

曾晨,周詹杭,柯新利,等.全球气候变化下农业可持续发展的研究现状和学科交叉分析[J].华中农业大学学报,2024,43(6):6-16.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.06.002

## 全球气候变化下农业可持续发展的研究现状 和学科交叉分析

曾晨<sup>1,2,3</sup>,周詹杭<sup>1,2</sup>,柯新利<sup>1</sup>,刘文平<sup>2,4</sup>,王真<sup>2,5</sup>

1. 华中农业大学公共管理学院,武汉430070; 2. 华中农业大学国土空间治理与绿色发展研究中心,武汉430070;  
3. 华中农业大学发展规划部,武汉430070; 4. 华中农业大学园艺林学学院,武汉430070;  
5. 华中农业大学资源与环境学院,武汉430070

**摘要** 全球气候变化给全球农业可持续发展带来了巨大挑战。本研究以“全球气候变化下的农业可持续发展”为主要议题,面向全球粮食安全和生态安全战略,基于全球可持续发展目标,融合地理学、管理学、农学、经济学等方面的知识、方法和工具,系统梳理了农业可持续发展、全球气候变化对农业可持续发展的影响、人类应对全球气候变化的农业可持续发展行动三方面的国内外研究进展。随后基于该议题的学科交叉性、知识综合性和科学前沿性,提出了全球气候变化下的农业资源开发和利用、耕地保护和粮食安全体系、农业生态安全格局和发展模式转型、农业可持续发展的战略规划以及应对全球气候变化的农业可持续发展策略等5个方面的交叉研究内容。最后在“地球命运共同体”和“人类命运共同体”的先进思想和理念下,从全球气候治理、农食系统转型、城乡气候韧性、智慧农林系统、自然资源利用与生态系统保护等交叉研究方向对全球气候变化背景下农业可持续发展的学科交叉研究体系进行前瞻性的展望。

**关键词** 全球气候变化; 农业; 可持续发展; 学科交叉

**中图分类号** X24

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-2421(2024)06-0006-11

全球气候变化以惊人的速度、频率和幅度影响着人类和动植物的生存环境。全球气候变化以二氧化碳浓度增加、气候快速增暖、降水格局改变为主要表现形式,同时伴随日益频发的极端气候和自然灾害事件,对全球农业可持续发展带来了巨大挑战<sup>[1-2]</sup>。农业可持续发展是在管理和维护自然资源基础上,融合技术变革和制度创新,形成技术上适当、经济上可行和社会可接受的农业生产体系,以持续满足当代及后代人对农产品的需求,同时保护土地、水资源、植物和动物遗传资源<sup>[3]</sup>。过去几十年虽然农业发展迅速,但是一方面全球仍有约1亿hm<sup>2</sup>的撂荒耕地<sup>[4]</sup>,9.8%的人口处于营养不良状态,农业氮磷污染、农产品供求的全球空间非均衡性仍在不断加强<sup>[5]</sup>;另一方面全球农业深受气候变化影响,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,20世纪中叶以来全球小麦和玉米平均每10

a分别减产1.9%和1.2%。可以预见,2050年全球气温进一步升高,气候事件频率将增高,而粮食需求将继续增加30%~62%<sup>[6-7]</sup>。全球气候变化背景下,农作物生产、农产品市场供应、自然资源利用、环境保护和修复等多方面的可持续发展问题亟待系统化探索和分析。

人类应对全球气候变化的综合能力决定着地球生存空间的质量水平和农业生态系统的韧性水平。面对全球气候变化形成前瞻性、系统性和科学性的治理框架和方法体系则是实现全球气候变化下农业可持续发展目标的根本途径。农业可持续发展从战略需求上聚焦人类发展进程中的粮食安全和生态安全问题,从研究对象上涉及到岩石圈、水圈、大气圈和生物圈,从研究手段上涉及到地理学、生物学、经济学、管理学等多个学科。全球气候变化下的农业可持续发展研究有利于搭建多学科汇聚、多工具融

收稿日期:2024-07-08

基金项目:国家自然科学基金项目(42171262;42211530079)

曾晨,E-mail:zengchen@igsrr.ac.cn

通信作者:曾晨,E-mail:zengchen@igsrr.ac.cn;王真,E-mail:sinoo@mail.hzau.edu.cn

合和多组织协作的交流平台,联合国内外科技工作者集中攻关农业可持续发展的重大科学问题和卡脖子技术,形成面向全球,适用于我国国情的农业可持续发展战略。因此,本文综述农业可持续发展的研究现状,凝练全球气候变化下农业可持续发展的学科交叉研究内容,展望未来交叉研究方向,对探索农业可持续发展全球治理路径、培养农业可持续交叉人才具有重要意义,旨在为打造多学科联合科研攻关和产学研协同育人模式,探索农业可持续发展的全球治理路径等提供参考借鉴。

### 1 全球气候变化下农业可持续发展的研究现状

在全球气候变化的宏观背景下,农业可持续发展的研究已成为保障全球粮食安全与生态安全战略的核心议题。研究领域基于全球可持续发展目标,

以地球系统功能变化和人类农业活动方式的改变为主体,以“自然-社会”系统的互馈机制为核心,通过跨学科的综合视角,深入进行地球系统、农业系统及人类社会系统的现状评估、内在机制的深入探索以及可持续发展路径的优化设计等方面的交叉研究(图1)。

#### 1.1 农业可持续发展的研究现状

农业可持续发展是农业科学、地球系统科学、管理科学与环境科学的交叉融合方向,包含生态环境、社会、经济多个维度的可持续性,是一种既维持粮食生产和食品安全可行性,又强调自然资源保护、农业发展代际公平和多重目标平衡的发展方式,重点探索环境、经济和社会系统中粮食安全、生态安全、农民生活质量等多维度关系的耦合平衡。因此,农业可持续发展的研究进展主要是围绕水、土等自然资源和种、肥、药等农业资源利用中所体现的“自然-社会”互馈的宏观复杂系统关系<sup>[8-10]</sup>。

