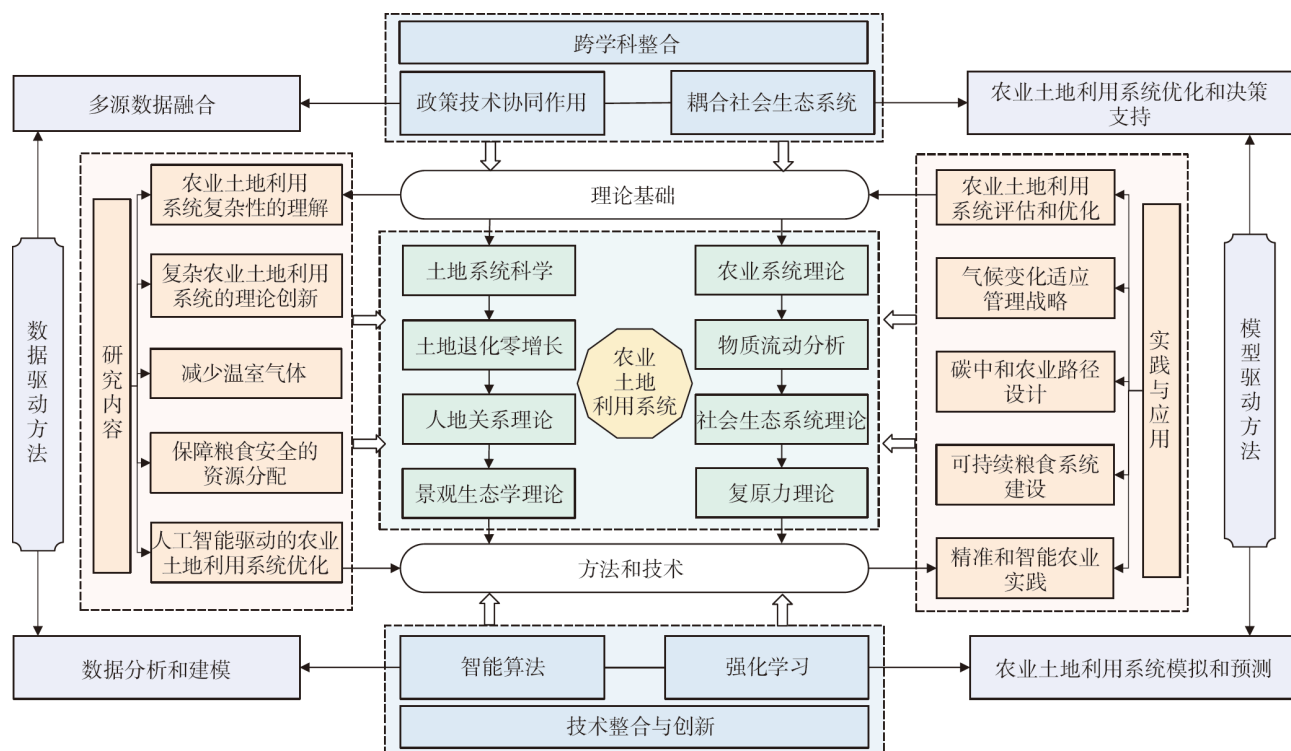


图1 农业土地利用系统研究框架与优化方法

Fig.1 Research framework and optimization method for agricultural land-use system

略；总结粮食安全与农用地资源承载能力的相关研究；并探讨能够提升农用地利用能力的农业生产布局及其优化现状。本研究旨在通过对以上问题的深入讨论，使公众对农业土地利用系统管理的现状和热点问题有一个较为清晰的认识，以此为农业用地的可持续发展提供有益参考。

1 农业土地利用系统管理模型方法和机制分析

土地变化给社会和环境带来了深远且不可逆的影响，这些影响的持续时间跨度从数十年到数百年不等^[10-11]。基于土地覆盖和土地利用，研究学者提出了土地利用系统的概念，指在一定区域内，由人类活动连接的土地生态系统和土地经济系统的集合。具体来说，该系统涵盖了人口、土地资源、土地环境、经济、社会技术、法律法规和管理制度等子系统在区域内的相互作用与影响，构成了一个具有特定功能的有机整体^[12]。从宏观角度来看，农业土地利用系统是土地与农业系统的结合体，是人类对耕地进行利用活动的结果。农业土地为人类活动提供了场所和资源，因此，科学运用土地利用系统理论和方法指导农业土地利用系统的管理实践，以及通过可持续的耕地使用和农业技术创新提升农田生产力显得尤为重要。对农业土地利用系统管理的建模方法和机制分析的

研究主要包括制度理论的创新、方法体系的建设以及机制的分析。这些研究成果能够为决策者提供指导，进一步推动有效的土地利用管理和可持续的农业实践，同时促进在考虑生产力、环境保护以及社会经济发展的基础上制定全面的发展方案。

1.1 农田利用系统管理的理论创新

近年来，政治生态学理论、生态足迹理论、恢复力理论和人地关系理论等理论已被广泛应用于农业土地利用系统，并深刻影响了其管理体系。例如，为管理复杂的农业社会生态需求，Flachs和Richards^[13]应用政治生态学理论探讨了环境问题与政治、经济和社会因素之间的关系，并主张辩证地看待农业土地利用系统中政治生态与经济之间的关系，为制定和实施土地利用政策提供了思路。生态足迹理论通过关注足迹指标简化复杂的生态过程和相互作用。Zuazo等^[14]强调可持续的农业土地利用系统需要关注经济活动的空间布局选择，验证了生态足迹方法在公共政策中的有效性。恢复力理论能够应对社会生态系统的复杂性和相互关联性，是农业土地利用系统建设领域的常用方法，有助于通过增强系统的抗干扰能力提高长期可持续性。人地关系理论侧重于人类社会与自然环境之间的相互作用，提供了一种关于土地利用影响的平衡观点，并强调农业土地利用系统管理的长期后果。VanWey

等^[15]比较分析了与土地利用变化相关的理论,认为人地协调发展是农业土地利用系统管理中必须考虑的一个重要方面。现有理论主要以可持续发展为目标,考虑了农业土地利用系统的多个维度,包括社会、经济、政治和环境等方面,有助于全面理解和解决农业土地利用系统问题。但这些理论仍存在以下不足:复杂度高且跨学科合作、数据分析难度大;资源有限地区难以获取高质量数据、资源及昂贵的检测分析工具,导致实施成本高;且易忽视地方文化差异,使理论与实践脱节;加之地区差异,即便有丰富理论分析工具和策略,若不考虑实际政策环境,也会限制其在中国应用推广。同时,面对气候变暖、粮食供需平衡、农业减碳等全球性重大问题,仍需要更加系统、全面和具体的农业土地利用系统理论指导实践。

1.2 农田利用系统管理研究模型方法

中国的农业土地利用系统管理虽然在某些方面行之有效,但在整合现代理论框架和先进技术系统以满足不断发展的可持续农业需求方面仍面临挑战。针对这一问题,近年来研究人员在区域农业土地利用系统模拟与优化管理分析技术体系方面取得了显著进展,研究重点在于捕捉多个变量之间的复杂关系,揭示驱动土地利用决策的基本机制,进而模拟和预测农业土地利用系统的发展^[16-19]。如有学者通过基于统计的数值分析、时空关系探测等方法,构建了基于空间模型的土地系统响应模拟模型,揭示了土地利用变化的机理^[20-21]。多时相、多传感器和多分辨率遥感数据与地理信息技术的结合可以提升数据收集、建模和决策支持的能力,也被用于评估大规模农业用地和作物扩张模式^[22-23]。水土资源耦合模型通过社会经济耦合分析和政策影响评估,定量评价区域政策变化对水土资源利用效率的影响,为水土资源高效管理提供科学依据^[24]。气候变化-作物气候-资源利用反馈分析模型为大规模作物模型的生物物理和人为管理措施提供空间参数化方案,为区域农业生产适应气候变化提供决策工具^[25]。根据不同影响因素,模型通常分为地理模型和经济模型。目前,以传统经济模型为代表的土地利用效率和效益评估难以有效反映复杂的宏观自然和资源环境过程^[26]。以空间地理信息技术为主导的评价模型难以揭示社会经济和人文因素之间的逻辑关系^[27]。如何发挥土地利用过程中多模型耦合的优势,建立具有实用性的技术方法,加强土地经济、技术和生态效益评估,一直是国内外同行关注的科学问题。上述模型系统的综合应用,将空间地理模型与传统经济学模型相结合,改进了土地空间格局模拟和土地利用效率评估研究,提高了土地经济、技术和生态效益评估能力,使农业土地利用系统能够更科学、更高效地实现资源的可持续利用和优化配置^[28-29]。

