



中国农业碳减排政策、研究现状及展望

林 斌, 徐 孟, 汪笑溪

Mitigation of greenhouse gas emissions in China's agricultural sector: Current status and future perspectives

LIN Bin, XU Meng, and WANG Xiaoxi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20210843>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究

Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1269–1282

中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素

Measurement, spatial spillover and influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency in China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(10): 1762–1773

河南省农业生产碳汇的演变趋势及其集聚特征分析

Spatio-temporal evolution and agglomeration characteristics of agricultural production carbon sink in Henan Province

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1283–1290

中国农业氨排放的时空演变趋势与减排潜力分析

Space-time evolution of China's agricultural ammonia emission and emission reduction potential

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1257–1268

中国农业碳排放绩效评价及随机性收敛研究——基于SBM-Undesirable模型与面板单位根检验

Assessment of agricultural carbon emission performance and stochastic convergence in China using SBM-Undesirable model and panel unit root test

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(9): 1381–1391

现代烟草农业的碳效应核算与分析——以陕西省烟草合作社为例

Carbon effect of modern tobacco agriculture: Based on tobacco cooperatives in Shaanxi Province

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(12): 1903–1915



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20210843

林斌, 徐孟, 汪笑溪. 中国农业碳减排政策、研究现状及展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 500-515
LIN B, XU M, WANG X X. Mitigation of greenhouse gas emissions in China's agricultural sector: Current status and future perspectives[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 500-515

中国农业碳减排政策、研究现状及展望*

林斌[†], 徐孟[†], 汪笑溪^{**}

(浙江大学中国农村发展研究院 杭州 310058)

摘要: 中国正处在农业绿色转型与高质量发展的关键期, 减少农业温室气体排放对促进农业可持续发展及实现2060年碳中和有重要作用。本文在系统回顾近年来中国农业碳减排的相关政策与研究进展的基础上, 梳理了中国农业碳减排的治理结构。中国已初步形成农业碳中和的政策体系, 涵盖了农业减排固碳的主要方面, 但政策目标仍有待明确和细化, 且需进一步推动技术创新和提升资源利用效率。当前研究围绕低碳农业开展了大量实证和模型分析, 研究内容从农业碳排放测算逐步转向农业碳减排措施设计与效果评估、农业碳减排措施的实施与落实等方面。然而, 相关研究仍需进一步完善农业碳排放的核算, 并在考虑农业发展受到多目标制约的前提下综合评估农业碳减排措施的环境及社会经济影响。在农业碳减排的治理结构方面, 形成了以政府、市场和社会组织为治理主体与农户作为实施主体的农业碳减排治理框架, 但仍需加强中观和微观层面政策措施的制定, 并综合考虑治理主体和实施主体的协作互动, 通过直接和间接手段激发农户碳减排的积极性。本研究可为进一步制定农业碳减排政策措施和开展相关研究提供科学依据。

关键词: 碳中和; 温室气体排放; 碳减排; 政策效果评估; 低碳农业生产

中图分类号: X592

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Mitigation of greenhouse gas emissions in China's agricultural sector: Current status and future perspectives*

LIN Bin[†], XU Meng[†], WANG Xiaoxi^{**}

(China Academy for Rural Development, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Reduction of greenhouse gas (GHG) emissions in China's agricultural sector is essential to achieving carbon neutrality by 2060. China has been promoting the green transformation of its agricultural sector. This study systematically reviewed the policies and researches that are related to the reduction of GHG emissions in China's agricultural sector, and established a governance framework for guiding future research that focuses on emission reduction in agriculture. Our results showed that China's agriculture-related policies have already covered the main aspects of GHG emission reduction and carbon sequestration in the agricultural sector; however, technological innovation and resource use efficiency improvements should be further endorsed along with explicit policy targets. Among the existing literature, researches have focused on the estimation of agricultural GHG emissions to impact the evaluation of specific policies and measures. Future research on the improvement of agricultural GHG emission accounting and integrated

* 国家自然科学基金重点项目(72134006)、浙江大学生态文明计划、浙江大学-IFPRI中心项目(126000-541902)、国家社科基金重大项目(21&ZD091)资助

** 通信作者: 汪笑溪, 主要研究方向为农业经济学、食物系统、综合评估模型、气候变化影响及减缓等领域。E-mail: xiaoxi_wang@zju.edu.cn

† 共同第一作者: 林斌, 主要研究方向为农业生产率与环境效率分析、农业污染治理与绿色发展、气候变化减缓, E-mail: bin_lin@zju.edu.cn; 徐孟, 主要研究方向为农业面源污染治理, E-mail: mengxu@zju.edu.cn

收稿日期: 2021-11-28 接受日期: 2022-01-28

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (72134006), the Ecological Civilization Project of Zhejiang University, Zhejiang University-IFPRI Center (126000-541902), and the National Social Science Foundation of China (21&ZD091).

** Corresponding author, E-mail: xiaoxi_wang@zju.edu.cn

† Equivalent contributors

Received Nov. 28, 2021; accepted Jan. 28, 2022

assessment of emission reduction measures is needed. A governance framework for mitigating GHG emissions in agriculture has been identified in China, in which the government, market, and social organizations are the main governance entities, and the farmers are the implementation entities. Hence, to encourage farmers to reduce GHG emissions, the interactions between governmental entities and implementation entities should be considered when designing effective policies. This study summarized the current status of policies and research that are related to the mitigation of China's agricultural GHG emissions and provided future perspectives on policy design and research foci.

Keywords: Carbon neutrality; Greenhouse gas emissions; Carbon emission reduction; Policy impact evaluation; Low-carbon agricultural production

气候变化是当前社会面临的最为严峻的挑战之一, 给人类的生存与发展带来了严重的威胁^[1-2]。人类活动导致大气中温室气体浓度的增加是加剧全球气候变暖的主要根源^[3-4]。应对气候变化已成为全球共识, 被联合国列入可持续发展目标 (SDGs) 之一^[5]。发展低碳经济被世界各国一致认为是减少温室气体排放、缓解全球气候变暖的有效途径之一^[6-7]。为应对气候变化, 在 2003 年提出“低碳经济”概念之初, 中国就将节能减排与生态环境保护作为经济发展的主要任务^[8], 并在《巴黎协定》通过之前向世界做出减排承诺^[9]。中国深度参与和推动全球气候治理, 积极践行和落实《巴黎协定》, 在 2020 年气候雄心峰会上宣布提高国家自主贡献力度, 提出 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和目标, 同时将其纳入国家重大战略。2021 年 10 月相继发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030 年前碳达峰行动方案》, 提出在全面总体部署碳减排工作的同时细化重点领域和重点行业的实施方案, 形成碳达峰碳中和“1+N”政策体系助力碳减排, 体现了中国实现碳达峰碳中和的决心和信心。

农业部门因其兼具碳汇和碳源的双重属性在实现碳中和目标进程中发挥着重要作用^[5,9-10]。一方面, 农业利用农田、森林、草地等生态系统的光合作用进行生物固碳, 每年吸收全球约 30% 的人为碳源排放^[11-12], 相较于技术固碳, 生物固碳成本更低且更易大面积开展^[13-14]。另一方面, 农业生产活动引致的碳排放是温室气体排放的重要来源, 约占全球年均碳排放总量的 25%^[13-14]。农业部门的温室气体减排受到越来越多的关注和重视^[8], 并在中国国家自主贡献计划中发挥着积极的作用。根据《国家气候变化第二次两年更新报告》, 中国土地利用及变化在 2014 年贡献了约 11.51 亿 t 的碳汇, 相当于抵消了当年约 9% 的温室气体排放总量, 而当年中国农业部门产生的碳排放则占全年总量的 7%; 值得注意的是, 2014 年中国农业生产活动所产生的甲烷和氧化亚氮排放仍占全国甲烷和氧化亚氮总量的 40% 和 60%。这与

中国传统粗放的农业生产模式如农业化学品投入过量、农地利用方式转变频繁、农地资源利用过度、农业废弃物处理不当等^[9]紧密相关。因此, 在农业碳源方面, 推进农业绿色高质量发展具有不容小觑的减排潜力。

目前, 中国正处在农业绿色转型与高质量发展的关键期。农业部门在中国碳排放方面发挥举足轻重的作用, 厘清农业领域减碳增汇的相关政策措施, 分析低碳农业实现路径及其效果, 对于把握现阶段中国农业转型过程, 探索农业绿色发展路径具有重要意义, 同时可为推动实现碳达峰碳中和提供科学依据。鉴于此, 本文在碳达峰和碳中和的背景下, 对中国农业领域的相关政策措施进行系统梳理, 并从农业碳排放核算、农业碳减排措施与效果评估及农业碳减排措施的实践与落实等方面全面回顾和评析当前农业碳排放的相关实证研究, 从中归纳现有研究存在的问题, 进而提出未来研究展望和政策启示。

1 农业领域碳中和相关政策体系

尽管中国目前尚未出台专门针对实现农业碳中和的政策或法律法规, 但是, 在推进生态文明建设和农业绿色低碳发展转型过程中, 中国在减少农业化学品投入、禽畜管理、耕地管理、资源保护与废弃物资源化等方面已涵盖与农业碳减排相关的政策法规。为分析和探索农业碳中和政策的发展和改进潜力, 本部分将主要从综合性政策、农业碳减排和农业固碳 3 方面出发, 全面回顾梳理中国近期及早期促进农业碳中和实现的相关政策文件 (表 1)。

1.1 综合性政策

涉及农业碳减排的综合性政策措施可追溯到 2007 年, 为响应《联合国气候变化框架公约》, 《中国应对气候变化国家方案》应运而生, 并在农业碳减排和固碳方面提出了较为全面的技术和管理措施。2011 年, 国务院发布的《中国应对气候变化的政策与行动 (2011)》白皮书进一步强调“加快畜牧业生产方式转变”“启动实施土壤有机质提升补贴项目”及

表 1 中国农业碳减排相关法律政策文件

Table 1 Policies and regulations related to greenhouse gas (GHG) emission reduction in agricultural sector in China