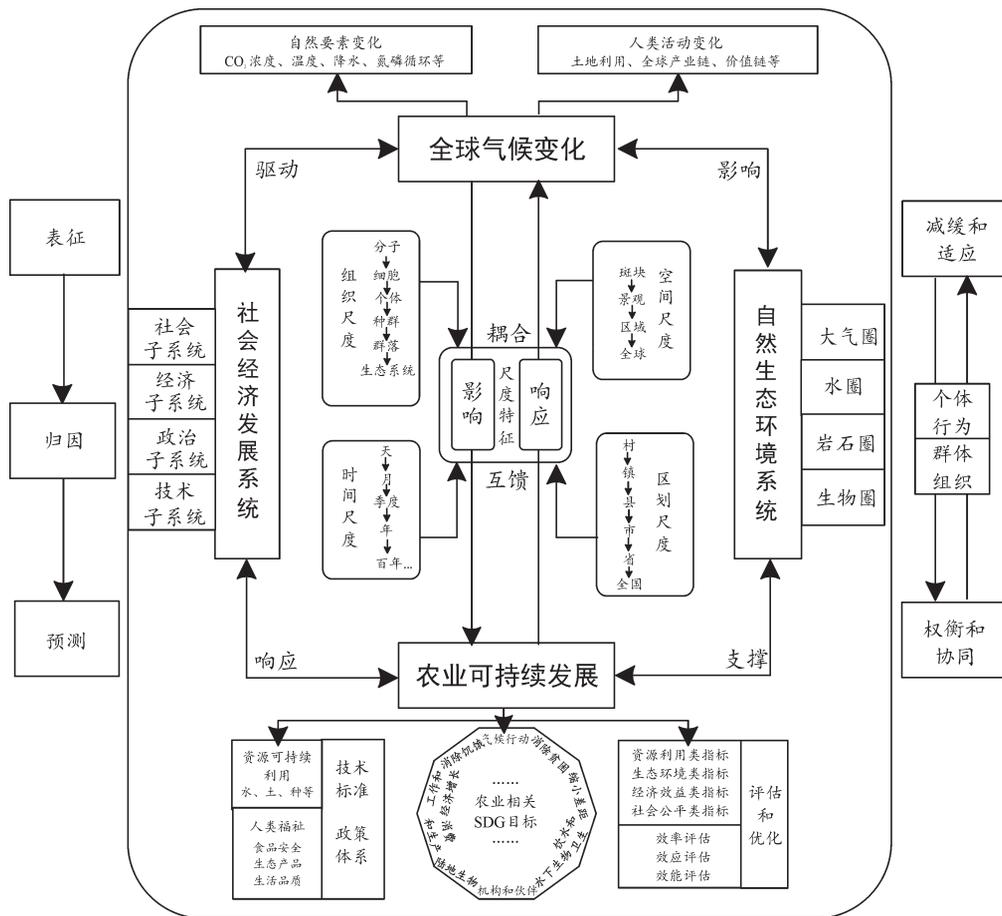


图1 全球气候变化下农业可持续发展科技现状和发展动态

Fig.1 The science and technology status and development dynamic diagram of agricultural sustainable development under the global climate change

在土地资源利用的“自然-社会”互馈关系中,土地的资源属性和资产属性在理论研究和方法实践中得到充分体现。农业可持续发展中的土地资源利用以耕地保护为重点,以土壤化学、土壤微生物学、植物科学、食品科学、环境科学等为基础理论,通过土地复垦、耕作层重构、轮作休耕、耕地质量监测能力建设等措施手段,实现耕地“数量-质量-生态”三位一体的保护机制<sup>[11-12]</sup>。同时,在统筹山水林田湖草沙系统化保护和治理方面,林草地、水体、矿山等的综合整治和生态修复工程也为土地资源的可持续利用奠定了基础<sup>[13-14]</sup>。另一方面,农村地区的土地流转、确权、交易和规模化经营等保障机制是农村土地价值实现的基本路径,各部门、各机构、各级地方政府形成的集责任制、联动性、协作性于一体的协同机制,能够为解决农业可持续发展过程中“人-地-业”之间的矛盾提供有效的政策支持<sup>[15-16]</sup>。同时,农村人口老龄化导致了土地弃耕、退耕和撂荒等现象,也带来了智慧农业的发展机遇,这些均体现了农业可持续发展的中国式现代化特征<sup>[17-18]</sup>。

在水资源利用的“自然-社会”互馈关系中,具有时空动态特征的水资源、水环境和水生态问题是制约和促进农业可持续发展的关键,而其中的气象水文模型、水土流失模型、水利工程建设中的基础理论模型等则是现状表征、归因分析和模拟预测的基础<sup>[19-20]</sup>。近年来不同空间尺度下水资源调配、水资源保护、水土流失和保持、节水效能方面的研究成果较多,并且随着洪涝和干旱等极端气候的空间位移和时间随机性加强,农村地区的水资源供需平衡亟待更具韧性的灌排系统和水利工程设施<sup>[21-22]</sup>。在水土环境治理方面,农村人畜粪便、农作物秸秆、生活垃圾及生活污水等废弃物的无害化处理和资源化利用方面的理论和实践成果较多,这些方法和措施也逐步提升了水生生态系统的脆弱性,促进了江河湖海中生物多样性的保护<sup>[23-24]</sup>。

在种业高质量发展的“自然-社会”互馈关系中,通过技术创新创制种、肥、药适应性品种可以帮助农业适应气候变化带来的挑战,形成协同效应。例如种业创新和政策引导能促进高效高质农药化肥使用,提高农业生产效率,为农业可持续发展提供有力保障。当前利用生物技术培育畜牧业良种的研究持续开展,从种子类型、种子质量以及种子基地建设等方面取得了较大成效<sup>[25-27]</sup>。另一方面,融合农学、理学、工学和管理学知识,已有不少学者开展了耕作、

播种、施肥、施药、灌溉等重要环节精准作业的关键技术与机具的研究,有效地提高了肥料、农药的利用率,降低了其在环境中的残留,改善了生态环境,提高了农产品品质,并通过精深加工、提速生鲜物流、配套网络配送等实现了全过程和全生命周期的农产品生产和供给<sup>[28-29]</sup>。同时,在推动种业创新与清洁技术行为的采纳及推广方面,政府不仅通过引导和激励种植与养殖大户率先采用新型种子、肥料、农药以及环保地膜,来引领普通农户紧跟步伐,而且还提供一系列的现金补贴或实物援助,旨在促进新型农业经营主体全面转型,实现种业的可持续发展与生态化作业模式的广泛普及<sup>[30-31]</sup>。

