

周卓义, 温志烽, 庞博文, 等. 广东省农业现代化与农业碳排放的时空关联及协同路径 [J]. 华南农业大学学报, 2026, 47(2): 350-360.
ZHOU Zhuoyi, WEN Zhifeng, PANG Bowen, et al. Spatiotemporal association and synergistic pathways between agricultural modernization and carbon emissions in Guangdong Province[J]. Journal of South China Agricultural University, 2026, 47(2): 350-360.

广东省农业现代化与农业碳排放的时空关联及协同路径

周卓义, 温志烽, 庞博文, 张晓龙, 卢 瑛

(华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】农业绿色低碳发展是破除资源环境双重约束的必然选择,厘清农业现代化与农业碳排放间的互动关系是实现农业减排及绿色转型的科学基础。【方法】本研究构建广东省多维指标体系综合测度农业现代化水平及碳排放强度,确定广东省低碳农业现代化水平的空间格局;通过双变量局部空间关联分析(Bivariate LISA)解析二者间的空间关联及分异规律,为分类制定低碳农业现代化路径提供理论依据。【结果】2017—2023年广东省农业现代化整体处于转型发展阶段,现代化水平不断提升,农业碳排放强度整体下降,农业现代化水平整体的提升对碳排放的作用已经由促进转变为抑制;二者在县域尺度空间分异显著,且演进特征不同,农业碳排放重心的空间转移滞后于农业现代化。低碳农业现代化的低值区主要集中在珠三角核心区周边,高值区集中在雷州半岛及潮汕平原,随时间变化呈现空间集聚强化的趋势。农业现代化水平与农业碳排放强度的空间关联显著,但二者并非线性对应关系,长期来看,农业现代化发展对农业碳排放强度表现为先促进后抑制作用,农业发展模式在其中起关键中介作用;广东省农业现代化存在多种碳排放模式,高现代化-低碳排放(H-L)模式的存在及扩展表明了广东省农业低碳转型取得了重要进展,为农业现代化与农业碳减排协同提供了实证经验。【结论】农业现代化与碳排放并非简单线性关系,而是呈现显著空间异质性与路径依赖性,其协同成效取决于发展路径选择。低现代化-低碳排放(L-L)区要依托绿色优势,以绿色反哺农业现代化建设;高现代化-高碳排放(H-H)区要推动利用绿色低碳技术替代高排放的原要素,实施减排增汇组合策略;低现代化-高碳排放(L-H)区应从农业投入-产出-可持续等多维度重构其农业现代化发展策略;H-L区要扩大发展优势,形成示范效应。

关键词: 农业现代化; 农业碳排放; 低碳农业; 空间关联

中图分类号: F327; X322

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2026)02-0350-11

Spatiotemporal association and synergistic pathways between agricultural modernization and carbon emissions in Guangdong Province

ZHOU Zhuoyi, WEN Zhifeng, PANG Bowen, ZHANG Xiaolong, LU Ying

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 The green and low-carbon development of agriculture is an inevitable choice to break the dual constraints of resources and environment. Clarifying the interaction between agricultural modernization and agricultural carbon emissions provides the scientific basis for achieving agricultural emission reduction and green transformation. 【Method】 This study constructed a multidimensional indicator system to comprehensively measure the agricultural modernization level and carbon emission intensity in Guangdong Province.

收稿日期: 2025-09-23 网络首发时间: 2026-01-28 17:47:30

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20260128.1112.002>

作者简介: 周卓义, E-mail: zzy980529@163.com; 通信作者: 卢 瑛, 主要从事土壤发生分类与调查评价、耕地质量提升研究, E-mail: luying@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(42277290)