类别 Category	领域/方面 Field	法律政策文件(发布时间) Documents (release time)
综合性政策 Integrated policies	全领域 Whole fields	《中国应对气候变化国家方案》(2007) China's National Climate Change Program (2007)
		《中国应对气候变化的政策与行动(2011)》(2011) Responding to Climate Change: China's Policies and Actions (2011)
		《“十三五”控制温室气体排放工作方案》(2016) The 13th Five-Year Plan for Controlling Greenhouse Gas Emissions (2016)
		《“十三五”节能减排综合工作方案》(2016) The 13th Five-Year Comprehensive Energy Conservation and Emission Reduction Work Plan (2016)
		《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》(2021) Opinions on the Complete, Accurate, and Comprehensive Implementation of the New Development Concept to Do a Good Job in Carbon Peak and Carbon Neutrality (2021)
	农业领域 Agricultural field	《2030年前碳达峰行动方案》(2021) Action Plan for Carbon Emission Peak Before 2030 (2021)
		《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》(2015) National Sustainable Agricultural Development Plan (2015–2030) (2015)
		《“十三五”农业农村科技创新专项规划》(2017) The 13th Five-Year Plan for Science and Technology Innovation in Agriculture (2017)
		《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》(2017) Opinions on Innovating System and Mechanism to Promote Agricultural Green Development (2017)
		《“十四五”全国农业绿色发展规划》(2021) The 14th Five-Year Plan of National Agricultural Green Development (2021)
农业碳减排 Measures for mitigating agricultural GHG emissions	投入品减量 Reduction of agricultural inputs	《到2020年化肥使用量零增长行动方案》(2015) Action Plan for Zero Growth in Chemical Fertilizer Use by 2020 (2015)
		《到2020年农药使用量零增长行动方案》(2015) Action Plan for Zero Growth in Pesticide Use by 2020 (2015)
		《建立以绿色生态为导向的农业补贴制度改革方案》(2016) Reformation Plan for Establishing a Green and Ecology Oriented Agricultural Subsidy System (2016)
		《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》(2017) Action Plan for Replacing Chemical Fertilizers by Organic Fertilizers in Fruits, Vegetables, and Tea Plantations (2017)
		《果菜茶有机肥替代化肥技术方案》(2017) Technology Schemes for Replacing Chemical Fertilizers by Organic Fertilizers in Fruits, Vegetables, and Tea Plantations (2017)
	循环利用 Recycling	《中华人民共和国循环经济促进法》(2008) Circular Economy Promotion Law of People's Republic of China (2008)
		《畜禽规模养殖污染防治条例》(2014) Regulation on the Prevention and Control of Pollution from Large-scale Breeding of Livestock and Poultry (2014)
		《中华人民共和国森林法》(1984) Forest Law of the People's Republic of China (1984)
		《中华人民共和国草原法》(1985) Grassland Law of the People's Republic of China (1985)
		《全国草原保护建设利用总体规划》(2007) National Grassland Protection and Construction Plan (2007)
农业固碳增汇 Measures for increasing carbon sequestration in agricultural sector	森林 Forest	《全国草原保护建设利用“十三五”规划》(2016) The 13th Five-Year National Grassland Protection and Construction Plan (2016)
		《关于加强草原保护修复的若干意见》(2021) Several Opinions on Strengthening Grassland Protection and Restoration (2021)
		《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030年)》(2017) Outline of the Black Soil Protection Plan in Northeast China (2017–2030) (2017)
		《全国高标准农田建设总体规划》(2013) National High-Standard Farmland Construction Plan (2013)
		《全国高标准农田建设规划(2021—2030年)》(2021) National High-Standard Farmland Construction Plan (2021–2030) (2021)
	农田 Farmland	《关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知》(2016) Notice on Promoting the Ecological Protection and Restoration of Landscape, Water, Forests, Farmland, and Lakes (2016)
		《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》(2020) Guideline for Ecological Protection and Restoration Projects of Landscape, Water, Forests, Farmland, Lakes, and Grassland (Trial) (2020)
		《全国草原保护建设利用“十三五”规划》(2016) The 13th Five-Year National Grassland Protection and Construction Plan (2016)
		《关于加强草原保护修复的若干意见》(2021) Several Opinions on Strengthening Grassland Protection and Restoration (2021)
		《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030年)》(2017) Outline of the Black Soil Protection Plan in Northeast China (2017–2030) (2017)
山水林田湖草系统治理 Systematic management of landscape, water, forests, farmland, lakes, and grassland	《全国高标准农田建设总体规划》(2013) National High-Standard Farmland Construction Plan (2013)	
	《全国高标准农田建设规划(2021—2030年)》(2021) National High-Standard Farmland Construction Plan (2021–2030) (2021)	
	《关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知》(2016) Notice on Promoting the Ecological Protection and Restoration of Landscape, Water, Forests, Farmland, and Lakes (2016)	
	《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》(2020) Guideline for Ecological Protection and Restoration Projects of Landscape, Water, Forests, Farmland, Lakes, and Grassland (Trial) (2020)	
	《全国草原保护建设利用“十三五”规划》(2016) The 13th Five-Year National Grassland Protection and Construction Plan (2016)	

“提高农田和草地碳汇”。由于大气污染物与温室气体同根同源,因此2015年修订通过的《中华人民共和国大气污染防治法》也将控制农业源的排放纳入减污降碳治理中。

随着对生态文明建设的重视,“十三五”时期是中国环境政策战略改革的加速期^[15],同时也是中国农业绿色发展全面启动并取得重大成果的时期^[16],这一阶段出台的减排政策目标更加明确,实施方案更加全面具体。2016年10月,国务院发布《“十三五”控制温室气体排放工作方案》,方案在明确全国碳减排目标的同时,细化了各产业和各区域的行动方案和um控制目标。针对农业领域,提出“要大力发展低碳农业,坚持减缓与适应协同,降低农业领域温室气体排放”,并对控制农田和畜禽温室气体排放提出了相关措施要求。在此基础上,各省(市、自治区)也相继出台地方层面的工作方案。2016年12月,《“十三五”节能减排综合工作方案》中农业领域主要从“推进农业农村节能”和“重视农业污染排放治理”方面提出了具体落实方案。2021年10月国务院相继发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030年前碳达峰行动方案》,明确了对碳达峰碳中和这项重大工作的综合部署和具体落实方案,其中在农业方面行动方案提出要“推进农业农村减排固碳”。

涉及低碳农业发展的综合性政策始于2015年的《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》,规划对未来农业的可持续发展进行了整体的宏观设计与布局,是中国农业可持续发展的纲领性文件。2017年,国务院办公厅印发了《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》,这是以党中央、国务院名义印发的第一个以农业绿色发展为主题的文件,绿色发展理念从此正式植入农业现代化进程^[9,17]。技术创新是农业低碳化的主要实现路径,在农业科技创新方面,2017年农业部印发的《“十三五”农业农村科技创新专项规划》涵盖了与农业碳排放源和碳汇相关的主要技术,并着力推进技术示范项目,为农业技术领域的减排固氮提供了重要指导。在农业绿色补贴方面,2016年,财政部、农业部联合印发《建立以绿色生态为导向的农业补贴制度改革方案》,方案强调以改革和完善现有补贴为切入点,在确保国家粮食安全和农民收入稳定增长的前提下,突出绿色生态导向,增量资金重点向资源节约型、环境友好型农业倾斜,促进农业结构调整,加快转变农业发展方式。随着中国在最新的《国家自主贡献》中

提出2060年碳中和目标,农业领域相关政策也更加强调碳中和的实现。2021年8月,农业农村部等6部门联合印发的《“十四五”全国农业绿色发展规划》是中国首部农业绿色发展专项规划,对“十四五”期间加快农业全面绿色转型和低碳发展做出了系统部署。规划提出“三加强、一打造”重点任务,即“加强农业资源保护利用,加强农业面源污染防治,加强农业生态保护修复,打造绿色低碳农业产业链”,为未来农业碳中和实现提供了有力指导与保障。

1.2 农业碳减排相关政策措施

在农业碳减排方面,中国政府已在化肥农药投入、畜禽粪便管理及废弃物循环利用方面先后出台了一系列政策法规,以降低农业生产对环境的负面影响。

中国的化肥减施政策改革涵盖了化肥供给端和需求端。在化肥供给端,实施取消化肥行业补贴政策,恢复化肥的普通商品属性,纠正化肥价格扭曲。2015年开始,相继取消了化肥生产流通领域的电价优惠、天然气价格优惠、铁路运输补贴、增值税补贴等优惠政策,取消和降低了主要化肥品种的出口关税。同时,完善了农业支持补贴,将补贴化肥生产改为补贴农民和农业生产。

在化肥需求端,2005年国家开始试点推广测土配方施肥技术,通过指导农户科学施肥,减少化肥的过量施用。2015年,农业部出台《到2020年化肥使用量零增长行动方案》,标志着中国化肥政策改革的全面开启。化肥零增长方案对施肥结构、施肥方式、肥料利用率提出了明确的目标,并针对区域差异提出了相应的技术实现路径。为深入开展化肥减量行动,农业部于2017年制定了《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》和《果菜茶有机肥替代化肥技术方案》,旨在减少化肥过量使用的同时,推进畜禽养殖废弃物等资源的循环利用,实现节本增效和提质增效。为引导激励农户使用有机肥,各地方政府推进有机肥补贴政策,对生产和使用有机肥按照施用面积大小和购买数量等进行一次性补贴。

农药使用的碳排放主要产生于农药生产制作过程,与农药减施相关的政策主要涉及2015年农业部发布的《到2020年农药使用量零增长行动方案》和2017年颁布的《农药管理条例》,其中提倡“通过推广生物防治、物理防治、先进施药器械等措施,逐步减少农药使用量”。此外,2016年开始,化肥农药使用强度被纳入生态文明建设目标评价考核办法及指标体系,与省级党政负责人的年度评价和五年

政绩考核结果相挂钩,进一步反映了化肥农药减量在国家环境治理中的重要性。

在畜禽粪污资源化利用和秸秆综合利用方面,2008年出台的《中华人民共和国循环经济促进法》第三十四条规定了农业资源的循环利用,明确提出了“对农作物秸秆、畜禽粪便、农产品加工业副产品、废农用薄膜等进行综合利用,开发利用沼气等生物质能源”。农业环境法方面,为了防治畜禽养殖污染,推进畜禽养殖废弃物的综合利用和无害化处理。2014年,国务院颁布《禽畜规模养殖污染防治条例》,这也是中国首个专门的农业环境保护类法律法规。在促进低碳农业方面,条例中规定了一系列扶持和鼓励措施。例如,规定了对废弃物利用予以税收优惠并享受农用电价格,利用废弃物进行沼气生产和发电的享受新能源优惠等。

1.3 农业固碳及土地保护相关政策措施

森林、草地和农田生态系统是农业的重要碳汇。尽管目前尚未实施全国性的专项碳汇政策,但中国一直高度重视森林、草地等生态系统的保护和修复,现有政策已涵盖对森林、草地和土壤等资源的保护,并强调统筹“山水林田湖草沙”一体化保护和系统治理,对于推动碳汇的增长发挥了重要作用。

在保护和合理利用森林资源、加快国土绿化和生态文明建设方面,《中华人民共和国森林法》发挥着重要作用。2019年新修订的森林法以建设生态文明为目标,将“绿水青山就是金山银山”和绿色发展的理念贯穿在整部法律中。天然林方面,开展天然林保护工程,2017年实现全面停止全国天然林商业性采伐。人工林方面,实施退耕还林补贴政策,2002年国务院发布《退耕还林条例》,并于2016年修订完善。