## 1.2 全球气候变化对农业可持续发展的影响

全球气候变化对农业可持续发展的作用主要体现在对与农业生产高度关联的“气候-水文-生态”的互动过程以及碳氮磷元素的循环过程的改变上。宏观上看,大气温度、降水、海平面和蒸散发量的变化则会对陆地水循环产生重大影响<sup>[32-33]</sup>,碳氮循环在“水-土-气-生”中的周转途径、形态转化及通量的年际、季节及昼夜特征也会随之发生改变<sup>[34]</sup>。这些变化引发了学者们对“气候-水文-生态”三者相互作用机制、全球水资源的区域差异和跨区域协调、极端水旱灾害的应对等农业可持续综合性和交叉性研究问题的持续关注<sup>[35-36]</sup>。从微观上看,全球气候变化可能影响土壤理化性质,产生“气候-水文-生态”的级联影响,如学者们开始探索全球气候变化通过土壤理化性质、土壤磷酸酶活性和丛枝菌根真菌等途径影响土壤磷循环的作用机制,以及大气氮沉降和降水变化等气候变化因子对水土流失、土壤和河流固碳增汇能力的交互作用<sup>[34,37]</sup>。

光、热、水、碳等气候变化的主要表征因子正是农业生态系统最为重要的基础生态因子,对农作物生长发育和粮食产量等产生复杂而深刻的影响。光、热、水、二氧化碳是农作物生长发育所需能量和物质的提供者,学者融合农学和地学领域相关知识,发现全球气候变化下的二氧化碳浓度升高、气温升高、降水变化对农作物生长发育的影响是存在辩证关系的,农作物的水分临界期和二氧化碳“施肥效应”的制约因素等均说明了农作物生长的气候敏感性<sup>[38-39]</sup>。另外近年来越来越多的学者利用遥感地理信息技术,结合气候变化与土地利用变化模型,开展全球未来主要农作物的产量模拟,估算未来全球玉米、水稻、大豆和小麦等主要农作物的空间分布和位

移<sup>[40-41]</sup>。也有学者分析了未来粮食产量变化的影响因素并评估不同地区粮食供需平衡,并基于未来的社会经济发展和气候情景,构建耦合人类活动与自然影响的、多情景、长时序的全球作物时空分布和受灾损失情况数据集,对因地制宜地指定全球气候治理策略,保障世界粮食安全具有重要意义<sup>[29,42]</sup>。

另一方面,全球快速变暖正快速改变地球上动植物的栖居环境,导致海陆生物多样性锐减,深刻影响生命演化进程,这些变化从组织尺度上则从分子、到细胞、到种群、到群落,再到生态系统,从时间尺度上则由天、到月、到季度、到年、到百年、万年等,不同专业背景的科技工作者在全球尺度、区域尺度、地区尺度展开了系列交叉性的实证研究<sup>[43-45]</sup>。全球气候变化会造成土壤微生物、植物物候、植物病虫害等生理生态过程的变化,进而影响植物的生产力、资源开发和利用格局,进而改变植物种群、群落和生态系统水平上物种的组成和结构<sup>[46-47]</sup>。以农业生态系统为例,全球气候变化改变了病虫害的种间关系,从而引起食物链断裂以及农作物病虫害暴发概率的提高,加速了农业生态环境破坏与物种灭绝<sup>[48-49]</sup>。以森林生态系统为例,全球气候变化对病虫害种间关系的改变会造成部分林种抵御灾害、外来生物的抗性弱化,同时延长森林火险期,使得作为重要碳汇资源的森林生态系统稳定性变差<sup>[48]</sup>。从畜牧业动物群体来看,全球气候变化和土地利用变化带来了动物健康和疾病方面的变化,不少地理学、动物科学、生物和医药健康方面的专家合作开展了有关全球气候变化对饮食选择、怀孕、性能等动物活动影响的研究,以及对动物驱虫抗性、胃肠线虫、寄生虫、传染病等健康方面的影响研究<sup>[50-51]</sup>。例如,在较高温度条件下,牲畜进食减少和呼吸加快抑制饲料可利用性和饲料转化效率,降低了畜牧系统的生产力<sup>[52]</sup>。预计到21世纪末,大部分热带地区几乎所有牲畜物种的潜在热应激暴露都将增加并变得普遍,而热应激通过降低生育能力、抑制免疫系统对动物健康产生负面影响<sup>[53]</sup>。

### 1.3 人类应对全球气候变化的农业可持续发展行动

人类应对全球气候变化的农业可持续发展行动主要包括有资源环境要素时空配置、全球气候变化下的农业系统风险评估与应对策略、缓解和适应全球气候变化的农业治理体系等方向。人类活动是诱

发全球气候变化的重要驱动力,同时也是促进农业可持续发展的重要源动力。以联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)、地球系统科学联盟(ESSP)、未来地球计划(future Earth)等为核心的组织和计划也成为了推动全球气候变化研究的重要支撑,同时也逐步深度融合农业系统中的“自然-社会”互反馈耦合关系,从而促进全球农业可持续发展<sup>[54]</sup>。与此同时,联合国粮农组织(FAO)开展了面向消除饥饿和贫困,偏重公平和效率的全球农业可持续发展系列评估,经济合作与发展组织(OECD)则制定了偏重于优质农产品生产与农业资源环境保护的农业可持续发展评价模式<sup>[55]</sup>。同时,国内外不同专业背景的学者和相关机构负责人结合全球气候变化特征,基于联合国可持续发展目标,逐步形成了农业可持续发展中动植物健康和多样性、食品安全、社会经济福利、人类活动强度等方面的效率、效益、效能评估体系<sup>[45,56-57]</sup>。

在应对全球气候变化的农业可持续发展治理体系方面,基于土地利用和管理、水资源保护、生物育种、农业资源和生态环境保护、食品科学和技术、农业农村现代化等方面的交叉知识体系,近年来校政企协同围绕农业产业链、价值链和生态链布局创新链、汇聚人才链、强化治理链,为促进全球气候变化下的农业可持续发展提供科技支撑<sup>[55,58]</sup>。管理学、地理学、生命科学等方面的专家通过联合攻关,在农业生产方式转型、农村产业融合发展、农村土地制度改革、城乡人居环境整治、生态补偿和生态产品价值实现等方面形成了系列的技术标准和政策体系。通过不断健全和完善农业可持续发展导向的法律法规,践行生态农业理念,提升农业产业链纵向协作紧密程度,加强跨区域和跨部门的合作,重视农业人力资本培育,提高农业科技水平,权衡和协同人类活动提高农业发展的韧性,从而减缓和适应全球气候变化,促进农业可持续发展<sup>[29,37,57,59]</sup>。