The spatial pattern of low-carbon agricultural modernization level in Guangdong Province was determined, and bivariate local indicators of spatial association (Bivariate LISA) was employed to analyze their spatial association and differentiation, so as to provide a theoretical basis for formulating categorized low-carbon agricultural modernization pathways. 【Result】 From 2017 to 2023, the overall agricultural modernization in Guangdong Province was generally in a transitional development stage. The modernization level was constantly improving, and the overall intensity of agricultural carbon emissions was declining. The overall enhancement of agricultural modernization had shifted its effect on carbon emissions from promotion to inhibition. Spatial differentiation between the two was significant at the county scale, with different evolution characteristics. The spatial shift of the agricultural carbon emission center lagged behind agricultural modernization. Low-value areas of low-carbon agricultural modernization were mainly concentrated around the core area of the Pearl River Delta, while high-value areas were concentrated in the Leizhou Peninsula and Chaoshan Plain, showing a strengthening spatial agglomeration trend over time. The agricultural modernization level and carbon emission intensity exhibited significant spatial association, but their relationship was not linear. Long-term analysis revealed that agricultural modernization first promoted and then inhibited the intensity of agricultural carbon emissions, and the agricultural development model acted as a key mediator. There were multiple carbon emission modes in the agricultural modernization of Guangdong Province. The existence and expansion of high modernization-low carbon emission (H-L) mode showed important progress in agricultural low-carbon transition, providing empirical experience for the coordination of agricultural modernization and agricultural carbon emission reduction. 【Conclusion】 The relationship between agricultural modernization and carbon emissions is not simply linear, but shows significant spatial heterogeneity and path dependence, with synergistic effect depending on the choice of development pathways. Low modernization-low carbon emission (L-L) areas should leverage green advantages to support modernization. In high modernization-high carbon emission (H-H) areas, it is necessary to promote using green low-carbon technologies to replace the original elements of high emission, and implement the combination strategy of emission reduction and sink increase. Low modernization-high carbon emission (L-H) areas should reconstruct their agricultural modernization development strategies across multiple dimensions such as agricultural input-output-sustainability. H-L areas should expand their development advantages to form a demonstration effect.

Keywords: Agricultural modernization; Agricultural carbon emissions; Low-carbon agriculture; Spatial association

农业现代化是中国式现代化的重要基石^[1]。推进农业绿色发展既是农业发展理念的根本性变革,也是践行国家绿色发展战略的必然要求^[2-3]。尽管改革开放以来我国农业生产效率显著提升,但长期依赖资源消耗与环境代价的粗放型增长模式尚未根本转变^[4]。当前,农业发展面临资源与环境的双重约束、绿色转型效益转化不足等多重挑战^[2,5]。特别是,以高化学品投入和机械化扩张为核心的传统农业现代化路径加剧了碳排放。因此,探索农业现代化与碳减排协同发展的路径,已成为统筹“双碳”目标与乡村振兴战略的核心议题。本研究聚焦农业现代化与碳排放的内在关联,旨在为构建低碳导向的农业现代化新范式提供理论支撑与实践路径。与先行国家不同,中国式农业现代化承载着保

障超大规模人口的粮食安全、突破资源环境约束实现绿色跃迁的双重使命^[1]。为应对这一系统性挑战,学界从多维视角展开深入探索。例如,从历史演进、理论创新、政策适配、技术路径以及目标等维度,系统阐释中国式农业现代化与生态可持续性协同的内在逻辑^[6-7]。从投入、产出、可持续能力及农业社会发展水平等维度,构建了农业现代化水平综合评价体系,并识别出区域不均衡与结构性短板等核心问题^[8-10]。从推动农业现代化与新型工业化、城镇化、信息化及绿色化协同发展的视角^[11-12],解析“五化”的耦合机理及动态演进,明确协调发展路径^[13-14]。从地理学视角,对中外及国内区域间的农业现代化共性及差异开展比较研究,探索农业现代化的类型差异及空间分异^[15-16]。政策层面,党的十

九届五中全会明确了 2025 和 2035 年农业现代化建设的阶段性目标,并突出农业绿色发展导向^[17];2025 年《加快建设农业强国规划(2024—2035 年)》更将“绿色循环、低碳发展”确立为农业强国的制度底色。绿色转型已成为破解发展矛盾、实现中国式农业现代化的关键路径与基本特征^[6,18]。

据联合国粮食与农业组织(FAO)统计,农业用地的温室气体排放占全球总量的 30%。作为农业大国,中国实现“双碳”目标亟需农业减排固碳的深度参与,这不仅是对全球气候治理的责任担当,同时我国也具备显著的减排潜力^[19-20]。2021 年发布的《2030 年前碳达峰行动方案》将农业绿色发展与固碳增效提升至国家战略层面,标志着低碳转型已成为中国式农业现代化的刚性约束。然而,当前我国农业仍高度依赖能源要素投入,碳减排形势严峻^[21]。在此背景下,揭示农业现代化与农业碳排放效率之间的关系,对于制定有效的减排策略和推动可持续发展具有重要意义^[22]。