在草原保护方面,中国分别在1985年和2002年颁布和修订了《中华人民共和国草原法》,使得草原保护建设利用步入法制化轨道。2007年《全国草原保护建设利用总体规划》的发布以及2016年《全国草原保护建设利用“十三五”规划》的出台,对草原的生态功能包括涵养水源和固碳储氮的能力提出了更高的要求。2021年,国务院办公厅发布《关于加强草原保护修复的若干意见》,提出“到2025年,草原保护修复制度体系基本建立”。

农田保护方面,保护性耕作和高标准农田建设是增强耕地土壤固碳的重要措施。保护性耕作包括少/免耕、永久覆盖、多样性复合种植系统和综合养分管理系统,是增加耕地碳汇减排的主要路径^[18]。

2005年开始历年的中央一号文件均将发展保护性耕作作为重要内容。2017年,《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030年)》发布并提出“开展保护性耕作技术创新与集成示范”;2020年《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025年)》出台。同样地,中央一号文件多次提出加快高标准农田建设。《全国高标准农田建设总体规划》在2013年被首次提出。在“十二五”实践基础上,农业农村部发布《全国高标准农田建设规划(2021—2030年)》,继续推进新一轮高标准农田改造提升。高标准农田建设是提升国家粮食安全保障能力的重要措施,也有利于落实最严格的耕地保护制度并提升耕地质量。

在山水林田湖草系统管理方面,2016年印发的《关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知》,开启了国家山水林田湖生态保护修复工程试点工作;2017年,“草”的内容被补充纳入其中;十九大报告提出,“像对待生命一样对待生态环境,统筹山水林田湖草系统治理”。2020年,自然资源部、财政部、生态环境部联合印发《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》。《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》统筹推动林草事业高质量发展,提出“十四五”时期“森林覆盖率达到24.1%,草原综合植被盖度达到57%”的目标。

总体来看,中国已初步形成农业碳中和政策体系,涵盖了农业减排固碳的主要方面。从时间上来看,“十三五”时期是碳减排相关政策文件的主要形成期,减排目标逐步明确,减排范围扩展到各个领域;政策手段方面,采用了约束型和激励型政策相结合的方式。早期的政策法规为未来农业碳中和实现的系统文件和行动方案的制定奠定重要基础。但是,当前的政策规划仍存在目标任务有待明确、行动方案有待细化、很多政策并未真正落地等问题,同时对技术创新和资源利用效率的提升也没有给予足够的重视。由于农业农村的复杂性和农民的脆弱性,面向未来农业多目标的发展愿景下,如何平衡碳中和实现与粮食安全和社会目标也对现行的政策体系提出重要挑战。

2 农业碳减排研究框架体系

自低碳农业的概念被提出之后,农业碳排放问题受到广泛关注^[7],当前研究基本涵盖了农业领域碳中和相关政策体系中综合性政策、农业碳减排和农业固碳增汇政策中所涉及的政策措施,并取得了一系列研究成果^[3]。从现有文献的发展脉络来看,研究

的主要内容逐步从农业碳排放测算转向农业碳减排措施的设计及其效果评估, 以及农业碳减排措施的实施与落实等方面。

2.1 农业碳排放测度

关于农业碳排放的测度指标主要包括农业源碳排放^[19]、农业碳足迹^[20]、农业碳强度^[21-22]以及农业碳补偿^[23]等, 研究尺度主要包括全国层面和省际层面。王惠等^[19]基于中国31个省份2004—2012年农业投入产出面板数据, 全面测算了各省农业碳排放总量, 发现中国农业碳排放总量整体呈上升趋势, 且省际之间存在明显差异。黄祖辉等^[20]利用分层投入产出-生命周期法对2007年浙江省农业碳足迹进行测算, 发现按照政府间气候变化专门委员会(IPCC)方法计算的农业碳排放仅占农业实际总碳足迹的43.55%。田云等^[22]发现中国31个省份2002—2011年的农业碳强度均呈下降趋势, 但是省际之间的降幅差异较大。陈儒等^[23]通过对2007—2015年中国省域的碳补偿额度测算, 发现中国农业碳补偿整体呈上升趋势, 并且补偿额度逐年递增。随着研究的深入, 农业的碳源和碳汇均被证实具有空间聚集和空间溢出的特性^[24-26]。

具体到农业碳排放的来源, 大量研究从农业化学品投入、畜牧养殖和农业能源等方面展开讨论。Zhang等^[27]对中国氮肥生产使用生命周期中产生的温室气体排放量进行了测算, 发现在中国每生产1 t氮肥会排放13.5 t二氧化碳当量(CO₂-eq)的温室气体, 高于同期欧洲的9.7 t CO₂-eq排放水平。Kahrl等^[28]估算了2005年中国合成氮肥的温室气体排放因子为4.4%。还有学者测算了不同种类的肥料使用或牲畜饲养所产生的温室气体排放量差异, 如Wang等^[29]比较了不同类型肥料的温室气体排放量, 确定了碳酸氢铵、过磷酸钙和氯化钾是产生温室气体排放量最低的肥料, 采用这些肥料可使肥料引起的排放量减少49.15%。胡向东等^[30]对中国及各省畜禽温室气体排放的测算结果发现, 黄牛养殖产生的甲烷排放量最大, 而生猪养殖产生的氮氧化物排放量最大。

目前关于碳排放的核算方法主要包括生命周期法、投入产出分析法以及两者结合的投入产出-生命周期法^[20,31]。生命周期法通过界定产品从产出到成为废弃物各环节中直接和间接产生碳排放的活动, 以生命周期内的所有物质或活动的碳排放强度及其排放因子为依据, 自下而上地核算整体的碳排放^[20,31]。生命周期法的缺点在于界定系统边界时可能存在主

观性^[20], 并且由于涵盖系统生命周期内的所有环节, 所需数据量繁多, 易造成数据的遗漏。投入产出法是根据各阶段直接与间接的能源需求, 以能源排放因子为计算依据, 自上而下地推算温室气体排放量^[20]。这种方法主要局限于仅能测算农业生产中能源消耗所产生的碳排放, 并且由于中国投入产出表每5年更新一次, 无法及时准确反映农业碳排放的变化趋势。结合生命周期法和投入产出法提出的投入产出-生命周期法, 既保留了生命周期法的详细性, 又具有投入产出法的完整性^[32], 但是在农业领域的碳排放测算应用较少。

2.2 农业碳减排措施及其效果评估

2.2.1 农业碳减排措施研究

与农业碳减排政策一脉相承, 目前文献中关于减少碳排放的措施大多基于农业碳排放的来源展开研究。根据温室气体的类型可分为二氧化碳减排措施和非二氧化碳温室气体减排措施, 前者主要基于土地利用类型变化导致的二氧化碳减排以及退耕还林还草等增加的碳汇^[33]; 而后者则聚焦农业生产中化学品施用与残留、农业废弃物处理等产生的氧化亚氮减排, 反刍动物饲养与水稻(*Oryza sativa*)种植产生的甲烷减排以及畜禽粪便管理中产生的甲烷和氧化亚氮的减排^[34-35]。具体而言, 针对二氧化碳减排措施主要包括: 1) 限制森林砍伐^[5,36]; 2) 植树造林增加碳汇^[5,33]; 3) 保护性耕作提高碳吸收能力^[37]; 4) 使用生物质能源碳捕获和储存^[33,38-39]。对于农业非二氧化碳温室气体的减排主要通过改进农田管理和提高畜禽养殖管理来实现^[34-35,40-42]。改进农田管理通过推广土壤-作物综合管理技术、栽培与灌溉技术、测土配方技术、水肥一体化技术等技术措施, 以减少农业化学品的投入和提高农业资源的利用效率等^[35,41-46]; 针对畜禽养殖方面的减排对策则主要关注于通过规模化、集约化和标准化养殖提高畜禽生产效率以减少动物肠道发酵, 提高畜禽粪便管理效率, 促进粪肥回田^[1,40]。除此之外, 农业碳减排措施还包括发放绿色农业生产补贴、改变农业投入要素价格、市场监管、鼓励秸秆还田等^[34-35,47-48]。

此外, 通过改变食物需求倒逼农业生产也逐渐被列入温室气体减排的一项措施^[5,40,49], 其机理主要为通过改变消费者的行为和偏好来改变食物消费需求的结构和数量, 从而影响农产品的生产与加工, 降低供给过程中的温室气体排放。总体来看, 当前文献中主要措施包括: 1) 调整饮食结构, 降低肉类食物的摄入比例, 用植物蛋白代替动物蛋白^[5,40,49]; 2) 减少

食物损失和浪费^[5,40]。实证研究发现,价格机制以及健康饮食和按需消费的宣传教育能够有效改变消费者的行为偏好,影响食物需求的结构和数量^[50-51],进而促进碳减排。

2.2.2 农业碳减排措施效果评估

现有文献对上述相关措施的减排效果展开了大量实证研究。研究发现,减少森林砍伐并进行大规模的植树造林能够有效增加碳汇,可使农业部门从温室气体的排放源转换成碳汇的净来源。生物能源碳捕获和储存技术被证实具有明显的减排效果,其作用机理是通过捕获生物质燃烧过程中释放的碳并储存在地下,从而减少大气中温室气体含量。Humpenöder等^[33]预测,大规模植树造林能够使全球在 21 世纪末累计产生 7030 亿 t CO₂-eq 的碳汇,生物能源碳捕获和储存技术则可以累计储存 5910 亿 t CO₂-eq。农田固碳措施也具有一定的温室气体减排效应,研究发现生物炭能有效降低 9.94% 的二氧化碳排放^[37],也有研究表明生物炭添加剂能有效抑制旱地二氧化碳的排放^[52-54]。改进农田管理和畜禽养殖措施被证实在非二氧化碳温室气体减排方面具有显著的减排效应。Cui 等^[42]基于中国 452 个县农业推广试验站数据,发现改进农田管理每年可减施 120 万 t 氮肥,使玉米 (*Zea mays*)、水稻和小麦 (*Triticum aestivum*) 生产中的温室气体排放分别降低 22.0%、13.7% 和 21.0%。张靖等^[44]发现通过土壤-作物系统综合管理方法改进农田养分管理,可使在不改变氮肥施用的情况下减少 20% 的氮损失和氧化亚氮排放。测土配方、秸秆还田等技术的推广也对农业温室气体排放具有显著的抑制作用^[48,55-57]。此外,调整饮食结构与减少食物的损失和浪费均被证实可以有效减少农业温室气体排放。研究发现,牛肉、羊肉等红肉仅提供了全球 1% 的卡路里,却贡献了所有土地利用净排放量的 25%^[58]。因此,植物蛋白代替动物蛋白的措施受到学者们的广泛关注。Springmann 等^[49]采用 IMPACT 评估模型的研究发现,以植物类食物摄入为主的饮食方式可以使 2050 年的全球温室气体排放降低 56%; Poore 等^[59]利用生命周期法核算的结果也支持这一结论。Hu 等^[60]发现如果中国食物消费中的浪费和动物类消费的占比减少 10%,那么 2030 年农业生产导致的氧化亚氮排放将减少 12%。