1.3 农业土地利用系统管理的机制分析

区域农业土地利用系统的管理不仅需要应对与城市系统等外部系统的协同与竞争,还要处理内部的气候系统、资源利用系统、农业生产系统等之间的相互影响。深入分析农业系统内外多因素、多系统间的相互作用机制,是实现区域农用地利用系统优化管理的关键基础^[30]。土地资源的有限性、土地利用的复杂性、土地权益的争夺性等因素,导致了城乡发展不均衡、生态环境恶化、土地利用效率低下等一系列土地空间问题。特别是农业、城镇、生态空间之间的竞争与协调问题,成为社会关注的焦点^[31-32]。在外部影响研究领域,Fazal^[33]研究了萨哈兰普尔市城市发展对农业用地的影响,发现非建设性开发对农业用地的破坏最为严重。Jiang等^[34]通过实证研究首次揭示了城镇化占用耕地的边缘化特征和区域差异规律,并采用多层次计量经济模型分析了城镇扩张对耕地的影响因素和机制。Yu等^[35]则考虑了高铁网络扩张对耕地征用的间接影响及其对农地产业的直接影响。在内部影响研究方面,Jin等^[36]构建了一个基于资本投入产出、土地利用、农业生产、社会影响等子系统的系统动力学模型。方莹等^[37]定量评估了耕地利用的生产功能、生态功能和社会保障功能,并探讨了耕地利用多功能平衡关系的空间差异与区域协调问题。Li等^[38]分析了农用地集约化的自然、社会和经济子系统之间的互动机制。对外部和内部系统多因素复杂影响机制的深入探索,促进了土地利用平衡与优化分析理论与方法的创新发展,为国家空间规划体系下土地利用矛盾的协调与平衡提供了重要的决策参考。在区域农业系统中,气候变化、作物生长周期、水土资源利用与农业生产之间的相互作用也是构建模型系统的重要基础。农业系统的复杂性意味着水、土地、气候等因素之间存在着错综复杂的相互影响。对多因素、多过程之间的联系进行定量分析,对于优化区域农业生产和保障粮食安全具有重要意义。学者们已经对区域农业系统中气候变化、土地利用和农业生产等子系统的相互作用进行了大量机理分析和模拟研究^[39-41],为政策制定者、实践者和利益相关方提供了指导,以实现农业土地的可持续利用。

2 适应气候变化背景下的农业土地利用碳排放与管理

碳达峰碳中和(“双碳”)目标体现了我国与国际社会共同应对气候变化的坚定决心。实现“双碳”目标需要对现行社会经济体系进行广泛而深刻的系统性变革。农业土地利用是影响区域碳排放的关键因素,而与之直接相关的种植业和

畜牧业则是农业土地利用碳排放的重要来源。当前,针对气候变化的政策和研究普遍缺乏对CO₂和非碳温室气体排放的量化指标^[42],对于CO₂未来减排潜力的不确定性也存在争议^[43]。尽管部分研究强调了工业部门在碳减排中的核心作用,但在排放效率、减排措施、排放控制成本以及主要农业用地的潜在影响方面,仍缺乏全面系统的研究。从农业土地利用视角开展碳排放与管理研究,能够深入探究区域碳循环的影响机理,在土地制度设计、产业结构调控、土地开发整治、城乡建设等领域为经济社会的低碳发展提供全面指导(图2)。

2.1 农业土地利用碳减排指标体系构建与模型耦合

耦合多模型的过程与机理分析是农业土地利用系统研究的核心议题。在农业土地利用碳排放领域,关键步骤包括多尺度数据采集、参数化编制、指标体系构建以及多模型耦合分析。这些步骤旨在提升农业土地利用碳排放系统的效率,并促进农业生态文明的转型。为深入理解这些步骤,研究者们从多个角度进行了广泛的数据收集和分析,包括但不限于气候数据、土地利用变化及碳排放量。Bai等^[44]和Wang等^[45]深入研究了农业土地碳排放发展与管理的精准评估所面临的技术难题,并在碳排放效率与减排潜力的空间显式评估方面实现了技术性突破。这些技术进步与乡村振兴战略下区域农业土地利用的优化紧密相关,涉及效率评价指标体系的更新,从传统的质量保障和效率为核心的指标,转变为更加灵活的、以经济效益为导向、生态效益为主导的效率平衡指标。这些技术进步进一步完善了碳减排的指标体系,为实现“双碳”

目标和生态文明建设提供了有力支撑。然而,准确评估农业土地利用碳排放效率依然面临巨大挑战,阻碍着农业碳排放发展在评估和管理方面的进展,亟需在空间领域碳排放效率与减排潜力的显式评价技术方面取得突破。

为构建一个全面的碳减排指标体系,研究者们从多个维度进行了数据的整理与分析。包括碳卫星数据、地面观测数据集、第六次耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)模式的CO₂驱动场以及人为碳排放数据集^[46-48]。通过这些数据分析大气CO₂浓度动态分布的气候效应和响应机制,生成敏感性曲线描述大气CO₂浓度与地表温度之间的关系,从而定量探索CO₂浓度对典型行业(尤其是农业)的影响机制^[49]。此外,学者们利用遥感和云计算对农业土地利用变化进行了详细描述,并获得了精细的农业土地利用数据,这些数据可用于优化地表过程模型的作物参数化方案^[50]。通过将改进的“动态生态系统中的碳和水文组织”(Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems, ORCHIDEE)或“通用陆面模型”(Community Land Model, CLM)等地表过程模型与“天气研究和预报模型”(Weather Research and Forecasting model, WRF)的大气模型进行耦合,研究者们建立了不同情景方案,以考虑作物结构和成熟度的变化。在生物地球物理机制方面,分析了农业用地变化对地表辐射/能量平衡的影响,确定并评估了这些变化通过改变辐射/能量成分对区域气候的影响程度^[51-54]。在生物地球化学机制方面,重点研究农业土地利用变化如何通过改变CO₂和CH₄排放,进而影响区域气候^[55-58]。

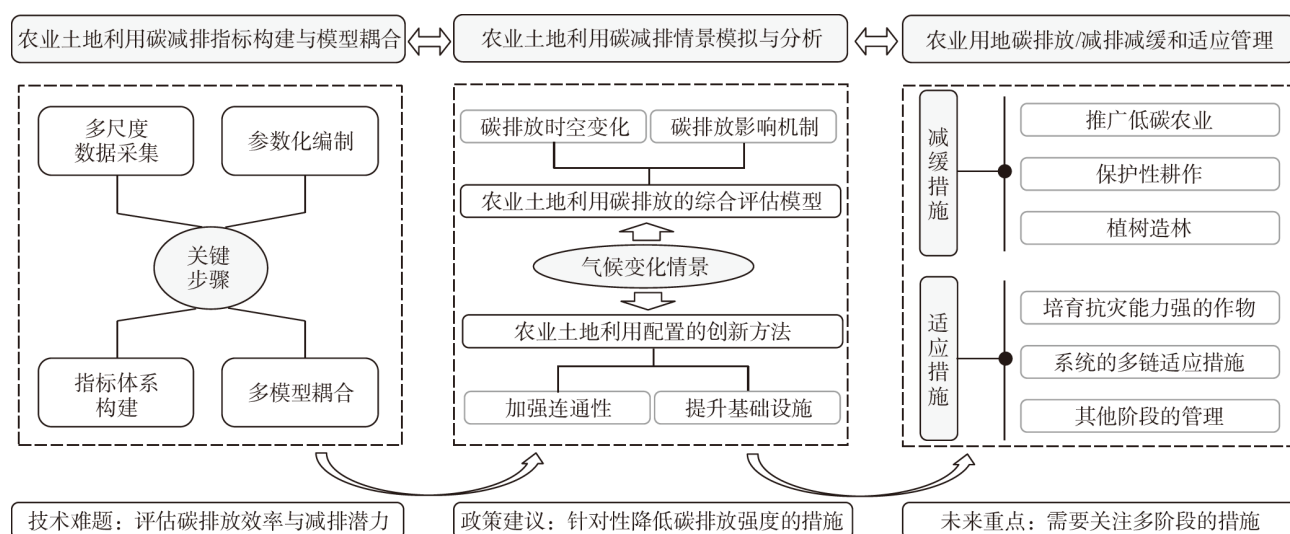


图2 适应气候变化背景下的农业土地利用碳排放与管理研究内容框架

Fig.2 Research content framework for agricultural land-use carbon emissions and management in the context of climate change adaptation