## 2 全球气候变化下农业可持续发展的交叉研究需求

全球气候变化下的农业可持续发展研究具有典型的学科交叉性、知识综合性和科学前沿性,通过学科合作、交叉研究和跨学科发展,能够把握全球气候变化的历史、现状和趋势,加深对新形势下农

业可持续发展的理解。在“地球命运共同体”和“人类命运共同体”的先进思想和理念下,本研究通过提炼应对全球气候变化的农业智慧,探索农业可持续发展的全球治理路径,促进系统性、前瞻性的交叉学科体系建设,培育推动全球气候变化下农业可持续发展的高质量人才。全球气候变化下的农业可持续发展研究融合农学、工学、理学、管理学、地理

学、经济学、生态学等多学科的理论和方法,以“评估状态-机理探索-路径优化”为主线,主要涉及全球气候变化下的农业资源开发和利用、耕地保护和粮食安全体系、农业生态安全格局和发展模式转型、农业可持续发展的战略规划以及应对全球气候变化的农业可持续发展策略5个方面的交叉研究内容(图2)。

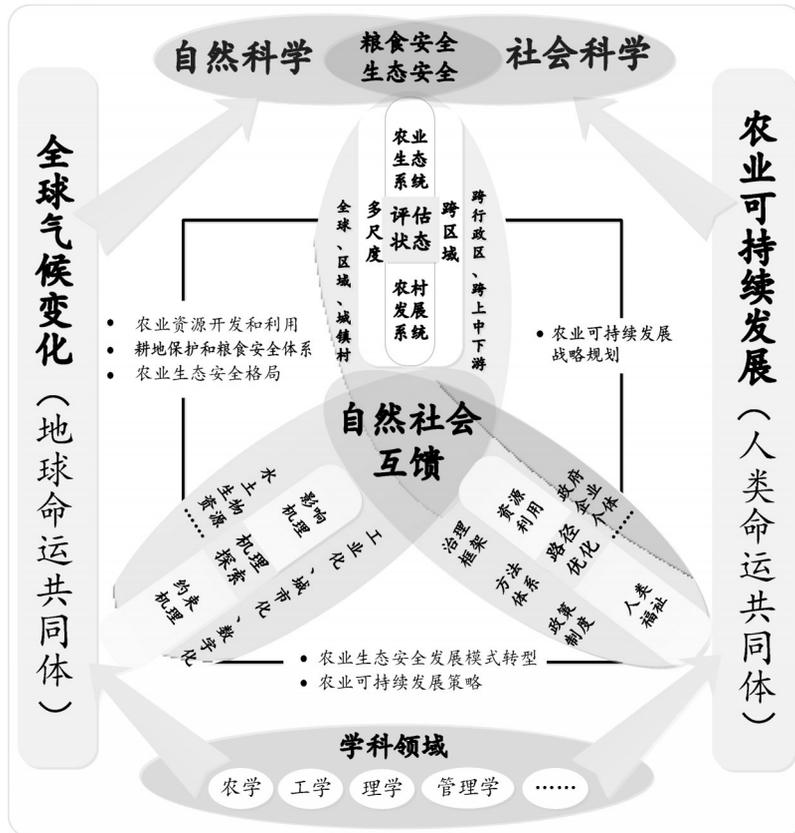


图2 全球气候变化下农业可持续发展交叉研究内容体系

Fig.2 The cross-research content system of agricultural sustainable development under the global climate change

2.1 全球气候变化下农业资源开发和利用

农业资源开发和利用是农业可持续发展的基础,主要研究以全球气候变化所带来的地球系统功能在大气圈、水圈、土壤圈和生物圈中要素、过程和关系变化为基本条件,重点探索全球气候变化对农业发展的资源性约束机制,以及农业资源开发和利用效率、效益和效能提升路径。具体的交叉研究内容包括全球气候变化下的水土保持和土壤质量提升、全球气候变化下的农业水资源利用和水环境保护、全球气候变化下的农业种质资源的评价、保存和创新开发利用和全球气候变化下的乡村治理模式等内容。

2.2 全球气候变化下耕地保护和粮食安全体系

气候变化对耕地和粮食安全的影响是广泛的,主要研究农业生产力的改变对耕地数量和质量需求

的影响,气候变化下农业种植空间的空间分布变化,极端气候事件带来的粮食供应链和产业链的波动,以及气候变化对粮食“生产-运输-储存-消费”等生命周期环节的影响。具体的交叉研究内容包括全球气候变化对粮食安全的综合影响、面向粮食安全的现代种业全产业链、面向粮食安全的耕地保护技术体系、应对全球气候变化的粮食产业链供应链优化和应对全球气候变化的农业种植空间优化等内容。

2.3 全球气候变化下农业生态安全格局和发展模式转型

农业生态安全格局和发展模式转型是农业可持续发展的重要手段,需要评估全球气候变化对土壤保持、水循环、生物多样性保护等方面的综合影响,探究气温、降雨等气候变化对农业资源环境和生态

系统的影响机制,从农业生产、畜禽养殖、农村建设等多个维度探究全球气候变化背景下的减排路径,优化不同尺度的农业生态安全格局,形成农业发展绿色转型模式。具体的交叉研究内容包括全球气候变化下“大气-水文-生态”循环的响应、全球气候变化对农业资源环境的影响机制、全球气候变化下的农业生物多样性保护、绿色、低碳和智慧型农业发展和应对全球气候变化的农业生态格局优化模式。

#### 2.4 全球气候变化下农业可持续发展策略

在全球气候变化的宏观背景下,探索农业可持续发展策略需要面向保护陆地和生物、消除饥饿、贫困和不平等、促进可持续消费和生产等与农业相关的联合国可持续发展目标。基于全球气候变化下农业系统的“自然-社会”耦合和互馈机制,评估农业资源资产的开发利用效率、效益和效能,从利用方式、组织形式、技术体系和制度体系等多个方面探索应对全球气候变化的农业可持续发展策略。具体交叉研究包括农业资源资产开发利用的效率、效益和效能、全球气候变化下的农业可持续发展的科技创新、全球气候变化下的农业可持续发展的管理创新、全球气候变化下的农业可持续发展的制度政策体系等方面的内容。