与此同时,政策措施的协同效应也受到广泛关注。学者们发现农业碳减排措施可能对农产品价格、粮食产量、全要素生产率和土地利用强度等产生一定的影响。Humpenöder 等^[33]利用综合评估模型发

现,植树造林与生物质能源捕获和储存技术在增加碳汇的同时,会提高粮食价格。卜容燕等^[61]利用田间试验数据对比分析不同肥料对双季稻轮作系统的效应,发现施用有机肥不仅能有效降低稻田温室气体的排放强度,还能增加双季稻产量。孙磊等^[62]发现增效剂对玉米田的温室气体减排和产量的增长具有协同效应。秸秆还田也会降低土壤温室气体排放并提高作物产量^[63]。而基于食物需求的减排措施,可以有效缓解土地稀缺带来的生产成本上涨,降低农产品价格,同时减少农业温室气体排放^[5,40]。此外,提高农业研发投入也是实现温室气体减排、粮食增产和农业全要素生产率增长的有效途径^[64-65]。

现有文献对相关政策措施效果的评估方法,主要包含 4 种类型:统计性描述法、田间试验法、计量模型法和综合评估模型法。统计性描述法从现状变化层面描述政策措施实施前后的变化,进而分析政策效果^[66-68]。田间试验法基于田间试验的观测数据取样分析控制组和试验组的差异来评价农业碳减排措施的实施效果^[41-42,61-62]。实证模型法主要通过 Tobit 模型、Probit 模型、Logit 模型、倾向得分匹配模型 (PSM)、内生转换模型 (ESR)、结构方程模型 (SEM) 和双重差分法 (DID) 等^[55-57,69-76] 计量模型分析政策措施的效果。这种方法大多以二值选择的方式来衡量农户受政策措施影响的决策行为,多侧重于解释行为结果,对政策实施效果程度的评估以及政策影响行为的内在机制的挖掘不够深入。综合评估模型法采用综合评估模型从事前分析角度对政策措施的实施效果进行模拟预测,主流模型包括 MAGPIE 模型、GCAM 模型、GTAP 模型和 IMPACT 模型等^[5,39-40,49,64,77]。综合评估模型的优势在于可以分析两个及其以上的政策措施的叠加效果,同时可通过多个指标对政策措施进行多维度评价分析。

综合来看,关于中国农业碳排放核算、农业碳减排措施及效果评估的研究已取得一定的进展。农业碳排放核算逐步精确化,不仅涵盖全国层面和区域层面的测算,同时对农业化学品投入、畜牧养殖和农业能源等不同类型和种类的排放源也进行了探讨。但是受限于核算方法和核算成本问题,中国农业碳排放核算仍不够准确和全面。关于中国碳减排措施及效果的评估研究已较为丰富,基本涵盖了对农业领域碳中和相关政策体系中所涉及的政策措施的评估,但大多是基于田间试验的结果,而运用综合评估模型对农业碳减排的研究仍集中在全球层面,限于模型参数化问题,在中国农业领域的应用相

对不足。此外,围绕农业碳减排措施效果评估的研究,大多集中在对单一措施或多个措施的评估,缺乏对国家层面的宏观政策的综合效果的评估。

3 农业碳减排治理结构框架

农业碳减排的关键在于相关措施的有效落地^[78],

即农户是否进行低碳农业生产。本部分基于农业减排措施的实施主体和相关部门的关系,区分农业碳减排的实施主体(农户)和治理主体(政府、市场和社会组织),并构建农业碳减排治理结构框架(图 1),进一步分析影响低碳农业发展的主要因素,从而为农业减排措施的有效实施提供参考。

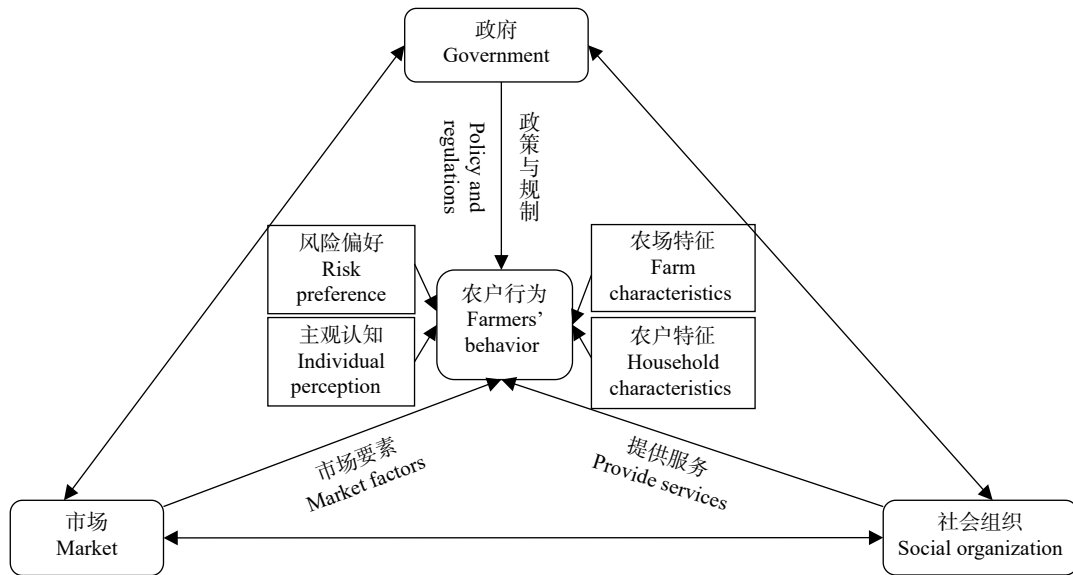


图 1 农业碳减排的治理结构框架

Fig. 1 Governance structure of mitigating greenhouse gas (GHG) emissions in agriculture

3.1 实施主体

农户是农业生产经营的主体,也是农业碳减排的实践主体^[79]。农户的科学生产显著影响低碳农业的发展,而农户的风险偏好和主观认知直接影响农户的低碳生产意愿和生产行为^[79]。其中,风险偏好是影响农户低碳农业生产行为的关键因素^[80-81],农户风险规避程度越高,越倾向于增加农用物资的投入以避免潜在的产量和收入损失^[82-83]。Liu 等^[84]通过对棉农 Bt 抗虫棉技术行为选择进行分析,发现风险规避程度越高的农户越倾向于推迟绿色新技术的采用。仇焕广等^[85]关于农户化肥施用行为的研究也得到了相似的结论。较高的风险规避程度是小规模农户的重要特征^[86],而小农户家庭经营是中国农业的基本特征。农户对生态环境的认知和感知是影响农户低碳生产行为的重要因素^[72,87-89]。研究发现,具有较强环境保护意识的农户更加积极地学习减排知识,同时更能认识到过量使用化肥农药对环境系统带来的危害,进而规范其生产行为^[90],对气候变化具有一定认知的农户也更倾向于采用低碳生产方式^[91]。此外,农户对生态环境和安全生产的关注度越高,对农业碳减排措施及其效果的认知更深刻,其生产行为的环

境安全性也会更高^[72]。除此之外,农户特征(性别、年龄、教育程度、生产经验等)、家庭特征(劳动力、兼业程度、收入水平等)以及农场特征(地理特征、农场规模、产业结构)也是影响农户进行低碳农业生产的重要因素^[3,23,92-97]。

3.2 治理主体

低碳生产的农户往往需要采取额外性措施,即为了实现碳减排而产生的超出农户原本农业资源保护义务要求的行为,这一行为措施的实施将增加农业生产成本,但增加的成本通常难以反映到农产品的价格中,使得农业碳减排行为产生的环境效益具有典型的正外部性^[98]。因此,通过政府、市场和社会组织的干预将农业减排固碳的正外部性内部化,能够有效推动农户低碳农业措施的落实。

3.2.1 政府

政府在农户实施农业减排措施方面发挥着主导作用,主要通过技术培训与推广、科技示范、财政补贴、政府监管等方式进行调控和引导^[55,69,75,99-100]。政府对农业减排政策的执行力度越强,提供的服务越全面,农户更有意愿采纳相应的减排措施^[81]。华春林等^[55]发现,参与测土配方培训的农户会减少施用

化肥 $22.67 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 并且小范围、更有针对性的技术培训的效果会更好。耿宇宁等^[75]发现生物防治技术的推广需要依靠政府通过科技示范和财政补贴的方式来实现。代云云等^[69]对山东、江苏、广东、辽宁 4 省蔬菜种植户的研究发现, 政府监管对农户绿色生产行为的影响十分显著, 并且优于组织和市场的调控效果。总体看来, 政府促进农户的低碳生产主要通过政策的激励和约束来实现。激励型政策和约束型政策都能显著促进农户的绿色生产行为, 但学者们对这两种政策影响农户低碳生产作用大小的看法不一。一些学者认为, 激励型政策作用大于约束型政策效果^[101]; 一些学者持相反的观点^[73]; 也有学者认为, 这两类政策仅仅是作用方式不同, 其效用不相上下^[102]。此外, 不同政策对农户生产行为的影响会因农户、地区以及政策执行的差异而存在显著的异质性^[73,103]。

3.2.2 市场

市场作为农业碳减排治理的重要组成部分, 主要通过市场要素的资源配置作用来影响农户的低碳生产行为, 对规范和约束农户生产行为十分关键^[104]。其中市场要素主要包括农资供给要素、农产品价格要素和市场信息要素。农业生产投入要素的价格是影响农户生产行为的直接因素, 农产品价格也会显著影响农户对农用物资的使用^[105-106]。Pemsl 等^[107]研究发现, 农业生产投入品的质量问题是农户施用过量农业化学品的重要原因。此外, 农户科学知识欠缺致使其在市场信息不对称的情况下盲目接受了来自逐利销售的推荐, 造成农业化学品的施用过度^[108-109]。市场机制在解决信息不对称问题方面起着至关重要的作用, 能够有效约束市场上的投机行为^[104]。占辉斌等^[110]认为农业生产中的市场激励和市场约束水平不足是中国农业污染的主要原因。Zhao 等^[111]论证了市场的激励机制对农户施药行为的作用效果显著优于政府和合作社的监督。在市场激励方面, 优质优价是主要的激励模式, 对保障农产品质量安全具有重要的作用^[112]。优质优价的利益诉求对农户规范农业化学品使用行为具有积极的影响, 溢价激励强度越大, 农户低碳生产的概率也就越大^[71,113]。另外, 声誉效应也会影响农户进行绿色生产^[114]。在市场约束方面, 实行最低质量标准的市场准入限制和质量安全可追溯体系在改善农产品质量安全方面发挥了有效的促进作用^[69,115]。罗小锋等^[104]发现, 激励型市场规制能促进水稻规模种植户施用生物农药, 而小农户的生物农药施用行为受约束型市场规制的影响。