在快速城市化的背景下,土地利用转型对碳排放的影响受到广泛关注。Shi等^[59]建立了包含气候变化、土地利用变化和农业生态系统之间相互作用的理论框架,揭示了气候变化与土地利用变化之间的相互作用,阐明了它们对农业生态系统的定量影响。Roy等^[60]全面概述了城市化与全球环境变化之间的相互作用和反馈机制,以及土地系统内外对全球环境变化的互动决策过程和响应。邓祥征等^[61]耦合高斯方程与拉姆齐模型,识别了土地利用影响地表CO₂浓度异质性的动力学机制,为中国实现“双碳”目标提供决策参考信息。张玥等^[62]对我国省域尺度开展了土地利用隐性形态综合评价与土地利用碳排放科学测算,并刻画了其时空演变特征,揭示出土地利用碳排放对土地利用隐性转型的空间响应规律。

2.2 农业土地利用碳减排情景模拟与分析

为实现“双碳”目标,研究者们开发了模拟和分析农业土地利用碳排放的综合评估模型,以及优化农业土地利用配置的创新方法。这些模型和方法对于理解和管理农业土地利用对碳排放的影响至关重要。在全球层面,Ying等^[63]在全球地表温度网络和CO₂网络之间建立了一个影响参数数据库,并基于碳排放气候监测数据集、全球历史气候网络月度数据集(Global Historical Climate Network monthly dataset, GHCN-V4)和全球气候灾害与风险损失数据库,建立了碳排放数据库,能够计算主要国家、经济体或集团的碳排放及其贡献^[63-64]。也有研究专注于分析高排放国家的碳排放时空变化及其主要驱动因素,并估算了不同温度控制情景下的碳排放空间阈值^[65]。此外,全球研究比较了历史上人均累积平均碳排放量、升温率和灾害损失率的空间分布模式,生成了大气CO₂排放-风险关系图,并提出了“减排空间阈值调整参数”的概念^[66]。学者们还研究了系统动力学模型中碳排放的影响机制,评估了CO₂排放对全球气温上升的经济影响,并开发了用于测量碳排放空间阈值的系统动力学模型,包括CO₂排放影响、CO₂浓度对气温的影响及区域对气温的响应等模块。研究还探讨了碳减排的成本效益,比较了碳减排成本和收入,构建了碳减排效率指标,并考察了全球变暖对劳动力损失的影响^[59,67-69]。

在实证研究方面,Shi等^[59]利用20世纪70年代至21世纪初的耕地变化数据集,研究了中国北方气候变化引起的耕地时空变化,揭示了气候变化、耕地质量与碳排放之间的定量关系。Zhang等^[70]研究了气候变化对作物种植强度的影响机制,发现气候变暖导致耕地面积和种植强度增加,一定程度上提高了粮食产量和碳排放量。土地系统的地区和功能差异对单位GDP的碳排放量产生影响,且这些差异通过资源循环进一

步加剧了碳排放的地区差异。一些关于土地利用系统减排效果的研究发现,通过提升现有基础设施和加强土地系统的连通系数,可以有效实现减排目标^[71-72]。此外,一项来自于湖北省的研究扩展了线性支出系统模型和CO₂排放核算方法,将其应用于扶贫和CO₂减排^[73]。此外,也有研究指出,碳排放的空间异质性影响着区域经济乃至全球经济。由于CO₂排放的不均衡性,全球气温将持续上升,农业、采矿业、建筑业等对温度敏感的经济部门将受到显著影响。尤其是东南亚、非洲中北部和南美洲北部地区,将面临最为严峻的影响^[74]。

2.3 农业用地碳排放/减排减缓和适应管理

中国农业应对气候变化的减缓和适应策略结合了技术、政策及实际措施,以减少排放并提高生产力。关键缓解措施包括推广低碳农业、实施保护性耕作以提高土壤碳储存,以及通过沼气设施将农业废物转化为能源^[75-76]。此外,植树造林也有助于增加碳的固存。适应策略的重点是培育抗灾能力强的作物品种,并通过先进的灌溉技术提高水资源利用效率。

在降低碳排放强度的建议中,制定适当的行业措施和实现土地利用中的碳减排至关重要。针对这一研究课题,Zhang等^[77]评估了2006—2016年中国281个地级市产业结构和技术进步对碳排放强度的影响,发现技术变革和效率提升是驱动碳排放强度变化的主导因素,而优化产业结构和技术进步对降低碳排放强度的联合效应不如预期显著^[78]。由此,提出了针对性的降低碳排放强度的政策建议,包括推广区域绿色技术、制定多样化的城市发展策略等。此外,Mohammed等^[79]揭示了全球十大碳排放国的CO₂排放与经济发展之间的关系及其驱动因素,同时评估了农业和能源等关键部门对碳排放的影响和适应机制。此外,《城镇化生态转型——理论、方法与案例》^[61,80]一书系统梳理了城市化背景下土地利用适应气候变化与生态文明建设的理论内涵与实践路径。

在适应农业用地碳排放和应对气候变化的管理措施方面,现有研究在关注土地系统本身的同时运用了生命周期理论。在物质流分析的支持下,揭示了土地利用系统在生产、运输和消费阶段的综合多链适应措施^[81]。同时,研究也关注农业用地中的食物浪费对社会、生态和经济的重大影响,并深入探讨了食物浪费的现状、驱动因素和解决方案^[82]。Xue等^[83]采用物料流分析方法,系统表征了中国食品供应链中各种食品类型的物料流。发现中国每年在土地、碳、氮排放方面的粮食损失和浪费相当于英国等中等国家的消费规模。因此,要减少土地利用过程中的碳排放,不仅要关注农业用地本身,还需优先考虑农业用地其他阶段的减排管理。

3 粮食安全背景下农业土地利用系统资源环境承载力评价

农业土地利用系统研究的核心任务是评估和调控多组分的综合效应。该系统不仅与粮食安全密切相关,也涉及资源环境承载力的评估^[84-86],目标在于探索其时空格局和运行机制,以实现农业资源、环境和生态系统的协调平衡^[87-89]。在粮食和营养需求日益增长的背景下,本研究服务于国家粮食安全战略和“双碳”目标,通过增强农业对气候变化的适应性,确保其可持续与高效发展。研究还分析粮食消费模式与资源环境承载力之间的耦合关系,主要聚焦以下3个方面:①粮食安全所需的土地-气候-水资源;②农业土地利用系统的资源利用效率;③资源环境承载力与粮食供给。本研究旨在为提升农业气候适应性、保障粮食安全、推动可持续发展提供科学支撑。

3.1 粮食安全下的土地-气候-水资源

农业是受气候变化影响最显著的行业之一。理解气候变化对农业产量的影响,对于管理层面及时、精准、有效地推动农业适应具有重要意义^[90]。已有大量研究基于大规模的长期地面观测数据,探讨了土地、气候、水资源与粮食安全之间的关系^[91]。这些研究不仅帮助识别了易受气候变化影响的关键地区,还为决策者制定农业政策和有效资源管理方案提供了宝贵的依据。同时,通过这些数据,科研人员还能够开展模拟实验,预测未来气候变化对粮食产量和水土资源可持续利用的潜在影响,从而提前制订适应性策略,确保全球粮食安全。