#### 2.5 全球气候变化下农业可持续发展的战略规划

形成应对全球气候变化的农业可持续发展的战略规划需要进一步聚焦全球可持续发展目标和国家现代农业发展的重大战略需求。通过对全球气候变化下农业可持续发展的现状与问题进行深入剖析,对未来发展领域进行展望,凝练新兴学科发展方向,并从打破治理壁垒、创新组织模式、强化资源汇聚等方面,探索建立既有利于学科交叉融合发展,又面向国家需求和成果转化,符合交叉研究特点和规律的体制机制以及高质量内涵发展路径。具体交叉研究包括:一是系统探索全球气候变化背景下农业可持续发展的前沿交叉学科领域;二是研究制定全球气候变化下农业可持续发展的政策引导与支持体系,包括财政激励、法规制定、国际合作机制等;三是创新全球气候变化下农业可持续发展治理模式,推动建立多元共治、协同高效的农业治理体系。

### 3 全球气候变化下农业可持续发展学科交叉研究展望

面向国家乡村振兴和生态文明等重大战略需

求,立足全球粮食安全、生态安全和可持续发展目标,开展全球气候变化下农业可持续发展的交叉研究能够全面洞悉全球气候变迁的过往脉络、当前状态及未来走向,进而深化对现代农业如何在复杂多变环境中实现可持续发展的认知与评估。

未来建议重点从全球气候治理、农食系统转型、城乡气候韧性、智慧农林系统以及自然资源利用与生态系统保护等交叉研究方向入手构建全球气候变化下农业可持续发展的交叉学科研究体系(图3)。其中,在全球气候治理交叉研究方向,建议以气候变化、可持续发展、治理、社会公平、碳汇交易等主要关键词,加强公共管理与农林经济管理、社会学、大气科学、管理科学与工程等学科的交叉研究;在农食系统转型的交叉研究方向上,建议以气候变化、农业、食品营养、健康、安全等为关键词,加强食品科学与工程和作物学、畜牧学、农业资源与利用、地理学、地球系统科学等学科的交叉研究;在城乡气候韧性交叉研究方向,建议以气候变化、城乡融合、空间规划、安全韧性等为关键词,加强地理学与公共管理、生物学、建筑学、林学等学科的交叉研究;在智慧农林系统交叉研究方向,建议以农业设施、林业工程、智慧农业、机械化、自动化等为关键词,加强农业工程、林业工程与计算机科学与技术、作物学、环境科学与工程、林学等学科的交叉研究;在自然资源利用交叉研究方向,建议以土地资源、水资源、能源、人类社会经济活动等为关键词,加强农业资源利用与生物学、农林经济管理、公共管理、地理学等学科的交叉研究;在生态系统保护交叉研究方向,建议以生物多样性、森林保护、陆域、水域、海洋、大气等为关键词,加强生物学与地理学、大气科学、林学、农林经济管理等学科的交叉研究。通过一级学科之间的深度融合和协同作用,挖掘并整合跨领域的农业智慧,共同探索气候变化对农业生态系统、经济模式及政策制定的深远影响,提出综合性的解决方案,以应对全球气候挑战,开辟出一条通往农业可持续发展的全球合作与治理新航道。打造多学科联合科研攻关和产学研协同育人的机制,培养具备跨学科视野、创新能力和实践经验的复合型人才,推进优势互补的交叉研究范式。

另外,全球气候变化下的农业可持续发展需要通过学科群、交叉学科、跨学科融合的方式解决系列前瞻性和系统性的研究问题,在识别重大交叉研究问题的基础上,通过自上而下的规划方案和制度政

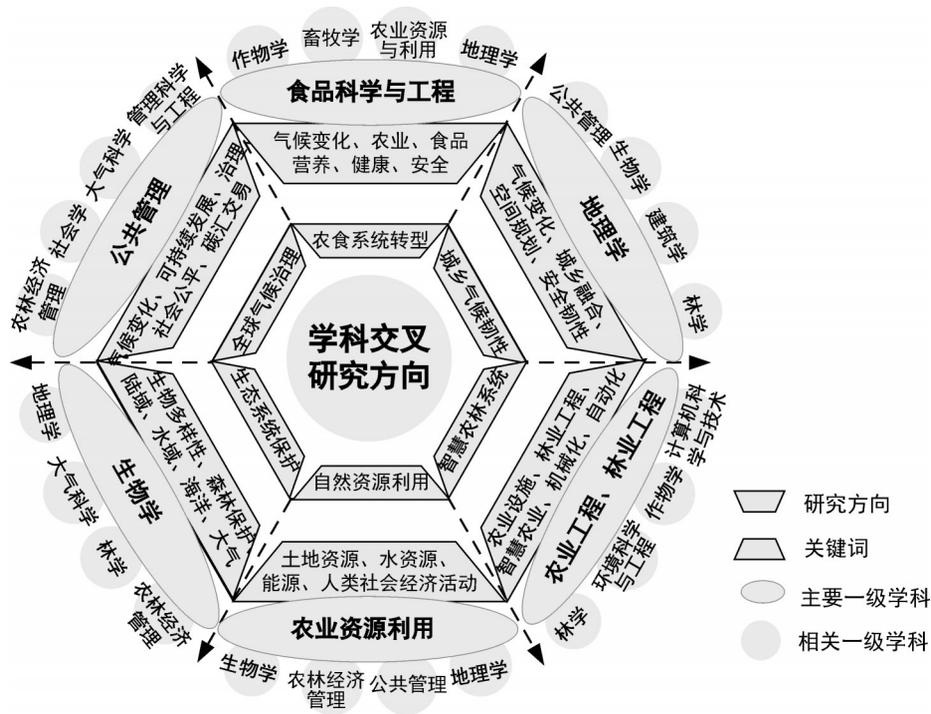


图3 全球气候变化下农业可持续发展的交叉学科研究体系

Fig.3 Interdisciplinary research system of agricultural sustainable development under global climate change