3.2.3 社会组织

社会组织具有连结农户的天然属性和解决小农户与大市场的组织优势^[116], 对农业碳减排措施的实施具有重要的调节作用。研究表明, 合作社、企业以及签订生产和销售合同的各类产业化组织, 都有助于减少农户对农业化学品的使用^[117-118]。蔡荣等^[119]基于全国家庭农场监测数据的实证分析表明, 加入合作社能够使家庭农场的化肥和农药减量施用率分别提高 43.3% 和 43.7%。毛飞等^[120]的研究发现, 企业、商贩可通过收购标准影响农户对农药的选配, 所制定的标准越高, 农户绿色生产行为越规范。此外, 社会组织还可促进农户对低碳技术的采纳。研究表明, 社会组织能够通过信息技术共享、技术应用培训和农资统一采买等方式有效降低农户新技术采纳风险与使用成本, 提高社员对低碳农业技术的采纳^[121]。然而, 王常伟等^[71]基于江苏菜农的研究发现, 签订合同和参加合作社对农户过量使用农业化学品的行为不但没有起到抑制作用, 反而正向促进了菜农对农业化学品的使用, 这一点在史恒通等^[122]关于果农生产行为的研究中也得到了证实。可见, 社会组织对农户低碳农业生产行为的影响会因地区和研究对象不同而存在异质性。因此, 应深入挖掘社会组织影响农户低碳生产行为的内在机制, 同时考虑区域和农户差异化, 才能在农业碳减排问题上对症下药。

4 研究展望与政策启示

本文系统回顾了近年来与中国农业碳减排相关的政策发展及研究进展, 梳理归纳了农业碳排放的治理框架(图 2)。在政策措施制定方面, 中国已初步形成农业碳中和政策体系, 涵盖了国际和相关研究中农业减排固碳技术和措施的主要方面, 但政策目标仍有待明确和细化, 且需进一步推动技术创新和提升资源利用效率以应对农业多目标发展权衡的挑战。在治理主体和实施主体方面, 中国农业碳排放的治理主体主要包括政府、市场和社会组织, 他们一方面推动农业减排政策和措施的制定, 另一方面通过相关手段干预引导农户对减排措施的实施; 作为农业碳减排的实施主体, 农户的低碳行为还受其本身风险偏好、主观认知、家庭和农场特征等内部因素的影响。从政策制定与治理主体、实施主体的关系来看, 仍需加强中观和微观层面的政策措施的制定, 同时应综合考虑治理主体和实施主体之间的关系, 以直接和间接激发农户碳减排的积极性。从

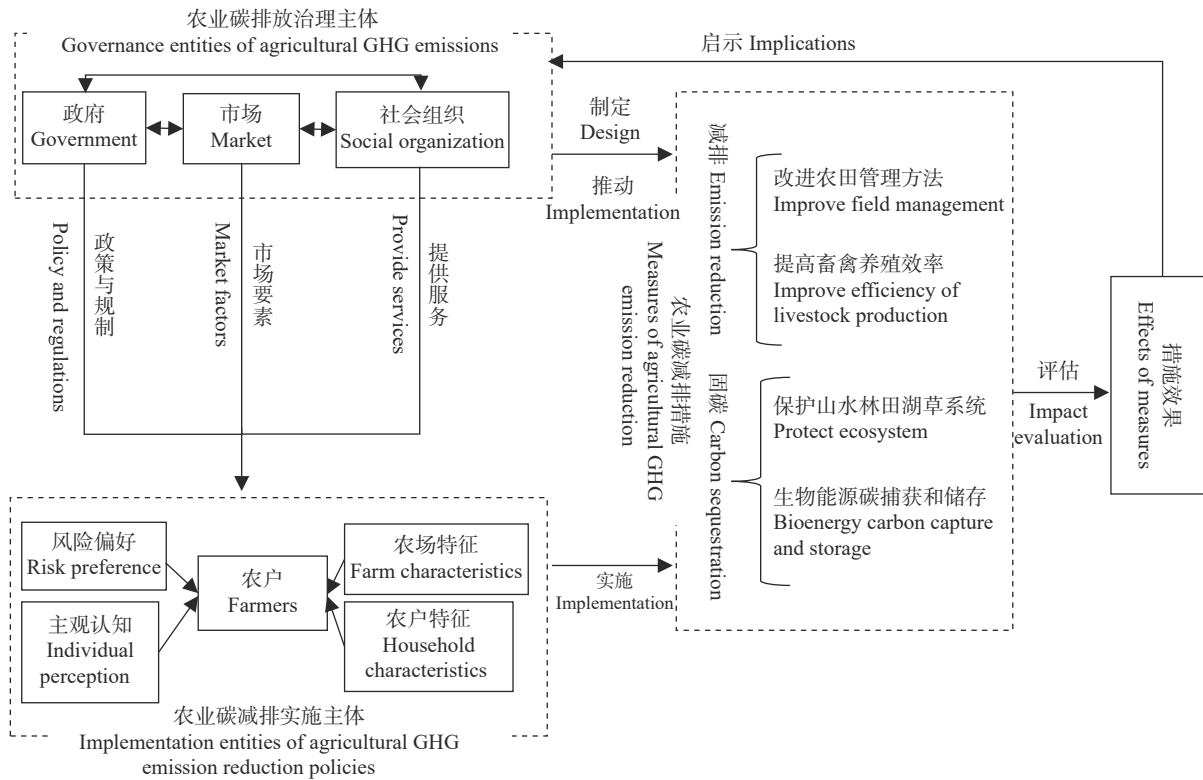


图 2 农业碳排放的治理结构框架

Fig. 2 Framework of governance structure for mitigating greenhouse gas (GHG) emissions in agriculture

农业碳减排的研究进展来看, 当前研究基本涵盖了农业领域碳中和相关政策体系中所涉及的政策措施, 研究内容逐渐从农业碳排放测算向农业碳减排措施设计及其效果评估、农业碳减排措施的实施与落实等方面倾斜; 研究方法主要包括统计性描述法、田间试验法、计量模型法和综合评估模型建模法等, 相关研究结论可为农业碳减排政策措施的制定提供科学支撑。但是综合来看, 仍存在中国农业碳排放核算不够准确和全面, 运用综合评估模型开展中国农业碳减排措施及评估的研究较少, 以及缺乏对国家层面的宏观政策的综合效果的评估等问题。

基于农业减排政策和相关研究的梳理分析, 本文总结现有研究存在的问题, 进而提出研究展望和政策启示。

4.1 研究展望

农业碳排放的核算是农业碳减排政策制定与落实的基础, 准确度量农业活动产生的温室气体排放可为精准掌握农业碳排放情况及评估农业减排措施的效果提供科学支撑。在温室气体排放清单的核算上, 现有研究大多借鉴 IPCC 公布的排放因子和核算方法对中国农业碳排放进行核算^[123-124], 但是农业温室气体排放源的排放因子因地区、时间和排放源种类不同呈现显著性差异, 而且国际上公布的排放因

子并不完全适用于中国, 导致核算存在一定的误差。同时国内现有的核算指南由于发布年代久远使得温室气体排放的测算存在一定的滞后性。另一方面, 农业系统中隐含碳排放问题特别是投入品隐含碳的核算往往被忽略, 造成农业碳排放核算结果的低估^[20]。此外, 大部分研究仅考虑农业碳排放, 忽略了农业碳吸收作用^[26], 也无法真实反映农业碳足迹。综上, 结合中国农业实际和最新研究成果, 在借鉴并改进投入产出-生命周期法的基础上, 建立更为全面且符合中国现状的农业碳排放测算体系, 对准确测算中国农业碳足迹至关重要。

农业是经济社会发展的“压舱石”, 保障粮食安全同样至关重要, 部分农业碳减排措施的实施可能对粮食安全产生影响。鉴于此, 学者们开始探索研究农业温室气体减排与保障粮食安全的协同路径, 关于农业碳减排措施评估的研究, 不仅考察相关政策的减排效应, 同时将粮食价格、产量、全要素生产率和土地利用强度等指标纳入评价体系^[33,35,42,64-65]。由此, 可将多目标优化思想纳入农业碳减排效果评价体系, 从而可兼顾粮食安全和农业绿色发展。在措施评估方法方面, 综合评估模型建模法不仅能够从历史和未来两个维度对政策措施效果进行评估和预测, 还可分析两个及其以上的政策措施的效果, 同

时能通过多个指标对政策措施进行多维度的评价分析。因此,利用综合模型评估农业碳减排效果可能是一个更好的选择。同时,不仅要关注单一或多个减排措施的效果评估,也应关注和加强对国家层面的宏观政策效果的综合评估。此外,政策模拟情景的设置要充分考虑社会经济结构变化,排除其他影响因素的干扰。

4.2 政策启示

建立资源共享的碳排放平台。农业碳排放的核算是一个步骤繁琐、数据繁多的系统性工程,耗费大量的时间和经济成本^[20]。核算数据包括农业投入产出数据、农业生产一次和二次能源数据、碳排放因子、能源碳强度系数、农业生产相关面积和畜禽数量等,涉及来自农业、工业、能源等各部门的不同机构。受限于数据的可获性和及时性,大部分研究无法全面准确地核算农业系统的碳排放。因此,可由政府牵头、协同科研机构建立跨部门跨地区的全国碳排放大数据平台,统筹管理碳排放的相关信息,开展农业数据、工业数据、能源数据等的对接与共享,及时收集并更新符合中国、省市区和不同产品的碳排放系数,提供碳排放相关的权威资讯。

充分发挥政府、市场和社会组织的职能。政府、市场和社会组织在促进农业减排措施的实施各司其职,发挥着至关重要的作用。政府通过法律法规来干预和引导农户的低碳行为,市场通过要素的资源配置作用来影响农户减排行为,社会组织则向农户提供相应的服务从而对农户的减排行为进行调节。因此,应加强政府、市场和社会组织的多元互动与协作,充分发挥政府、市场和社会组织的职能,推动农业减排措施的制定和落实。由于政府、市场和社会组织对农户低碳行为的影响会因地区、研究对象等存在异质性,在农业减排措施的落实中,应因地制宜、因势利导、因人而异^[125]。

参考文献 References

- [1] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 269–273
DONG H M, LI Y E, TAO X P, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10): 269–273
- [2] 谭秋成. 中国农业温室气体排放: 现状及挑战[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(10): 69–75
TAN Q C. Greenhouse gas emission in China's agriculture: situation and challenge[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(10): 69–75
- [3] 田云,张俊飏,何可,等. 农户农业低碳生产行为及其影