气候变化通过水、热、光等资源影响粮食生产,尽管模型能够识别其对产量的直接影响,但难以全面评估极端气候事件的效应。Shi等^[91]研究开发出时间序列叠加分析法(Superposed Epoch Analysis, SEA),构建1982年以来的中国县级作物产量数据库,量化了干旱和洪涝对作物产量的影响。基于20世纪70年代至21世纪10年代的数据,分析了气候变化对北方耕地分布的影响,发现其与社会经济因素共同推动了耕地分布的变化。此外,基于1961—2010年非洲玉米产量与气候数据,研究了不同管理水平下玉米对气候变化的敏感性^[40],强调了减缓与适应策略的重要性。研究还通过1981—2010年气象站数据分析小麦物候变化^[92],结果显示小麦生长期缩短,但通过引入高热量品种和推迟播种日期可有效缓解此影响,体现出适应性农艺措施的应用价值。

应对气候变化对粮食安全和自然生态系统的挑战至关重

要。中国气温显著上升,但气候变化对水资源及农业的潜在影响、以及其对人口承载能力的影响尚待评估^[93]。许多粮食安全面临挑战的地区依赖本地农业,主要分布在热带和亚热带,受气候变化和国际商品价格波动影响显著^[94]。随着气候变化加剧,植物病害威胁预计增加,将对粮食安全与生态系统带来负面影响^[95]。为有效应对这些挑战,亟需搭建科学与政策对接平台,实时监测和管理气候变化条件下的作物生长与病害,确保长期粮食安全和生态系统的可持续发展。

3.2 农业土地利用系统的资源利用效率与粮食生产

为满足乡村振兴中提高资源利用效率和优化资源系统的决策需求,有研究学者构建了资源利用的指标体系并开展多模型分析,形成了一套自主知识产权的模型系统,包含资源结构分析、过程反演、模式模拟和效果评估,以满足农业要素配置与资源效率评估的需求^[96]。此外,提出了系统化的效率评价方法,以评估乡村振兴中的生态、技术、组织和系统效率。气候变化可能通过减少农业产量并影响全球粮食产量,从而推高商品价格,加剧营养不足地区的粮食安全问题^[94]。然而,这些地区较低的农业生产率也为提升生产效率提供了潜在机会。

改良种子、施肥、优化土地利用和强化治理有助于保障粮食安全。一项研究评估了张掖流域农业生产与水资源及土壤保护的权衡关系,发现增加农业生产会降低水资源产出和土壤保护功能,尤其在上游地区^[97]。量化这些权衡关系的空间分布,有助于制定生态保护政策,实现可持续管理。此外,经济增长和城市化推动生态效率提升成为农业可持续发展的关键。基于土地生产力估算和随机前沿分析,Deng和Gibson^[98]研究了1990—2010年山东省的土地生产力和生态效率,发现山东省大部分城市的生态效率较高,均在0.9以上,大多数城市的生态绩效指数为正,表明植被损失对城市化和社会经济发展具有显著的正向影响,此外,山东省的土地生产力发展不均衡,部分远离省会的城市生态效率较低,因此,要实现农业可持续生产,需要处理好农业生产与城市化之间的权衡关系,因地制宜地调整农业技术措施,提高土地生产力和生态效率。Porter等^[99]采用全球生物圈管理模型结合Lund-Potsdam-Jena土地管理模型、EPIC和WaterGap模型,综合评估全球变化对自然资源的影响。结果显示,为满足2050年粮食需求,需增加1亿公顷土地以使粮食产量增长一倍,国际贸易量或增至三倍,并需增加10%~20%的贸易流量,从水资源丰富地区向缺水地区转移以维持生态需求^[100]。气候变化对主要产区的影响显著,尽管存在预测不确定性。此外,有

研究表明,实施碳价推动造林较单一排放税更有利于粮食安全^[85],凸显了减排政策与农业管理政策协调的必要性。

3.3 资源环境承载力与粮食供给

减少粮食损失和浪费对实现可持续食品系统和粮食安全至关重要。有研究基于6年实地调查和文献数据,通过物质流分析系统评估了中国食品供应链中主要食品的损失和浪费规模、特征及资源环境影响。结果显示中国每年约27%(3.49亿吨)的食品被损失或浪费,其中,45%发生在收获后处理和储存环节,13%发生在户外消费中。减少粮食损失和浪费能够在保障粮食安全的同时,节约资源并降低环境压力^[83]。为确保长期粮食安全,需在资源承载力范围内生产,并采用保护性农业和合理土地规划,以优化土地利用和维持生产力。

实现粮食安全需高效利用土地,避免森林砍伐、过度放牧及化学品过量使用^[101]。保护区在生物多样性保护中关键,但耕地扩张威胁其生态功能^[102]。土地资源有限,且饮食结构变化在部分地区已超越人口增长,推动粮食用地需求。建议生产者自我监测环境影响,灵活实施环境管理^[103]。人口增长加剧生物多样性损失,保护生态系统健康对长期生态服务至关重要。此外,城市化提升了中国对多样化食品需求,需提高农业生产力以应对资源压力。粮食损失显著增加碳排放,研究显示其占饮食碳足迹的28%^[104],减少粮食损失可增加供给并减少排放^[105-106]。推广低碳农业技术和优化能源使用有助于平衡粮食安全与气候需求^[107]。

气候智慧型农业是一种转型农业系统,以保障气候变化下的粮食安全。气候变化导致降水和温度模式变化,威胁农业生产,加剧贫困人口脆弱性,扰乱食品市场,危及粮食供应。气候智慧型农业通过增强农民适应力、提升农业韧性和提高资源利用效率应对以上风险。其四大行动领域包括:建立证据基础、提升地方机构效能、协调气候与农业政策、促进气候和农业融资,以推动各方合作实现气候韧性^[108]。不同于“常规策略”,气候智慧型农业更注重灵活、有针对性的解决方案,并以创新政策和融资手段支持。

4 农业土地利用系统管理的能力提升与优化

数字时代的深度变革正推动农业土地系统理论与实践的范式转型。从系统论视角看,农业土地利用作为人地系统的核心要素,其智能化转型既是技术演进的必然趋势,也是生态文明建设的内在要求。数据驱动技术的广泛渗透重构了土地利用的预测、监测、决策与优化范式^[109],为破解资源约束

与生态胁迫提供了创新路径。以深度学习与机器学习为代表的人工智能技术在这一转型过程中发挥着基础性作用,在作物产量预测、病害诊断和杂草识别等领域有了诸多突破性应用^[110],标志着农业生产进入智能化新阶段。

大数据分析技术的深度融合引发了农业土地系统认知的革命性突破。多源异构信息的协同分析不仅提升了系统的感知维度和决策精度,更重要的是开启了复杂系统解析的新范式^[111-112]。基于大数据的分析方法能够突破传统认知的局限,揭示土地利用变化的深层机理与演化规律^[113]。这种从“经验驱动”向“数据驱动”的方法论转变,实现了对农业土地系统的多维解构与精准重构,为农业生产布局优化和资源高效配置提供了有力支撑。

在“双碳”目标与粮食安全战略约束下,农业土地利用系统的管理创新面临新的理论突破与技术跃升机遇^[114-115]。一方面,信息技术的迭代升级持续拓展着系统认知的边界^[116];另一方面,模型创新与平台建设的协同推进,正在重塑系统管理的方法论体系^[117]。特别是在资源要素精准配置、生态系统服务评估和气候变化应对等关键领域,新理论与新技术的交互作用催生出一系列创新性解决方案,为农业土地可持续利用开辟了新的发展空间,也为人地系统协调发展提供了现实路径。

4.1 多维监测与数据融合

多源异构数据的深度融合与智能分析是现代农业土地利用系统的基础支撑。传统的单一数据源分析方法已难以满足复杂农业系统的认知需求,而基于多维度、多尺度的综合监测体系则为系统解析提供了新的可能^[118]。在此背景下,以遥感数据、地面观测和众源信息为核心的三维监测网络应运而生,不仅实现了对农业土地利用系统的立体化感知,更为科学决策提供了全方位的数据支持。

大数据驱动的第四范式为农业土地系统的深度认知开辟了新途径。一方面,多源数据的协同分析显著提升了对农业土地利用变化机理的理解深度。基于深度学习的数据挖掘方法能够有效识别土地利用演变的关键驱动因素,为精准管理提供了科学依据^[119-120]。另一方面,人工智能算法的引入使得水、肥、药等要素的精准配置成为可能^[110,121],在提升资源利用效率的同时,有效降低了农业生产对生态环境的负面影响。