策,和自下而上研究学者自发性的互动、交流与合作,推进全球气候变化下的农业可持续发展的学科交叉研究和交叉学科建设。同时需要在政府、企业等多元社会主体的共同参与下开展,将基础研究、应用推广与教学和产业创新相结合。全球气候变化对农业自然资源的开发和利用,农产品的生产、分配、交换和消费等均产生了巨大冲击,同时也给农业农村部、自然资源部和相关企业的工作带来了新的挑战,政产学研协同下的交叉研究和战略合作能够实现优势互补,多方共同发力解决理论和实际相结合的问题。最后,全球气候变化下的农业可持续发展与气候变化、农业、资源环境、可持续发展、全球治理等科技知识的产生、发展、传播和应用密切相关,我国不同地区、不同阶段的农业可持续发展问题不尽相同,国内外丰富的理论和实证经验分享能够拓展科技工作者的思路和方法,强化科技知识共享导向下的国内外合作交流能够从宏观上提高解决农业可持续发展的重大问题的效率,推进全球可持续发展战略的实施,从微观上能够提高地区社会经济发展和人类福祉。同时我国农耕文明历史悠久,近年来智慧农业和生态农业取得较大进展,推进的全球气候变化下的农业可持续发展研究有利于在国际平台上分享中国农业发展经验,在国际舞台上讲好我国

学科交叉体系下的农业可持续发展故事。

### 4 结论

本文通过系统梳理全球气候变化背景下农业可持续发展的最新研究成果,深入剖析了当前领域内的学科交叉研究热点与趋势,提炼并归纳了5个目前的交叉研究需求,即农业资源的开发与利用策略优化、耕地保护与粮食安全体系的强化、农业生态安全格局的重构与发展模式转型的探讨、全球气候变化视角下的农业可持续发展策略,以及长远战略规划的构建。在此基础上,对未来全球气候变化背景下农业可持续发展的学科交叉研究进行了前瞻性的展望,总结了全球气候治理、农食系统转型、城乡气候韧性、智慧农林系统以及自然资源利用与生态系统保护等交叉研究方向及其对应的一级学科交叉体系。

### 参考文献 References

[1] TIAN H Q, XU R T, CANADELL J G, et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks[J]. Nature, 2020, 586(7828): 248-256.

[2] 傅伯杰, 张军泽. 全球及中国可持续发展目标进展与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 804-808. FU B J, ZHANG J Z. Progress and challenges of sustainable development goals

- (SDGs) in the world and in China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(5): 804-808 (in Chinese with English abstract).
- [3] 高鹏, 刘燕妮. 我国农业可持续发展水平的聚类评价: 基于2000—2009年省域面板数据的实证分析[J]. *经济学家*, 2012(3): 59-65. GAO P, LIU Y N. Cluster evaluation of China's agricultural sustainable development level: empirical analysis based on provincial panel data from 2000 to 2009 [J]. *Economist*, 2012(3): 59-65 (in Chinese).
- [4] ZHENG Q M, HA T, PRISHCHEPOV A V, et al. The neglected role of abandoned cropland in supporting both food security and climate change mitigation [J/OL]. *Nature communications*, 2023, 14(1): 6083 [2024-07-08]. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41837-y>.
- [5] CHEN C, WEN Z G, SHENG N, et al. Uneven agricultural contraction within fast-urbanizing urban agglomeration decreases the nitrogen use efficiency of crop production [J/OL]. *Nature food*, 2024, 5(5): 390-401 [2024-07-08]. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00980-5>.
- [6] 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.
- [7] REZAEI E E, WEBBER H, ASSENG S, et al. Climate change impacts on crop yields [J]. *Nature reviews earth & environment*, 2023, 4: 831-846.
- [8] GRIGGS D, STAFFORD-SMITH M, GAFFNEY O, et al. Policy: sustainable development goals for people and planet [J]. *Nature*, 2013, 495(7441): 305-307.
- [9] 沈彦俊, 胡春胜, 张喜英, 等. 生态学长期研究促进资源高效利用和区域农业可持续发展[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(6): 648-655. SHEN Y J, HU C S, ZHANG X Y, et al. Long-term ecological research (LTER) promotes natural resources use efficiency and agricultural sustainable development in North China Plain [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(6): 648-655 (in Chinese with English abstract).
- [10] SACHS J D, SCHMIDT-TRAUB G, MAZZUCATO M, et al. Six transformations to achieve the sustainable development goals [J]. *Nature sustainability*, 2019, 2: 805-814.
- [11] ZHU P, BURNEY J, CHANG J F, et al. Warming reduces global agricultural production by decreasing cropping frequency and yields [J]. *Nature climate change*, 2022, 12: 1016-1023.
- [12] 金晓斌, 梁鑫源, 韩博, 等. 面向中国式现代化的耕地保护学理解析与地理学支撑框架[J]. *经济地理*, 2022, 42(11): 142-150. JIN X B, LIANG X Y, HAN B, et al. Theoretical analysis and geographical support framework of cultivated land protection for Chinese-style modernization [J]. *Economic geography*, 2022, 42(11): 142-150 (in Chinese).
- [13] BARDGETT R D, BULLOCK J M, LAVOREL S, et al. Combatting global grassland degradation [J]. *Nature reviews earth & environment*, 2021, 2: 720-735.
- [14] LEWIS S L, WHEELER C E, MITCHARD E T A, et al. Regenerate natural forests to store carbon [J]. *Nature*, 2019, 568: 25-28.
- [15] 张浩, 冯淑怡, 曲福田. “权释”农村集体产权制度改革: 理论逻辑和案例证据[J]. *管理世界*, 2021, 37(2): 81-94. ZHANG H, FENG S Y, QU F T. Reform of rural collective property rights system: theoretical explanation and case evidence [J]. *Journal of management world*, 2021, 37(2): 81-94 (in Chinese with English abstract).
- [16] TSENG T W J, ROBINSON B E, BELLEMARE M F, et al. Influence of land tenure interventions on human well-being and environmental outcomes [J]. *Nature sustainability*, 2021, 4: 242-251.
- [17] 赵春江, 李瑾, 冯献. 面向2035年智慧农业发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(4): 1-9. ZHAO C J, LI J, FENG X. Development strategy of smart agriculture for 2035 in China [J]. *Strategic study of CAE*, 2021, 23(4): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- [18] REN C C, ZHOU X Y, WANG C, et al. Ageing threatens sustainability of smallholder farming in China [J]. *Nature*, 2023, 616(7955): 96-103.
- [19] 李原园, 曹建廷, 黄火键, 等. 国际上水资源综合管理进展[J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 127-137. LI Y Y, CAO J T, HUANG H J, et al. International progresses in integrated water resources management [J]. *Advances in water science*, 2018, 29(1): 127-137 (in Chinese with English abstract).
- [20] WANG M R, JANSSEN A B G, BAZIN J, et al. Accounting for interactions between sustainable development goals is essential for water pollution control in China [J/OL]. *Nature communications*, 2022, 13(1): 730 [2024-07-08]. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28351-3>.
- [21] 柯奇画, 张科利. 基于文献计量的中国水土流失尺度效应研究进展[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1489-1498. KE Q H, ZHANG K L. Scale effect on water and soil loss in China: a bibliometric analysis [J]. *Ecology and environmental sciences*, 2022, 31(7): 1489-1498 (in Chinese with English abstract).
- [22] BORRELLI P, PANAGOS P, ALEWELL C, et al. Policy implications of multiple concurrent soil erosion processes in European farmland [J]. *Nature sustainability*, 2023, 6: 103-112.
- [23] 孙桂阳, 张国言, 董元杰. 不同来源农业废弃物堆肥进程与产品肥效研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 349-360. SUN G Y, ZHANG G Y, DONG Y J. Composting process of agricultural wastes from different sources and fertilizer efficiency of their products [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2021, 35(4): 349-360 (in Chinese with English abstract).
- [24] HE M J, XU Z B, HOU D Y, et al. Waste-derived biochar for water pollution control and sustainable development [J]. *Nature reviews earth & environment*, 2022, 3: 444-460.
- [25] 陈伟生, 关龙, 黄瑞林, 等. 论我国畜牧业可持续发展[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(2): 135-144. CHEN W S, GUAN L,