- 响因素分析——以化肥施用和农药使用为例[J]. *中国农村观察*, 2015(4): 61–70
TIAN Y, ZHANG J B, HE K, et al. Analysis of farmers' agricultural low-carbon production behavior and its influencing factors: Based on the application of fertilizer and pesticide[J]. *China Rural Survey*, 2015(4): 61–70
- [4] 吴贤荣,张俊飏. 中国省域农业碳排放: 增长主导效应与减排退耦效应[J]. *农业技术经济*, 2017(5): 27–36
WU X R, ZHANG J B. Agricultural carbon emissions at provincial level in China: Growth dominant effect and emission reduction decoupling effect[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2017(5): 27–36
- [5] STEVANOVIĆ M, POPP A, BODIRSKY B L, et al. Mitigation strategies for greenhouse gas emissions from agriculture and land-use change: consequences for food prices[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(1): 365–374
- [6] 付允,马永欢,刘怡君,等. 低碳经济的发展模式研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3): 14–19
FU Y, MA Y H, LIU Y J, et al. Development patterns of low carbon economy[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2008, 18(3): 14–19
- [7] 冉光和,王建洪,王定祥. 我国现代农业生产的碳排放变动趋势研究[J]. *农业经济问题*, 2011, 32(2): 32–38, 110
RAN G H, WANG J H, WANG D X. Study on the changing tendency and counter-measures of carbon emission produced by agricultural production in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2011, 32(2): 32–38, 110
- [8] 胡川,韦院英,胡威. 农业政策、技术创新与农业碳排放的关系研究[J]. *农业经济问题*, 2018(9): 66–75
HU C, WEI Y Y, HU W. Research on the relationship between agricultural policy, technological innovation and agricultural carbon emissions[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2018(9): 66–75
- [9] 田云,吴海涛. 产业结构视角下的中国粮食主产区农业碳排放公平性研究[J]. *农业技术经济*, 2020(1): 45–55
TIAN Y, WU H T. Research on fairness of agricultural carbon emissions in China's major grain producing areas from the perspective of industrial structure[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2020(1): 45–55
- [10] TUBIELLO F N, SALVATORE M, FERRARA A F, et al. The contribution of agriculture, forestry and other land use activities to global warming, 1990–2012[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(7): 2655–2660
- [11] GRASSI G, HOUSE J, DENTENER F, et al. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(3): 220–226
- [12] ROE S, STRECK C, OBERSTEINER M, et al. Contribution of the land sector to a 1.5 °C world[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(11): 817–828
- [13] FEDERICI S, TUBIELLO F N, SALVATORE M, et al. New estimates of CO₂ forest emissions and removals: 1990–2015[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 89–98
- [14] LE QUÉRÉ C, ANDREW R M, FRIEDLINGSTEIN P, et al. Global carbon budget 2017[J]. *Earth System Science Data*, 2018, 10(1): 405–448
- [15] 王金南,董战峰,蒋洪强,等. 中国环境保护战略政策70年历史变迁与改革方向[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(10): 1636–1644

- WANG J N, DONG Z F, JIANG H Q, et al. Historical evolution and reform of China's environmental strategy and policy during the past seventy years (1949–2019)[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(10): 1636–1644
- [16] 杜志雄, 金书秦. 从国际经验看中国农业绿色发展[J]. *世界农业*, 2021(2): 4–9, 18
DU Z X, JIN S Q. China's green agricultural development from the perspective of international experience[J]. *World Agriculture*, 2021(2): 4–9, 18
- [17] 金书秦, 牛坤玉, 韩冬梅. 农业绿色发展路径及其“十四五”取向[J]. *改革*, 2020(2): 30–39
JIN S Q, NIU K Y, HAN D M. The path of agricultural green development and its orientation in the 14th five-year plan period[J]. *Reform*, 2020(2): 30–39
- [18] 宋长青, 叶思菁. 提升我国耕地系统碳增汇减排能力[N]. *中国科学报*, 2021-11-09(3)
SONG C Q, YE S J. To enhance the capacity of China's arable land system to increase carbon sink and reduce emissions[N]. *China Science Daily*, 2021-11-09(3)
- [19] 王惠, 卞艺杰. 农业生产效率、农业碳排放的动态演进与门槛特征[J]. *农业技术经济*, 2015(6): 36–47
WANG H, BIAN Y J. Dynamic evolution and threshold characteristics of agricultural production efficiency and agricultural carbon emissions[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2015(6): 36–47
- [20] 黄祖辉, 米松华. 农业碳足迹研究——以浙江省为例[J]. *农业经济问题*, 2011, 32(11): 40–47, 111
HUANG Z H, MI S H. Agricultural sector carbon footprint accounting: a case of Zhejiang, China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2011, 32(11): 40–47, 111
- [21] 刘华军, 鲍振, 杨筹. 中国农业碳排放的地区差距及其分布动态演进——基于Dagum基尼系数分解与非参数估计方法的实证研究[J]. *农业技术经济*, 2013(3): 72–81
LIU H J, BAO Z, YANG Q. Regional disparities and dynamic evolution of agricultural carbon emissions in China: Based on the Dagum Gini coefficient decomposition and nonparametric estimation methods[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2013(3): 72–81
- [22] 田云, 张俊彪, 尹朝静, 等. 中国农业碳排放分布动态与趋势演进——基于31个省(市、区)2002—2011年的面板数据分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(7): 91–98
TIAN Y, ZHANG J B, YIN C J, et al. Distributional dynamics and trend evolution of China's agricultural carbon emissions — an analysis on panel data of 31 provinces from 2002 to 2011[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(7): 91–98
- [23] 陈儒, 邓悦, 姜志德. 基于修正碳计量的区域农业碳补偿时空格局[J]. *经济地理*, 2018, 38(6): 168–177
CHEN R, DENG Y, JIANG Z D. Spatial and temporal pattern of regional agricultural carbon compensation based on the modified carbon measurement[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(6): 168–177
- [24] 高鸣, 宋洪远. 中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异——基于Malmquist-luenberger指数与空间计量的实证分析[J]. *经济地理*, 2015, 35(4): 142–148, 185
GAO M, SONG H Y. Dynamic changes and spatial agglomeration analysis of the Chinese agricultural carbon emissions performance[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(4): 142–148, 185
- [25] 陈罗焯, 薛领, 雪燕. 中国农业净碳汇空间集聚与分异[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(11): 1777–1784
CHEN L Y, XUE L, XUE Y. Spatial agglomeration and variation of China's agricultural net carbon sink[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(11): 1777–1784
- [26] 吴昊玥, 黄瀚蛟, 何宇, 等. 中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(10): 1762–1773
WU H Y, HUANG H J, HE Y, et al. Measurement, spatial spillover and influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(10): 1762–1773
- [27] ZHANG W F, DOU Z X, HE P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21): 8375–8380
- [28] KAHRL F, LI Y J, SU Y F, et al. Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizer use in China[J]. *Environmental Science & Policy*, 2010, 13(8): 688–694
- [29] WANG Z B, CHEN J, MAO S C, et al. Comparison of greenhouse gas emissions of chemical fertilizer types in China's crop production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 1267–1274
- [30] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 247–252
HU X D, WANG J M. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10): 247–252
- [31] 虞祎, 刘俊杰. 农业产业整体减排实现路径研究——以长三角及周边地区猪肉生产流通为例[J]. *农业经济问题*, 2013, 34(10): 15–21, 110
YU Y, LIU J J. Approaches for actualization of carbon emission reduction in agricultural industry[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2013, 34(10): 15–21, 110
- [32] MATTHEWS H S, HENDRICKSON C T, WEBER C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(16): 5839–5842
- [33] HUMPENÖDER F, POPP A, DIETRICH J P, et al. Investigating afforestation and bioenergy CCS as climate change mitigation strategies[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(6): 064029
- [34] ZHANG X, DAVIDSON E A, MAUZERALL D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 51–59
- [35] ZHANG W F, CAO G X, LI X L, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. *Nature*, 2016, 537(7622): 671–674
- [36] KRAUSE M, LOTZE-CAMPEN H, POPP A, et al. Conservation of undisturbed natural forests and economic impacts on agriculture[J]. *Land Use Policy*, 2013, 30(1): 344–354
- [37] 陈静, 张建国, 赵英, 等. 秸秆和生物炭添加对关中地区玉米-小麦轮作农田温室气体排放的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 170–178
CHEN J, ZHANG J G, ZHAO Y, et al. Effects of straw and biochar amendment on greenhouse gases emission in wheat-maize rotation cropland in Guanzhong area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5): 170–178