数据融合技术的创新应用进一步拓展了生态系统服务评估的研究维度。通过构建综合评估框架,实现了对农地碳汇功能、水源涵养能力和生物多样性保护效益的系统量化^[122-123]。这种基于多源数据的综合评估方法不仅提升了评估结果的科

学性和可靠性,更为制定可持续的土地利用政策提供了重要支撑。特别是在社会经济驱动因素识别方面,多维数据的融合分析有效揭示了人口、经济、消费等要素对农业土地利用格局的影响机制^[113,124],为系统优化与调控提供了新的思路。

4.2 政策评估与模型集成

农业土地利用系统的复杂性与动态性对政策评估提出了更高要求。传统的单一模型评估方法往往难以全面把握系统的多维特征^[125],而模型集成分析则为此提供了新的解决思路。通过构建多维度、多尺度的综合评估框架,不仅能够深入分析不同政策情景下的系统响应特征,更能有效识别政策实施过程中的关键节点与瓶颈问题^[126]。特别是在粮食安全、生态环境和社会经济的协同评估方面,模型集成方法展现出独特优势。

模型集成创新为农业土地利用政策的科学评估开辟了新途径。一方面,通过耦合社会经济、资源环境和技术创新等多个子系统模型,实现了对政策效应的全链条分析;另一方面,借助情景模拟和敏感性分析,揭示了政策干预与系统响应之间的内在机理^[127]。模型集成方法在识别部门协同效应、评估技术创新影响等方面具有显著优势,为优化政策组合提供了科学依据。

气候变化背景下,模型集成分析在农业土地利用系统适应性评估中发挥着关键作用。通过构建气候变化响应-土地利用演变-系统适应的集成模型框架,不仅实现了对系统脆弱性的精准识别,更为增强系统韧性提供了有效途径^[128-129]。特别是在区域尺度上,模型集成方法有效揭示了土地利用系统的空间互动机制,为制定差异化的适应策略提供了重要参考。

4.3 平台建设与管理

农业土地利用系统的智能化转型既是技术进步的必然选择,也是复杂系统治理的内在要求。从系统论视角看,传统的经验导向型管理模式难以应对系统的复杂性和不确定性,而基于大数据和云计算的智能管理平台则开创了系统优化的新范式。数据驱动的决策机制不仅突破了传统管理的认知边界,更构建了一个“感知-分析-决策-反馈”的闭环治理体系^[130]。特别是在遥感大数据的支撑下,农业土地利用系统实现了从静态描述向动态监测的方法论跃升,为科学决策提供了更为坚实的理论基础^[131]。

智能管理平台的理论创新与技术突破展现出系统性变革的深远影响。在微观层面,数字技术与传统试验的深度融合重构了农业生态景观研究的认知框架,实现了从单一尺度分

析向多维耦合评估的方法论转变^[132-133]。在中观层面,分布式架构与云计算的协同突破了数据处理的技术瓶颈,为复杂系统的深度解析提供了新的分析范式^[134]。在宏观层面,精准农业技术的系统性应用重塑了资源要素配置机制,开创了要素优化的新模式^[135]。

农业土地利用系统的智能化管理将呈现出理论创新与技术突破相互促进的发展态势。人工智能技术的深度应用不仅将提升系统的自适应能力,更将推动管理模式从“被动响应”向“主动预测”转变。多学科的交叉融合将持续拓展系统认知的边界,特别是在遥感科学和土地系统科学等领域的协同突破^[136],将为智能化治理提供新的理论支撑和技术路径。

5 结论与展望

5.1 结论

基于长期发展过程中形成的研究优势和比较优势,本研究的主要目标为构建一个农业土地利用系统管理的理论体系与治理机制,为“双碳”目标、城市化、粮食安全、乡村振兴、扶贫及美丽中国的战略目标提供支撑。研究重点在于建立农业土地利用系统管理的理论框架、开展应用研究和实证分析,并构建应对农业土地利用系统复杂性问题的系统分析平台,逐步明确系统管理的理念和结构,最终形成基础理论、应用研究与决策支持相结合的“三位一体”研究框架和系统平台。未来研究需进一步聚焦基础理论的拓展、重大问题的指导及关键政策的支持。目前,研究规划已进入正轨,正在稳步推进具有中国特色的农业土地利用系统管理体系和治理机制的建立。这一目标与现有研究基础紧密相连。多年来,围绕农业土地利用系统管理的多学科基础研究,涵盖了时空格局模拟分析、大数据信息理论、资源优化配置模拟、系统耦合分析、气候变化响应模拟以及可持续发展与治理等内容,积累了丰富的研究成果和经验。这些成果为实现本研究目标奠定了坚实基础。

5.2 未来展望

本研究旨在通过理论体系的拓展和创新,聚焦以下四个主要方向的管理实践:一是以碳减排和粮食安全为导向的农业土地利用系统理论创新;二是农业土地利用系统中温室气体减排的多尺度综合管理;三是基于粮食与营养安全的资源配置优化;四是由人工智能和数字经济驱动的农业转型路径优化。图3所示的四个研究方向涵盖了从现象表征、机制分析到管理策略优化的全流程,最终相互关联。具体来说,一是

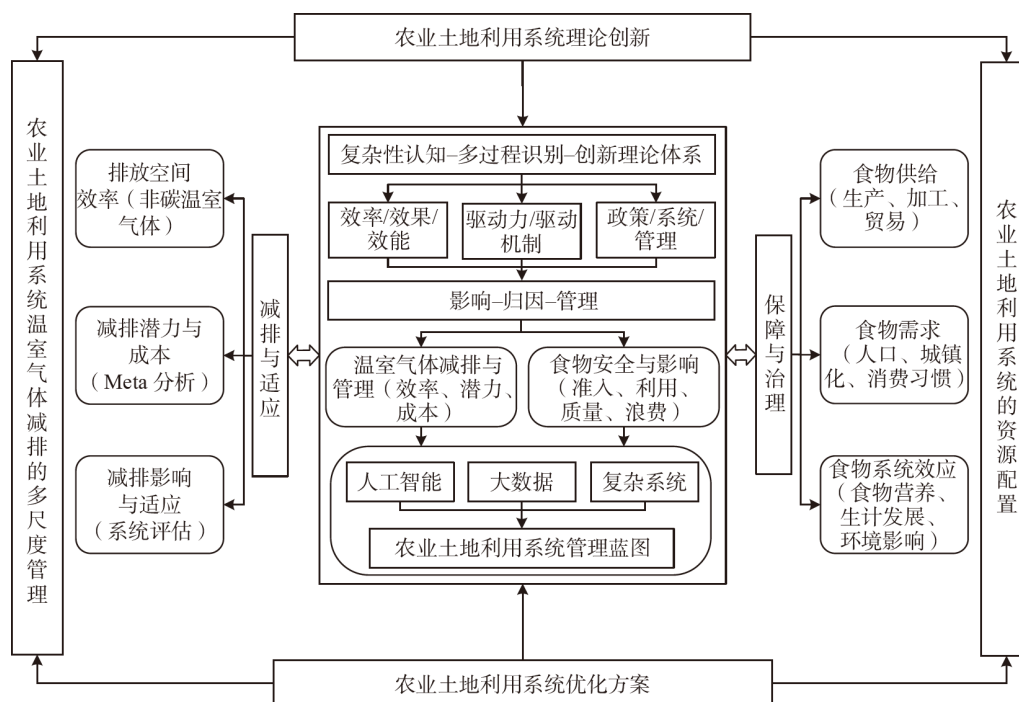


图3 农业土地利用系统管理未来研究方向展望

Fig.3 Prospects for future research directions in agricultural land-use system management

全面阐明农业土地利用系统各子系统在不同尺度和区域间的反馈机制，构建具有综合耦合的理论体系和分析框架，包括区域农业土地利用系统的复杂性认知和机制识别以及复杂多尺度耦合的理论创新与模型构建；二是全面覆盖土地系统规划、产业结构调整、土地开发整治及城乡建设等领域的温室气体管理，推进低碳发展的实现路径；三是揭示农业土地利用系统在资源与环境承载力方面的基础理论和资源配置策略，增强农业系统对粮食和营养安全的适应性，构建可持续的资源利用方案；四是开发“人工智能+”技术以实现管理优化与技术升级，推动基于人工智能和数字经济优化方案的农业土地利用系统管理决策支持平台的构建，为农业现代化转型提供技术支持。