- HUANG R L, et al. Sustainable development of animal husbandry in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(2): 135-144 (in Chinese with English abstract).
- [26] 郑怀国, 赵静娟, 秦晓婧, 等. 全球作物种业发展概况及对我国种业发展的战略思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 45-55. ZHENG H G, ZHAO J J, QIN X J, et al. Overview of the global crop seed industry and strategic thinking on its development in China[J]. Strategic study of CAE, 2021, 23(4): 45-55 (in Chinese with English abstract).
- [27] 贾冠清, 刁现民. 中国谷子种业创新现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2022, 55(4): 653-665. JIA G Q, DIAO X M. Current status and perspectives of innovation studies related to foxtail millet seed industry in China[J]. Scientia agricultura sinica, 2022, 55(4): 653-665 (in Chinese with English abstract).
- [28] 方师乐, 黄祖辉. 新中国成立70年来我国农业机械化的阶段性演变与发展趋势[J]. 农业经济问题, 2019, 40(10): 36-49. FANG S L, HUANG Z H. 70th anniversary of the founding of the PRC: the transition, influence factor and trend of China's agricultural mechanization[J]. Issues in agricultural economy, 2019, 40(10): 36-49 (in Chinese with English abstract).
- [29] ZHU X C, CHEN J, HUANG S, et al. Manure amendment can reduce rice yield loss under extreme temperatures[J/OL]. Communications earth & environment, 2022, 3: 147 [2024-07-08]. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00481-y>.
- [30] 谢贤鑫, 陈美球. 农户生态耕种采纳意愿及其异质性分析: 基于TPB框架的实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1185-1196. XIE X X, CHEN M Q. Farmers' willingness to adopt ecological farming and their heterogeneity: based on the TPB framework [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1185-1196 (in Chinese with English abstract).
- [31] 孙文华, 陆岷峰. 促进共同富裕: 搭建针对新型农业经营主体的普惠金融体系[J]. 当代经济研究, 2024(3): 116-128. SUN W H, LU M F. Promote common prosperity: build an inclusive financial system for new agricultural business entities[J]. Contemporary economic research, 2024(3): 116-128 (in Chinese with English abstract).
- [32] 苏布达, 孙赫敏, 李修仓, 等. 气候变化背景下中国陆地水循环时空演变[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1096-1105. SU B D, SUN H M, LI X C, et al. Impact of climate change on terrestrial water cycle in China[J]. Transactions of atmospheric sciences, 2020, 43(6): 1096-1105 (in Chinese with English abstract).
- [33] 么嘉棋, 常免宇, 王梦然, 等. 新一代水文水资源监测卫星SWOT数据特征、应用与展望[J]. 地球科学进展, 2024, 39(4): 374-390. YAO J Q, CHANG H Y, WANG M R, et al. Characteristics, application, and prospects of a new generation hydrological and water resources monitoring satellite: SWOT [J]. Advances in earth science, 2024, 39(4): 374-390 (in Chinese with English abstract).
- [34] 李玉强, 陈云, 曹雯婕, 等. 全球变化对资源环境及生态系统影响的生态学理论基础[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 603-612. LI Y Q, CHEN Y, CAO W J, et al. Theoretical basis of ecology for the influence of global change on resources, environment, and ecosystems [J]. Chinese journal of applied ecology, 2022, 33(3): 603-612 (in Chinese with English abstract).
- [35] 马柱国, 符淙斌, 周天军, 等. 黄河流域气候与水文变化的现状及思考[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 52-60. MA Z G, FU C B, ZHOU T J, et al. Status and ponder of climate and hydrology changes in the Yellow River Basin [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 52-60 (in Chinese with English abstract).
- [36] XU W H, WANG G Q, LIU S D, et al. Globally elevated greenhouse gas emissions from polluted urban rivers [J]. Nature sustainability, 2024, 7: 938-948.
- [37] CUI J L, ZHANG X M, REIS S, et al. Nitrogen cycles in global croplands altered by elevated CO<sub>2</sub> [J]. Nature sustainability, 2023, 6: 1166-1176.
- [38] XU Z C, CHEN X Z, LIU J G, et al. Impacts of irrigated agriculture on food-energy-water-CO<sub>2</sub> nexus across metacoupled systems [J/OL]. Nature communications, 2020, 11(1): 5837 [2024-07-08]. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19520-3>.
- [39] CAI S Y, ZHAO X, PITTELKOW C M, et al. Optimal nitrogen rate strategy for sustainable rice production in China [J]. Nature, 2023, 615(7950): 73-79.
- [40] GU W Y, MA G S, WANG R, et al. Climate adaptation through crop migration requires a nexus perspective for environmental sustainability in the North China Plain [J]. Nature food, 2024, 5(7): 569-580.
- [41] XIAO L J, WANG G C, WANG E L, et al. Spatiotemporal co-optimization of agricultural management practices towards climate-smart crop production [J]. Nature food, 2024, 5(1): 59-71.
- [42] ZUO C C, WEN C, CLARKE G, et al. Cropland displacement contributed 60% of the increase in carbon emissions of grain transport in China over 1990-2015 [J]. Nature food, 2023, 4(3): 223-235.
- [43] 牛书丽, 陈卫楠. 全球变化与生态系统研究现状与展望[J]. 植物生态学报, 2020, 44(5): 449-460. NIU S L, CHEN W N. Global change and ecosystems research progress and prospect [J]. Chinese journal of plant ecology, 2020, 44(5): 449-460 (in Chinese with English abstract).
- [44] 刘玉洁, 葛全胜, 戴君虎. 全球变化下作物物候研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 14-24. LIU Y J, GE Q S, DAI J H. Research progress in crop phenology under global climate change [J]. Acta geographica sinica, 2020, 75(1): 14-24 (in Chinese with English abstract).
- [45] CAI W J, WANG R, ZHANG S H. Efficient food systems for