- [38] BOYSEN L R, LUCHT W, GERTEN D, et al. Impacts devalue the potential of large-scale terrestrial CO₂ removal through biomass plantations[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 095010
- [39] MURATORI M, CALVIN K, WISE M, et al. Global economic consequences of deploying bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 095004
- [40] BODIRSKY B L, POPP A, LOTZE-CAMPEN H, et al. Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3858
- [41] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486–489
- [42] CUI Z L, ZHANG H Y, CHEN X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 363–366
- [43] GU B J, JU X T, CHANG S X, et al. Nitrogen use efficiencies in Chinese agricultural systems and implications for food security and environmental protection[J]. *Regional Environmental Change*, 2017, 17(4): 1217–1227
- [44] 张靖, 朱潇, 沈健林, 等. 生物有机肥与化肥配施对稻田氨挥发影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(1): 15–25
ZHANG J, ZHU X, SHEN J L, et al. Effects of combined application of microbial organic fertilizer and chemical fertilizer on ammonia volatilization in a paddy field with double rice cropping[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(1): 15–25
- [45] 王书伟, 林静慧, 吴正贵, 等. 氮肥深施对太湖地区稻田氨挥发影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(12): 2002–2012
WANG S W, LIN J H, WU Z G, et al. The effects of nitrogen fertilizer deep placement on the ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region of China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(12): 2002–2012
- [46] 罗佳琳, 赵亚慧, 于建光, 等. 麦秸与氮肥配施对水稻根际区土壤微生物量碳氮的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(9): 1582–1591
LUO J L, ZHAO Y H, YU J G, et al. Effects of wheat straw and nitrogen fertilizer application on the soil microbial biomass carbon and nitrogen in the rhizosphere of rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1582–1591
- [47] 李昊, 李世平, 南灵. 农药施用技术培训减少农药过量施用了吗?[J]. *中国农村经济*, 2017(10): 80–96
LI H, LI S P, NAN L. Can technical training reduce pesticide overuse?[J]. *Chinese Rural Economy*, 2017(10): 80–96
- [48] 童洪志, 刘伟. 农户秸秆还田技术采纳行为影响因素实证研究——基于 311 户农户的调查数据[J]. *农村经济*, 2017(4): 108–114
TONG H Z, LIU W. Empirical study on the influencing factors of farmers' adoption behavior of straw returning technology: Based on the survey of 311 rural households[J]. *Rural Economy*, 2017(4): 108–114
- [49] SPRINGMANN M, CLARK M, MASON-D' CROZ D, et al. Options for keeping the food system within environmental limits[J]. *Nature*, 2018, 562(7728): 519–525
- [50] BRIGGS A D M, KEHLBACHER A, TIFFIN R, et al. Assessing the impact on chronic disease of incorporating the societal cost of greenhouse gases into the price of food: an econometric and comparative risk assessment modelling study[J]. *BMJ Open*, 2013, 3(10): e003543
- [51] SHEWMAKE S, OKRENT A, THABREW L, et al. Predicting consumer demand responses to carbon labels[J]. *Ecological Economics*, 2015, 119: 168–180
- [52] ZIMMERMAN A R, GAO B, AHN M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6): 1169–1179
- [53] KUZYAKOV Y, FRIEDEL J K, STAHR K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1485–1498
- [54] KARHU K, MATTILA T, BERGSTRÖM I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity — Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1/2): 309–313
- [55] 华春林, 陆迁, 姜雅莉, 等. 农业教育培训项目对减少农业面源污染的影响效果研究——基于倾向评分匹配方法[J]. *农业技术经济*, 2013(4): 83–92
HUA C L, LU Q, JIANG Y L, et al. Impacts of agricultural education and training programs on reducing agricultural non-point source pollution: Based on the PSM method[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2013(4): 83–92
- [56] 葛继红, 周曙东, 朱红根, 等. 农户采用环境友好型技术行为研究——以配方施肥技术为例[J]. *农业技术经济*, 2010(9): 57–63
GE J H, ZHOU S D, ZHU H G, et al. Research on farmers' behavior of adopting environment-friendly technology: Take the directive fertilization technology as an example[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2010(9): 57–63
- [57] HUANG J, XIANG C, JIA X, et al. Impacts of training on farmers' nitrogen use in maize production in Shandong, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 67(4): 321–327
- [58] HONG C, BURNEY J A, PONGRATZ J, et al. Global and regional drivers of land-use emissions in 1961–2017[J]. *Nature*, 2021, 589(7843): 554–561
- [59] POORE J, NEMECEK T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers[J]. *Science*, 2018, 360(6392): 987–992
- [60] HU Y, SU M, WANG Y, et al. Food production in China requires intensified measures to be consistent with national and provincial environmental boundaries[J]. *Nature Food*, 2020, 1(9): 572–582
- [61] 卜容燕, 李敏, 韩上, 等. 有机无机肥配施对双季稻轮作系统产量、温室气体排放和土壤养分的综合效应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 145–153
BU R Y, LI M, HAN S, et al. Comprehensive effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on yield, greenhouse gas emissions, and soil nutrient in double-cropping rice systems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 145–153
- [62] 孙磊, 王丽华, 高中超, 等. 减氮配合增效剂和缓释肥对玉米田土壤温室气体排放和产量的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(1): 185–194
SUN L, WANG L H, GAO Z C, et al. Effects of reduction of

- nitrogen fertilizer combined with synergist and slow release fertilizer on greenhouse gas emissions and yield in corn field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(1): 185-194
- [63] 朱晓晴, 安晶, 马玲, 等. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(5): 977-989
ZHU X Q, AN J, MA L, et al. Effects of different straw returning depths on soil greenhouse gas emission and maize yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(5): 977-989
- [64] WANG X X, BIEWALD A, DIETRICH J P, et al. Taking account of governance: Implications for land-use dynamics, food prices, and trade patterns[J]. *Ecological Economics*, 2016, 122: 12-24
- [65] WANG X X, DIETRICH J P, LOTZE-CAMPEN H, et al. Beyond land-use intensity: Assessing future global crop productivity growth under different socioeconomic pathways[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 160: 120208
- [66] 金书秦, 周芳, 沈贵银. 农业发展与面源污染治理双重目标下的化肥减量路径探析[J]. *环境保护*, 2015, 43(8): 50-53
JIN S Q, ZHOU F, SHEN G Y. Feasible routes for reducing chemical fertilizer use with dual goals of agricultural development and non-point source pollution prevention[J]. *Environmental Protection*, 2015, 43(8): 50-53
- [67] 金书秦, 张惠, 吴娜伟. 2016年化肥、农药零增长行动实施结果评估[J]. *环境保护*, 2018, 46(1): 45-49
JIN S Q, ZHANG H, WU N W. Evaluation on the implementation of zero-growth action of chemical fertilizer and pesticide use of 2016[J]. *Environmental Protection*, 2018, 46(1): 45-49
- [68] 金书秦, 张惠, 唐佳丽. 化肥使用量零增长实施进展及“十四五”减量目标和路径[J]. *南京工业大学学报: 社会科学版*, 2020, 19(3): 66-74, 112
JIN S Q, ZHANG H, TANG J L. On progress in implementing zero growth of chemical fertilizer use and the target & path of fertilizer reducing in the “14th five-year plan”[J]. *Journal of Nanjing Tech University: Social Science Edition*, 2020, 19(3): 66-74, 112
- [69] 代云云, 徐翔. 农户蔬菜质量安全控制行为及其影响因素实证研究——基于农户对政府、市场及组织质量安全监管影响认知的视角[J]. *南京农业大学学报: 社会科学版*, 2012, 12(3): 48-53, 59
DAI Y Y, XU X. Study on the farmers behavior in controlling vegetable quality and safety and their influencing factors: based on the regulatory impact of government, market and organization[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2012, 12(3): 48-53, 59
- [70] 代云云. 我国蔬菜质量安全现状与调控对策分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(S2): 66-69
DAI Y Y. Analysis of the status quo of vegetable quality and safety management and regulation countermeasures in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(S2): 66-69
- [71] 王常伟, 顾海英. 市场VS政府, 什么力量影响了我国菜农农药用量的选择?[J]. *管理世界*, 2013(11): 50-66, 187
WANG C W, GU H Y. The market VS the government: what forces affect the selection of amount of pesticide used by China's vegetable grower?[J]. *Management World*, 2013(11): 50-66, 187
- [72] 王建华, 马玉婷, 王晓莉. 农产品安全生产: 农户农药施用知识与技能培训[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(4): 54-63
WANG J H, MA Y T, WANG X L. Agricultural production safety: farmers' pesticide application knowledge and technical training[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(4): 54-63
- [73] 黄祖辉, 钟颖琦, 王晓莉. 不同政策对农户农药施用行为的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(8): 148-155
HUANG Z H, ZHONG Y Q, WANG X L. Study on the impacts of government policy on farmers' pesticide application behavior[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(8): 148-155
- [74] EMMANUEL D, OWUSU-SEKYERE E, OWUSU V, et al. Impact of agricultural extension service on adoption of chemical fertilizer: Implications for rice productivity and development in Ghana[J]. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 2016, 79: 41-49
- [75] 耿宇宁, 郑少锋, 王建华. 政府推广与供应链组织对农户生物防治技术采纳行为的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 社会科学版*, 2017, 17(1): 116-122
GENG Y N, ZHENG S F, WANG J H. Impact of the government technology promotion and supply chain organization on farmers' biological technology adoption behavior[J]. *Journal of Northwest A&F University: Social Science Edition*, 2017, 17(1): 116-122
- [76] 卢瑜, 向平安, 余亮. 农户采纳有机农业的影响因素及其空间效应——基于新疆农户调查数据[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(1): 153-165
LU Y, XIANG P A, YU L. Influencing factors and spatial effects of organic agriculture adoption: Based on survey data of farmers in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(1): 153-165
- [77] LIU J Y, FUJIMORI S, TAKAHASHI K, et al. Identifying trade-offs and co-benefits of climate policies in China to align policies with SDGs and achieve the 2 °C goal[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(12): 124070
- [78] 童锐, 王永强. 农产品基地认证促进农户农药安全使用了吗?——基于陕西省苹果种植户的实证研究[J]. *生态经济*, 2019, 35(11): 112-116
TONG R, WANG Y Q. Does agro-product certification promote the use of unrestricted pesticides: based on the empirical study of apple farmers in Shaanxi Province[J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(11): 112-116
- [79] 侯博, 应瑞瑶. 分散农户低碳生产行为决策研究——基于TPB和SEM的实证分析[J]. *农业技术经济*, 2015(2): 4-13
HOU B, YING R Y. Research on decision making of decentralized farmers' low-carbon production behavior: Based on the empirical analysis of TPB and SEM[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2015(2): 4-13
- [80] PAUDEL K P, LOHR L, MARTIN N R Jr. Effect of risk perspective on fertilizer choice by sharecroppers[J]. *Agricultural Systems*, 2000, 66(2): 115-128
- [81] 吴雪莲, 张俊飏, 何可, 等. 农户水稻秸秆还田技术采纳意愿及其驱动路径分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(11): 2117-2126
WU X L, ZHANG J B, HE K, et al. Farmer willingness to adopt rice straw returning technology and driving path[J]. *Resources Science*, 2016, 38(11): 2117-2126