5.3 政策建议

建立农业土地利用优化路径，推动“粗放利用”向“集约管理”转变。“十四五”中后期，选取典型农业区开展土地利用系统优化试点。“十五五”前期，在全国范围推广土地综合效益评估体系，将耕地质量作为约束性指标，碳汇能力作为预期性指标。2030年后，完善以资源承载力提升为核心的土地可持续利用体系。

推进全产业链土地综合利用，加速新型农业生产体系建设。建立保障土地可持续利用的轮作制度、定价机制和更具活力的土地流转市场。实施全国范围内耕地质量监测，减少

土地退化。部署土壤改良和生态修复目标。以市场机制激励农户采用保护性耕作，促进农业碳汇增加。加速生物炭还田、秸秆全量利用的技术研发和政策储备。优化农业生产空间布局，避免对生态保护红线、永久基本农田和城镇发展区的不利影响。

将粮食安全、生态系统服务和农民收益纳入土地利用系统优化的顶层设计。确保粮食主产区和特色农产品优势区的生产能力，特别是在极端气候事件频发期间，防止出现大规模减产风险。加快对退化耕地的综合整治，以提高农业生产的气候适应能力，并满足生态修复要求。部分低效农田可以改造为生态农业示范区，并可考虑与碳汇交易机制结合，从而提升土地综合效益。扩大高标准农田建设规模，支持农民培训，增加土地利用优化带来的绿色收益。

继续完善农业碳汇提升的政策组合。包括制定技术标准，实施耕地质量提升补贴等财政激励，碳汇交易等市场化机制，并明确规模化农业企业的碳减排责任。加快土壤碳汇监测、核算等基础设施建设。建立农业碳汇评估体系，出台农业碳汇收益分配政策。

参考文献

- [1] Scheidel A, Del Bene D, Liu J, et al. Environmental conflicts and defenders: A global overview[J]. Global Environmental Change, 2020, 63: 102104.
- [2] Tubiello F N, Rosenzweig C, Conchedda G, et al. Greenhouse gas emis-

- sions from food systems: Building the evidence base[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(6): 065007.
- [3] 范紫月, 齐晓波, 曾麟岚, 等. 中国农业系统近40年温室气体排放核算[J]. *生态学报*, 2022, 42(23): 9470–9482.
- [4] 姚文. 数字农业促进农业强国建设的作用机制与推进路径——基于农业强省建设视角的实证检验[J]. *华南师范大学学报(社会科学版)*, 2023(6): 31–55.
- [5] Reenberg A. Global land science: From land use analysis to land system analysis[C]// 2nd GLP Open Science Meeting, Berlin, Germany: 2014.
- [6] Silva L J, Oliveira D M S, Santos R S, et al. Soil carbon dynamics in integrated agricultural systems in Minas Gerais state, Brazil: A meta-analysis[J]. *Geoderma Regional*, 2024, 36: e00761.
- [7] Waaswa A, Nkurumwa A O, Kibe A M, et al. Adapting agriculture to climate change: institutional determinants of adoption of climate-smart agriculture among smallholder farmers in Kenya[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2024, 10(1): 2294547.
- [8] Jansma J E, Wertheim-Heck S C O. Feeding the city: A social practice perspective on planning for agriculture in peri-urban Oosterwold, Almere, the Netherlands[J]. *Land Use Policy*, 2022, 117: 106104.
- [9] Sidhu B S, Mehrabi Z, Ramankutty N, et al. How can machine learning help in understanding the impact of climate change on crop yields?[J]. *Environmental Research Letters*, 2023, 18(2): 024008.
- [10] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, et al. Global land change from 1982 to 2016[J]. *Nature*, 2018, 560(7720): 639–643.
- [11] Turner B L II, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(52): 20666–20671.
- [12] 唐华俊, 吴文斌, 余强毅, 等. 农业土地系统研究及其关键科学问题[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(5): 900–910.
- [13] Flachs A, Richards P. Playing development roles: The political ecology of performance in agricultural development[J]. *Journal of Political Ecology*, 2018, 25(1): 638–646.
- [14] Zuazo V H D, Pleguezuelo C R R, Flanagan D, et al. Sustainable land use and agricultural soil[M]. *Alternative Farming Systems, Biotechnology, Drought Stress and Ecological Fertilisation*. Dordrecht: Springer, 2010: 107–192.
- [15] VanWey L K, Ostrom E, Meretsky V. Theories underlying the study of human-environment interactions[M]. *Seeing the Forest and the Trees: Human-Environment Interactions in Forest Ecosystems*, Cambridge: MIT Press, 2005.
- [16] Fuentes-Llanillo R, Telles T S, Junior D S, et al. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 208: 104877.
- [17] Liu Z J, Wang J Y, Wang X Y, et al. Understanding the impacts of ‘Grain for Green’ land management practice on land greening dynamics over the Loess Plateau of China[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 105084.
- [18] Xie H L, Lu H. Impact of land fragmentation and non-agricultural labor supply on circulation of agricultural land management rights[J]. *Land Use Policy*, 2017, 68: 355–364.
- [19] 史文娇, 岳天祥, 石晓丽, 等. 土壤连续属性空间插值方法及其精度的研究进展[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(1): 163–175.
- [20] Deng X Z. *Modeling the Dynamics and Consequences of Land System Change*[M]. Berlin: Springer, 2011.
- [21] 张晨星, 徐晶晶, 温静, 等. 基于CA-Markov模型和MCE约束的白洋淀流域景观动态研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(4): 655–664.
- [22] Dong J W, Xiao X M, Kou W L, et al. Tracking the dynamics of paddy rice planting area in 1986–2010 through time series Landsat images and phenology-based algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 160: 99–113.
- [23] Salem M, Tsurusaki N, Divigalpitiya P. Remote sensing-based detection of agricultural land losses around Greater Cairo since the Egyptian revolution of 2011[J]. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104744.
- [24] Wu F, Zhan J Y, Zhang Q, et al. Evaluating impacts of industrial transformation on water consumption in the Heihe River Basin of Northwest China[J]. *Sustainability*, 2014, 6(11): 8283–8296.
- [25] Zellner M, García G A, Bert F, et al. Exploring reciprocal interactions between groundwater and land cover decisions in flat agricultural areas and variable climate[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 126: 104641.
- [26] Yu Q Y, Wu W B, Tang H J, et al. An agent-based model for simulating crop pattern dynamics at a regional scale: Model framework[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(15): 3266–3276.
- [27] Bankes S C. Agent-based modeling: A revolution?[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99 (Suppl 3): 7199–7200.
- [28] 周贵鹏, 龙花楼. 土地利用转型机理与国土空间格局优化——基于土地利用效益空间函数视角的分析[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(10): 2447–2463.
- [29] 宋琼, 金贵. 共享社会经济路径下湖北省土地利用结构预测及启示——基于CGE模型的实证研究[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(2): 411–425.
- [30] Wenkel K O, Berg M, Mirschel W, et al. LandCaRe DSS—An interactive decision support system for climate change impact assessment and the analysis of potential agricultural land use adaptation strategies[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 127: S168–S183.
- [31] Bai Y P, Deng X Z, Cheng Y F, et al. Exploring regional land use dynamics under shared socioeconomic pathways: A case study in Inner Mongolia, China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 166: 120606.
- [32] Tang J M, Wang L, Yao Z J. Analyses of urban landscape dynamics using multi-temporal satellite images: A comparison of two petroleum-oriented cities[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 87(4): 269–278.
- [33] Fazal S. The need for preserving farmland: A case study from a predominantly agrarian economy (India)[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2001, 55(1): 1–13.
- [34] Jiang L, Deng X, Seto K C. Multi-level modeling of urban expansion and cultivated land conversion for urban hotspot counties in China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 108(2-4): 131–139.
- [35] Yu M, Chen Z H, Long Y, et al. Urbanization, land conversion, and arable land in Chinese Cities: The ripple effects of high-speed rail[J]. *Applied Geography*, 2022, 146: 102756.
- [36] Jin X B, Xu X X, Xiang X M, et al. System-dynamic analysis on socioeconomic impacts of land consolidation in China[J]. *Habitat International*, 2016, 56: 166–175.
- [37] 方莹, 王静, 孔雪松, 等. 耕地利用多功能权衡关系测度与分区优化——以河南省为例[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(11): 57–64.
- [38] Li Q F, Dong Z, Du G M, et al. Spatial differentiation of cultivated land use intensification in village settings: A survey of typical Chinese Villages[J]. *Land*, 2021, 10(3): 249.
- [39] Fróna D, Szenderák J, Harangi-Rákos M. Economic effects of climate