- greater sustainability[J].*Nature food*,2023,4(7):541-542.
- [46] ZHOU Z H, WANG C K, LUO Y Q. Meta-analysis of the impacts of global change factors on soil microbial diversity and functionality [J/OL]. *Nature communications*, 2020, 11 (1) : 3072 [2024-07-08]. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16881-7>.
- [47] 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.
- [48] BALDRIAN P, LÓPEZ-MONDÉJAR R, KOHOUT P. Forest microbiome and global change [J]. *Nature reviews microbiology*, 2023, 21(8) : 487-501.
- [49] 丁声俊.“大国粮安”视域下加强生物安全保障体系建设研究 [J]. *中州学刊*, 2022(1) : 21-28. DING S J. Study on the biological security of China from the perspective of food security [J]. *Academic journal of Zhongzhou*, 2022(1) : 21-28 (in Chinese with English abstract).
- [50] OUTHWAITE C L, MCCANN P, NEWBOLD T. Agriculture and climate change are reshaping insect biodiversity worldwide [J]. *Nature*, 2022, 605(7908) : 97-102.
- [51] BONILLA-CEDREZ C, STEWARD P, ROSENSTOCK T S, et al. Priority areas for investment in more sustainable and climate-resilient livestock systems [J]. *Nature sustainability*, 2023, 6 : 1279-1286.
- [52] LIU W H, ZHOU J X, MA Y C, et al. Unequal impact of climate warming on meat yields of global cattle farming [J/OL]. *Communications earth & environment*, 2024, 5 : 65 [2024-07-08]. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01232-x>.
- [53] RAHIMI J, MUTUA J Y, NOTENBAERT A M O, et al. Heat stress will detrimentally impact future livestock production in East Africa [J]. *Nature food*, 2021, 2(2) : 88-96.
- [54] VON JEETZE P J, WEINDL I, JOHNSON J A, et al. Projected landscape-scale repercussions of global action for climate and biodiversity protection [J/OL]. *Nature communications*, 2023, 14 (1) : 2515 [2024-07-08]. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38043-1>.
- [55] LAURETT R, PAÇO A, MAINARDES E W. Sustainable development in agriculture and its antecedents, barriers and consequences: an exploratory study [J]. *Sustainable production and consumption*, 2021, 27 : 298-311.
- [56] 邵超峰, 陈思含, 高俊丽, 等. 基于SDGs的中国可持续发展评价指标体系设计 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(4) : 1-12. SHAO C F, CHEN S H, GAO J L, et al. Design of China's sustainable development evaluation index system based on the SDGs [J]. *China population, resources and environment*, 2021, 31(4) : 1-12 (in Chinese with English abstract).
- [57] 王圣云, 林玉娟. 中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素: 水足迹与灰水足迹视角 [J]. *地理科学*, 2021, 41(2) : 290-301. WANG S Y, LIN Y J. Spatial evolution and its drivers of regional agro-ecological efficiency in China's from the perspective of water footprint and gray water footprint [J]. *Scientia geographica sinica*, 2021, 41(2) : 290-301 (in Chinese with English abstract).
- [58] 黄季焜, 解伟, 盛誉, 等. 全球农业发展趋势及2050年中国农业发展展望 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(1) : 29-37. HUANG J K, XIE W, SHENG Y, et al. Trends of global agriculture and prospects of China's agriculture toward 2050 [J]. *Strategic study of CAE*, 2022, 24(1) : 29-37 (in Chinese with English abstract).
- [59] 曾晨, 邓祥征, 张安录. 国土空间优化与生态环境保护 [M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2021. ZENG C, DENG X Z, ZHANG A L. Ecological and environmental protection through land spatial optimization [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2021 (in Chinese).

## Review and interdisciplinary analysis of sustainable development of agriculture in context of global climate change

ZENG Chen<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Zhanhang<sup>1,2</sup>, KE Xinli<sup>1</sup>, LIU Wenping<sup>2,4</sup>, WANG Zhen<sup>2,5</sup>

1. *College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *Interdisciplinary Research Center for Territorial Spatial Governance and Green Development, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

3. *Department of Planning Development, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

4. *College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

5. *College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

**Abstract** Global climate change poses significant challenges to the sustainable development of agriculture worldwide. The domestic and international progress in three aspects including the sustainable development of agriculture, the impact of global climate change on the sustainable development of agriculture, and the human actions in response to global climate change for the sustainable development of agriculture were systematically reviewed based on the main topic of “Sustainable Development of Agriculture in the Context of Global Climate Change” and aimed at global food security and strategies for ecological security. The knowledge, methods, and tools from geography, management, agronomy, and economics were integrated based on the global goals of sustainable development. The contents of five interdisciplinary studies including the development and utilization of agricultural resources, the protection of farmland and food security systems, the transformation of patterns of agricultural and ecological security and models of development, strategies and strategic planning for the sustainable development of agriculture in the context of global climate change were proposed according to the interdisciplinary nature, comprehensive knowledge, and scientific frontiers of the main topic. The interdisciplinary research system of the sustainable development of agriculture in the context of global climate change was prospected from directions of interdisciplinary research including the governance of global climate, the transformation of agro-food system, the resilience of urban and rural climate, the system of smart agroforestry, the utilization of natural resources and the protection of ecosystem under the advanced ideas and concepts of “community of Earth destiny” and “community of human destiny”. It will provide reference for building an interdisciplinary studies and collaborative education model, and exploring the pathway of global governance for the sustainable development of agriculture.

**Keywords** global climate change; agriculture; sustainable development; interdisciplinarity studies

(责任编辑:陆文昌)