- [82] 黄季焜, 齐亮, 陈瑞剑. 技术信息知识、风险偏好与农民施用农药[J]. 管理世界, 2008(5): 71-76
HUANG J K, QI L, CHEN R J. Technical information knowledge, risk preference and pesticide application by farmers[J]. *Management World*, 2008(5): 71-76
- [83] 蔡键. 风险偏好、外部信息失效与农药暴露行为[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(9): 135-140
CAI J. Risk preference, external information failure and pesticide exposure[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(9): 135-140
- [84] LIU E M, HUANG J K. Risk preferences and pesticide use by cotton farmers in China[J]. *Journal of Development Economics*, 2013, 103: 202-215
- [85] 仇焕广, 栾昊, 李瑾, 等. 风险规避对农户化肥过量施用行为的影响[J]. *中国农村经济*, 2014(3): 85-96
QIU H G, LUAN H, LI J, et al. Impacts of risk aversion on farmers' behavior of excessive fertilizer application[J]. *Chinese Rural Economy*, 2014(3): 85-96
- [86] 米建伟, 黄季焜, 陈瑞剑, 等. 风险规避与中国棉农的农药施用行为[J]. *中国农村经济*, 2012(7): 60-71, 83
MI J W, HUANG J K, CHEN R J, et al. Risk aversion and pesticide application behavior of cotton farmers in China[J]. *Chinese Rural Economy*, 2012(7): 60-71, 83
- [87] 畅华仪, 张俊飏, 何可. 技术感知对农户生物农药采用行为的影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(1): 202-211
CHANG H Y, ZHANG J B, HE K. Technology perception and biological pesticides adoption[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(1): 202-211
- [88] TAN X P, WANG X Y, ZAIDI S H A. What drives public willingness to participate in the voluntary personal carbon-trading scheme? A case study of Guangzhou Pilot, China[J]. *Ecological Economics*, 2019, 165: 106389
- [89] WALLACE A A, IRVINE K N, WRIGHT A J, et al. Public attitudes to personal carbon allowances: findings from a mixed-method study[J]. *Climate Policy*, 2010, 10(4): 385-409
- [90] 李红梅, 傅新红, 吴秀敏. 农户安全施用农药的意愿及其影响因素研究——对四川省广汉市214户农户的调查与分析[J]. *农业技术经济*, 2007(5): 99-104
LI H M, FU X H, WU X M. Study on farmers' willingness to use pesticides safely and its influencing factors: Based on the survey of 214 rural households in Guanghan City, Sichuan Province[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2007(5): 99-104
- [91] CLARKE C, SHACKLETON S, POWELL M. Climate change perceptions, drought responses and views on carbon farming amongst commercial livestock and game farmers in the semiarid Great Fish River Valley, Eastern Cape Province, South Africa[J]. *African Journal of Range & Forage Science*, 2012, 29(1): 13-23
- [92] 蒋琳莉, 张露, 张俊飏, 等. 稻农低碳生产行为的影响机理研究——基于湖北省102户稻农的深度访谈[J]. *中国农村观察*, 2018(4): 86-101
JIANG L L, ZHANG L, ZHANG J B, et al. The influence mechanism of rice farmers' low-carbon production behaviors: an analysis based on in-depth interviews with 102 rice farmers in Hubei Province[J]. *China Rural Survey*, 2018(4): 86-101
- [93] DOSS C R, MORRIS M L. How does gender affect the adoption of agricultural innovations?[J]. *Agricultural Economics*, 2000, 25(1): 27-39
- [94] 周建华, 杨海余, 贺正楚. 资源节约型与环境友好型技术的农户采纳限定因素分析[J]. *中国农村观察*, 2012(2): 37-43
ZHOU J H, YANG H Y, HE Z C. Analysis on the limiting factors of farmers' adoption of resource-saving and environment-friendly technologies[J]. *China Rural Survey*, 2012(2): 37-43
- [95] 江激宇, 柯木飞, 张士云, 等. 农户蔬菜质量安全控制意愿的影响因素分析——基于河北省藁城市151份农户的调查[J]. *农业技术经济*, 2012(5): 35-42
JIANG J Y, KE M F, ZHANG S Y, et al. Analysis of influencing factors of farmers' intention to control vegetable quality and safety: Based on the survey of 151 rural households in Gaocheng City, Hebei Province[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2012(5): 35-42
- [96] 纪月清, 刘亚洲, 陈奕山. 统防统治: 农民兼业与农药施用[J]. *南京农业大学学报: 社会科学版*, 2015, 15(6): 61-67, 138
JI Y Q, LIU Y Z, CHEN Y S. Part-time jobs and pesticide input: a perspective of collective prevention[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2015, 15(6): 61-67, 138
- [97] ZEWELD W, VAN HUYLENBROECK G, TEFAY G, et al. Smallholder farmers' behavioural intentions towards sustainable agricultural practices[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 187: 71-81
- [98] 刘明明, 雷锦锋. 我国农业实现碳中和的法制保障研究[J]. *广西社会科学*, 2021(9): 30-38
LIU M M, LEI J F. Research on legal guarantee of carbon neutrality in China's agriculture[J]. *Social Sciences in Guangxi*, 2021(9): 30-38
- [99] KASYMOV U, WANG X, ZIKOS D, et al. Institutional barriers to sustainable forest management: Evidence from an experimental study in Tajikistan[J]. *Ecological Economics*, 2022, 193: 107276
- [100] BUSCH J, RING I, AKULLO M, et al. A global review of ecological fiscal transfers[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(9): 756-765
- [101] 李明月, 陈凯. 农户绿色农业生产意愿与行为的实证分析[J]. *华中农业大学学报: 社会科学版*, 2020(4): 10-19, 173
LI M Y, CHEN K. An empirical analysis of farmers' willingness and behaviors in green agriculture production[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2020(4): 10-19, 173
- [102] 尚惠芳, 易小燕, 张宗芳. 农户耕地质量提升行为的逻辑路径与驱动力: 研究进展与展望[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(7): 1253-1261
SHANG H F, YI X Y, ZHANG Z F. Logic paths and driving forces of cultivated land quality improvement behavior of farmers: research progress and prospects[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(7): 1253-1261
- [103] JACQUET F, BUTAULT J P, GUICHARD L. An economic analysis of the possibility of reducing pesticides in French field crops[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(9): 1638-1648
- [104] 罗小锋, 杜三峡, 黄炎忠, 等. 种植规模、市场规制与稻农生物农药施用行为[J]. *农业技术经济*, 2020(6): 71-80
LUO X F, DU S X, HUANG Y Z, et al. Planting scale, market regulation and rice farmers' biological pesticide application

- behavior[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2020(6): 71-80
- [105] TAKESHIMA H, LIVERPOOL-TASIE L S O. Fertilizer subsidies, political influence and local food prices in sub-Saharan Africa: evidence from Nigeria[J]. *Food Policy*, 2015, 54: 11-24
- [106] TAKESHIMA H, ADHIKARI R P, SHIVAKOTI S, et al. Heterogeneous returns to chemical fertilizer at the intensive margins: insights from Nepal[J]. *Food Policy*, 2017, 69: 97-109
- [107] PEMSL D, WAIBEL H, GUTIERREZ A P. Why do some Bt-cotton farmers in China continue to use high levels of pesticides?[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2005, 3(1): 44-56
- [108] 何浩然, 张林秀, 李强. 农民施肥行为及农业面源污染研究[J]. *农业技术经济*, 2006(6): 2-10
HE H R, ZHANG L X, LI Q. Research on farmers' fertilization behavior and agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2006(6): 2-10
- [109] PAN D, KONG F B, ZHANG N, et al. Knowledge training and the change of fertilizer use intensity: Evidence from wheat farmers in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 197: 130-139
- [110] 占辉斌, 胡庆龙. 农地规模、市场激励与农户施肥行为[J]. *农业技术经济*, 2017(11): 72-79
ZHAN H B, HU Q L. Farm size, market incentive and farmers' fertilization behavior[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2017(11): 72-79
- [111] ZHAO L, WANG C W, GU H Y, et al. Market incentive, government regulation and the behavior of pesticide application of vegetable farmers in China[J]. *Food Control*, 2018, 85: 308-317
- [112] 方伟, 梁俊芬, 林伟君, 等. 食品企业质量控制动机及“优质优价”实现状态分析——基于300家国家级农业龙头企业调研[J]. *农业技术经济*, 2013(2): 112-120
FANG W, LIANG J F, LIN W J, et al. Research on motivation of quality control and realization of high quality and competitive price in food enterprises: Based on the survey in the 300 national agricultural leading enterprises[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2013(2): 112-120
- [113] GOODHUE R E, KLONSKY K, MOHAPATRA S. Can an education program be a substitute for a regulatory program that bans pesticides? Evidence from a panel selection model[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 2010, 92(4): 956-971
- [114] JENA P R, GROTE U. Impact evaluation of traditional basmati rice cultivation in Uttarakhand State of northern India: what implications does it hold for geographical indications?[J]. *World Development*, 2012, 40(9): 1895-1907
- [115] LELAND H E. Quacks, lemons, and licensing: a theory of minimum quality standards[J]. *Journal of Political Economy*, 1979, 87(6): 1328-1346
- [116] 黄森慰, 张春霞, 郑逸芳. 林业合作社运行效率类别差异研究[J]. *林业经济*, 2019, 41(1): 98-103
HUANG S W, ZHANG C X, ZHENG Y F. Study on the difference of operational efficiency of forest professional cooperatives[J]. *Forestry Economics*, 2019, 41(1): 98-103
- [117] 周峰, 王爱民. 垂直协作方式对农户肥料使用行为的影
响——基于南京市的调查[J]. *江西农业学报*, 2007, 19(4): 124-126
ZHOU F, WANG A M. Impacts of vertical cooperation on fertilizer application behavior of rural households: Based on the survey in Nanjing[J]. *Acta Agriculture Jiangxi*, 2007, 19(4): 124-126
- [118] 张利国. 垂直协作方式对水稻种植农户化肥施用行为影响分析——基于江西省189户农户的调查数据[J]. *农业经济问题*, 2008, 29(3): 50-54
ZHANG L G. Impacts of vertical cooperation on fertilizer application behavior of rice farmers: Evidence from 189 households in Jiangxi Province[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2008, 29(3): 50-54
- [119] 蔡荣, 汪紫钰, 钱龙, 等. 加入合作社促进了家庭农场选择环境友好型生产方式吗? ——以化肥、农药减量施用为例[J]. *中国农村观察*, 2019(1): 51-65
CAI R, WANG Z Y, QIAN L, et al. Do cooperatives promote family farms to choose environmental-friendly production practices? an empirical analysis of fertilizers and pesticides reduction[J]. *China Rural Survey*, 2019(1): 51-65
- [120] 毛飞, 孔祥智. 农户安全农药选配行为影响因素分析——基于陕西5个苹果主产县的调查[J]. *农业技术经济*, 2011(5): 4-12
MAO F, KONG X Z. Analysis of influencing factors of farmers' pesticide behavior: Evidence from 5 major apple producing counties in Shaanxi Province[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2011(5): 4-12
- [121] 张朝辉, 刘怡彤. 加入农业合作社能促进果农采纳新型生物农药技术吗[J]. *林业经济*, 2020, 42(12): 20-26, 92
ZHANG Z H, LIU Y T. The effect of joining cooperatives on the adoption of new bio-pesticides technology by farmers[J]. *Forestry Economics*, 2020, 42(12): 20-26, 92
- [122] 史恒通, 赵敏娟, 霍学喜. 农户施肥投入结构及其影响因素分析——基于7个苹果主产省的农户调查数据[J]. *华中农业大学学报: 社会科学版*, 2013(2): 1-7
SHI H T, ZHAO M J, HUO X X. Farmer's fertilizer input structure and its influencing factors — an empirical analysis on survey data of growers in seven apple main producing provinces[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2013(2): 1-7
- [123] 陈中督, 李凤博, 冯金飞, 等. 长江下游地区稻麦轮作模式碳足迹研究——基于生命周期评价[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(12): 81-90
CHEN Z D, LI F B, FENG J F, et al. Study on carbon footprint for rice-wheat rotation system in the lower reaches of Yangtze River — based on the life cycle assessment[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(12): 81-90
- [124] 孙建卫, 陈志刚, 赵荣钦, 等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(5): 28-34
SUN J W, CHEN Z G, ZHAO R Q, et al. Research on carbon emission footprint of China based on input-output model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(5): 28-34
- [125] LIN B, WANG X X, JIN S Q, et al. Impacts of cooperative membership on rice productivity: Evidence from China[J]. *World Development*, 2022, 150: 105669