- change on global agricultural production[J]. *Nature Conservation*, 2021, 44: 117–139.
- [40] Shi W J, Tao F L. Vulnerability of African maize yield to climate change and variability during 1961–2010[J]. *Food Security*, 2014, 6(4): 471–481.
- [41] Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L, et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 138(1-4): 82–92.
- [42] Liu L C, Hu X T, Li L X, et al. Understanding China's agricultural non-carbon-dioxide greenhouse gas emissions: Subnational insights and global trade dynamics[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 106: 107487.
- [43] Harmsne M, Tabak C, Höglund-Isaksson L, et al. Uncertainty in non-CO₂ greenhouse gas mitigation contributes to ambiguity in global climate policy feasibility[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2949.
- [44] Bai Y P, Deng X Z, Jiang S J, et al. Relationship between climate change and low-carbon agricultural production: A case study in Hebei Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 438–447.
- [45] Wang P, Deng X Z, Jiang S J. Global warming, grain production and its efficiency: Case study of major grain production region[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 563–570.
- [46] Stuecker M F, Bitz C M, Armour K C, et al. Polar amplification dominated by local forcing and feedbacks[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 1076–1081.
- [47] 邓祥征, 蒋思坚, 刘冰, 等. 全球二氧化碳浓度非均匀分布条件下碳排放与升温关系的统计分析[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(4): 934–947.
- [48] 姚依欣, 李贵才, 唐世浩, 等. 2010年–2020年全球陆地区域大气CO₂时空变化特征分析[J]. *遥感学报*, 2023, 27(8): 1782–1791.
- [49] Asseng S, Ewert F, Martre P, et al. Rising temperatures reduce global wheat production[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5: 143–147.
- [50] Hu Q, Yin H, Friedl M A, et al. Integrating coarse-resolution images and agricultural statistics to generate sub-pixel crop type maps and reconciled area estimates[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 258: 112365.
- [51] Pongratz J, Lobell D B, Cao L, et al. Crop yields in a geoengineered climate[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 101–105.
- [52] Wu A, Hammer G L, Doherty A, et al. Quantifying impacts of enhancing photosynthesis on crop yield[J]. *Nature Plants*, 2019, 5(4): 380–388.
- [53] 陈星, 余晔, 陈晋北, 等. 黄土高原半干旱区雨养农田地表辐射和能量通量的季节变化[J]. *高原气象*, 2016, 35(2): 351–362.
- [54] 张晓煜, 王连喜, 袁海燕. 宁南半干旱地区农田和草地生态系统能量通量的季节变化[J]. *生态学报*, 2005, (9): 2333–2340.
- [55] Sun Z, Ouyang Z, Zhang X B, et al. A new global dataset of phase synchronization of temperature and precipitation: Its climatology and contribution to global vegetation productivity[J]. *Geoscience Data Journal*, 2019, 6(2): 126–136.
- [56] 李志慧, 王艺霏, 邓祥征. 东北黑土地地区稻田甲烷排放时空演变及排放潜力分析[J]. *生态学报*, 2024, 44(9): 3814–3829.
- [57] 刘树伟, 纪程, 邹建文. 陆地生态系统碳氮过程对大气CO₂浓度升高的响应与反馈[J]. *南京农业大学学报*, 2019, 42(5): 781–786.
- [58] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 等. 耦合PLUS-InVEST模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(02): 300–314.
- [59] Shi W J, Liu Y T, Shi X L. Contributions of climate change to the boundary shifts in the farming-pastoral ecotone in Northern China since 1970 [J]. *Agricultural Systems*, 2018, 161: 16–27.
- [60] Roy P S, Ramachandran R M, Paul O, et al. Anthropogenic land use and land cover changes—A review on its environmental consequences and climate change[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2022, 50(8): 1615–1640.
- [61] 邓祥征, 张帆, 刘伟, 等. 城镇化生态转型——理论、方法与案例[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [62] 张玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(6): 100–112.
- [63] Ying N, Zhou D, Han Z G, et al. Rossby waves detection in the CO₂ and temperature multilayer climate network[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(2): e2019GL086507.
- [64] Liu Z, Deng Z, Davis S J, et al. Monitoring global carbon emissions in 2021[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(4): 217–219.
- [65] Lamb W F, Grubb M, Diluio F, et al. Countries with sustained greenhouse gas emissions reductions: An analysis of trends and progress by sector[J]. *Climate Policy*, 2022, 22(1): 1–17.
- [66] Alcaraz O, Sureda B, Turon A, et al. Equitable mitigation to achieve the 1.5 °C goal in the Mediterranean Basin[J]. *Climatic Change*, 2021, 165 (3): 62.
- [67] Chen Y T, Liu A B, Cheng X. Quantifying economic impacts of climate change under nine future emission scenarios within CMIP6[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134950.
- [68] Ding R, Shi W J, Lu C H, et al. Future unbalanced-trends of grain supply and demand on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 367: 132993.
- [69] Zhang W J, Zhang N, Yu Y N. Carbon mitigation effects and potential cost savings from carbon emissions trading in China's regional industry [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 141: 1–11.
- [70] Zhang G L, Dong J W, Zhou C P, et al. Increasing cropping intensity in response to climate warming in Tibetan Plateau, China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 142: 36–46.
- [71] 刘晓娟, 黎夏, 梁迅, 等. 基于FLUS-InVEST模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J]. *热带地理*, 2019, 39(3): 397–409.
- [72] 颜建军, 冯君怡, 陈彬. 中国城市生态基础设施对碳排放量的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(2): 637–650.
- [73] Jin G, Guo B S, Deng X Z. Is there a decoupling relationship between CO₂ emission reduction and poverty alleviation in China?[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 151: 119856.
- [74] Jiang S J, Deng X Z, Liu G, et al. Climate change-induced economic impact assessment by parameterizing spatially heterogeneous CO₂ distribution[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 167: 120668.
- [75] 李红莉, 张俊彪, 张露, 等. 气候变化认知对农户适应性耕作行为的影响——基于湖北省“十县千户”的田野调查[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(2): 236–248.
- [76] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 905–910.
- [77] Zhang F, Deng X Z, Phillips F, et al. Impacts of industrial structure and technical progress on carbon emission intensity: Evidence from 281 cities in China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 154: 119949.
- [78] Dong Y, Jin G, Deng X Z. Dynamic interactive effects of urban land-use efficiency, industrial transformation, and carbon emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 270: 122547.
- [79] Mohammed A, Li Z H, Arowolo A O, et al. Driving factors of CO₂ emissions and nexus with economic growth, development and human health in the Top Ten emitting countries[J]. *Resources, Conservation and Recy-*

- cling, 2019, 148: 157–169.
- [80] Wang S J, Ma H T, Zhao Y B. Exploring the relationship between urbanization and the eco-environment—A case study of Beijing–Tianjin–Hebei Region[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 171–183.
- [81] 刘晓洁, 胡兆民, 邓祥征, 等. 碳中和目标下生态草牧业的物质流分析框架与发展策略[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 14(4): 379–388.
- [82] 符云玲. 食物浪费、资源消耗与全球碳排放[J]. *生态经济*, 2024, 40(6): 1–4.
- [83] Xue L, Liu X J, Lu S J, et al. China's food loss and waste embodies increasing environmental impacts[J]. *Nature Food*, 2021, 2(7): 519–528.
- [84] Chen X Z, Hou Y, Kastner T, et al. Physical and virtual nutrient flows in global telecoupled agricultural trade networks[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2391.
- [85] Fujimori S, Wu W C, Doelman J, et al. Land-based climate change mitigation measures can affect agricultural markets and food security[J]. *Nature Food*, 2022, 3(2): 110–121.
- [86] Liu J, Jin X B, Xu W Y, et al. Influential factors and classification of cultivated land fragmentation, and implications for future land consolidation: A case study of Jiangsu Province in Eastern China[J]. *Land Use Policy*, 2019, 88: 104185.
- [87] Brottrager M, Cuaresma J C, Kniveton D, et al. Natural resources modulate the nexus between environmental shocks and human mobility[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1393.
- [88] Lobell D B, Villoria N B. Reduced benefits of climate-smart agricultural policies from land-use spillovers[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 941–948.
- [89] Pratzner M, Fernández-Llamazares Á, Meyfroidt P, et al. Agricultural intensification, Indigenous stewardship and land sparing in tropical dry forests[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 671–682.
- [90] Ren C C, Zhang X M, Reis S, et al. Climate change unequally affects nitrogen use and losses in global croplands[J]. *Nature Food*, 2023, 4(4): 294–304.
- [91] Shi W J, Wang M L, Liu Y T. Crop yield and production responses to climate disasters in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 750: 141147.
- [92] Liu Y, Chen Q M, Ge Q S, et al. Effects of climate change and agronomic practice on changes in wheat phenology[J]. *Climatic Change*, 2018, 150(3): 273–287.
- [93] Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43–51.
- [94] Brown M E, Funk C C. Food security under climate change[J]. *Science*, 2008, 319(5863): 580–581.
- [95] Singh B K, Delgado-Baquerizo M, Egidi E, et al. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2023, 21(10): 640–656.
- [96] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J]. *Nature*, 2011, 478(7369): 337–342.
- [97] Li Z H, Deng X Z, Jin G, et al. Tradeoffs between agricultural production and ecosystem services: A case study in Zhangye, Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 136032.
- [98] Deng X Z, Gibson J. Improving eco-efficiency for the sustainable agricultural production: A case study in Shandong, China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 144: 394–400.
- [99] Porter S D, Reay D S, Higgins P, et al. A half-century of production-phase greenhouse gas emissions from food loss & waste in the global food supply chain[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 721–729.
- [100] Munesue Y, Masui T, Fukushima T. The effects of reducing food losses and food waste on global food insecurity, natural resources, and greenhouse gas emissions[J]. *Environmental Economics and Policy Studies*, 2015, 17(1): 43–77.
- [101] Appiah K, Du J G, Poku J. Causal relationship between agricultural production and carbon dioxide emissions in selected emerging economies[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(25): 24764–24777.
- [102] Pastor A V, Palazzo A, Havlik P, et al. The global nexus of food–trade–water sustaining environmental flows by 2050[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 499–507.
- [103] Jägermeyr J, Müller C, Ruane A C, et al. Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models[J]. *Nature Food*, 2021, 2(11): 873–885.
- [104] Meng Z Q, Dong J W, Ellis E C, et al. Post-2020 biodiversity framework challenged by cropland expansion in protected areas[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 758–768.
- [105] Crist E, Mora C, Engelman R. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection[J]. *Science*, 2017, 356(6335): 260–264.
- [106] Lu Y L, Jenkins A, Ferrier R C, et al. Addressing China's grand challenge of achieving food security while ensuring environmental sustainability[J]. *Science Advances*, 2015, 1(1): e1400039.
- [107] Dalin C, Qiu H G, Hanasaki N, et al. Balancing water resource conservation and food security in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(15): 4588–4593.
- [108] Lipper L, Thornton P, Campbell B M, et al. Climate-smart agriculture for food security[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 1068–1072.
- [109] 董金玮, 吴文斌, 黄健熙, 等. 农业土地利用遥感信息提取的研究进展与展望[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(4): 772–783.
- [110] Ayed R B, Hanana M. Artificial intelligence to improve the food and agriculture sector[J]. *Journal of Food Quality*, 2021, 2021: 5584754.
- [111] 陈仲新, 任建强, 唐华俊, 等. 农业遥感研究应用进展与展望[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 748–767.
- [112] 张兵, 杨晓梅, 高连如, 等. 遥感大数据智能解译的地理学认知模型与方法[J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1398–1415.
- [113] 刘彦随. 现代地人关系与入地系统科学[J]. *地理科学*, 2020, 40(8): 1221–1234.
- [114] 丁明磊, 杨晓娜, 赵荣钦, 等. 碳中和目标下的国土空间格局优化: 理论框架与实践策略[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1137–1147.
- [115] 易丹, 欧名豪, 郭杰, 等. 土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J]. *资源科学*, 2022, 44(8): 1545–1559.
- [116] Li Y J, Chen G Q. Big data driven management and decision sciences[J]. *Fundamental Research*, 2021, 1(5): 503.
- [117] Ashoka P, Singh N K, Sunitha N H, et al. Enhancing agricultural production with digital technologies: A review[J]. *International Journal of Environment and Climate Change*, 2023, 13(9): 409–422.
- [118] 周国民. 我国农业大数据应用进展综述[J]. *农业大数据学报*, 2019, 1(1): 16–23.
- [119] Ge Y, Zhang X N, Atkinson P M, et al. Geoscience-aware deep learning: A new paradigm for remote sensing[J]. *Science of Remote Sensing*, 2022, 5: 100047.
- [120] Pandey D K, Mishra R. Towards sustainable agriculture: Harnessing AI for global food security[J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2024, 12: 72–84.

- [121] Jones J, Harris E, Febriansah Y, et al. AI for sustainable development: Applications in natural resource management, agriculture, and waste management[J]. *International Transactions on Artificial Intelligence (ITALIC)*, 2024, 2(2): 143–149.
- [122] 于贵瑞, 李文华, 邵明安, 等. 生态系统科学研究与生态系统管理[J]. *地理学报*, 2020, 75(12): 2620–2635.
- [123] 张康洁, 于法稳. “双碳”目标下农业绿色发展研究: 进展与展望[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(2): 214–225.
- [124] 刘彦随, 龙花楼, 李裕瑞. 全球乡城关系新认知与人文地理学研究[J]. *地理学报*, 2021, 76(12): 2869–2884.
- [125] 王奕佳, 刘焱序, 宋爽, 等. 水—粮食—能源—生态系统关联研究进展[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(7): 684–693.
- [126] 樊杰. 我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与“十三五”规划的应对策略[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(1): 1–12.
- [127] Liu W, Zhou W, Lu L X. An innovative digitization evaluation scheme for spatio-temporal coordination relationship between multiple knowledge driven rural economic development and agricultural ecological environment—Coupling coordination model analysis based on Guangxi[J]. *Journal of Innovation & Knowledge*, 2022, 7(3): 100208.
- [128] 高鸣, 张哲晰. 碳达峰、碳中和目标下我国农业绿色发展的定位和政策建议[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2022(1): 24–31.
- [129] 周广胜, 何奇瑾, 汲玉河. 适应气候变化的国际行动和农业措施研究进展[J]. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 527–533.
- [130] 程立海, 崔荣国, 董瑾, 等. 自然资源和国土空间大数据技术应用框架[J]. *地球信息科学学报*, 2024, 26(4): 881–897.
- [131] 刘纪远, 张增祥, 张树文, 等. 中国土地利用变化遥感研究的回顾与展望——基于陈述彭学术思想的引领[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(4): 680–687.
- [132] Gebresenbet G, Bosona T, Patterson D, et al. A concept for application of integrated digital technologies to enhance future smart agricultural systems[J]. *Smart Agricultural Technology*, 2023, 5: 100255.
- [133] Stupina A A, Rozhkova A V, Olentsova J A, et al. Digital technologies as a tool for improving the efficiency of the agricultural sector[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 839(2): 022092.
- [134] 姜侯, 杨雅萍, 孙九林. 农业大数据研究与应用[J]. *农业大数据学报*, 2019, 1(1): 5–15.
- [135] 刘洋, 张钢, 韩璐. 基于物联网与云计算服务的农业温室智能化平台研究与应用[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(11): 3331–3335.
- [136] 叶思菁, 宋长青, 高培超, 等. 地理空间视角下耕地资源新认知体系构建[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 225–240.