广东省作为我国农业现代化建设的先行区,整体发展水平位居全国前列,已基本实现农业现代化^[15]。然而,受自然资源禀赋及区域发展差异影响,形成了集约与粗放农业并存、规模化与小户经营并存、智慧与传统农业并存的局面。这种异质性导致农业投入与土地利用模式分化,进而形成不同碳排放强度的农业现代化路径。现有研究多聚焦省域尺度,缺乏对县域农业现代化及碳排放关系的定量分析。基于此,本研究立足于低碳农业现代化视角,构建多维评估体系,量化当前广东省农业现代化水平及农业碳排放强度,识别低碳农业现代化水平的空间分异特征;梳理农业现代化与农业碳排放空间关联的理论机理,探究二者在广东省的空间关联模

式;从农业投入、产出及可持续维度分析产生不同空间关联模式的主要原因,依据不同碳排放模式探索低碳农业现代化发展路径,以期为全国农业低碳转型提供广东经验。

1 农业现代化建设与农业碳排放关联机理

农业现代化的内核是指具有更充分的农业要素投入、更高效的农产品产出、更专业的农业生产组织形式以及更小的环境影响^[10]。其核心涵盖生产、经营与产业体系现代化,并以政策支撑实现绿色可持续发展目标^[7]。尽管机械化、水利化、化学化和电气化是实现农业现代化的必要条件^[11],但这些进程通过扰动农业系统的碳循环对农业碳排放产生双向影响,且存在显著的空间溢出效应^[23-26]。农业现代化建设与农业碳排放之间并非简单的线性相关^[22],有研究表明农业产业集聚水平与农业碳排放之间呈现倒“U”型的关系^[25]。总体而言,农业碳排放与产业升级呈正相关关系^[24],与农业机械化呈负相关关系,绿色机械化对抑制碳排放的作用更为明显^[27-28],公共投资与能效提升对农业碳排放起抑制作用^[29]。具体来说,农业现代化过程中的化肥农药使用及土地集约化利用等路径提高单位面积碳排放强度^[30]。而农业技术进步及经营体系创新有效降低碳排放强度^[31-33]。在“双碳”目标约束下,农业现代化与碳减排深度协同。农业现代化进程中的技术、经营及制度创新为农业碳减排提供有力保障。相应地,为了实现碳减排所采取的碳汇交易、绿色政策及环境法规等措施,通过引导社会资本向农业领域流动、鼓励绿色技术创新、推动农业产业升级,助推农业现代化发展^[34](图 1)。

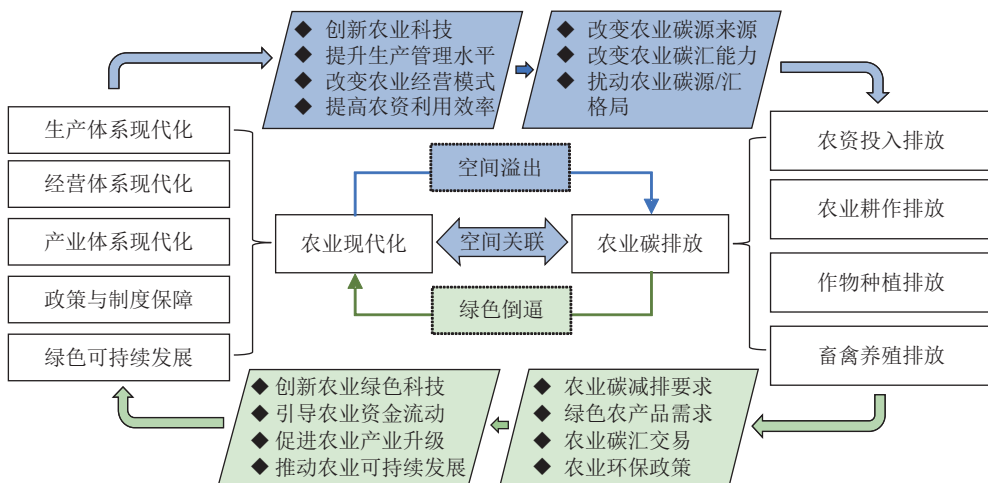


图 1 农业现代化与农业碳排放关联协调机理

Fig. 1 Correlation and coordination mechanism between agricultural modernization and agricultural carbon emissions

基于资源禀赋差异,全球形成了多样化的农业现代化模式,如美国的劳动节约型、日本的土地节约型及二者的中间形态^[1]。不同模式导致了显著的碳排放路径分化,美国及俄罗斯的农业现代化是建立在高耗能高排放的基础上^[35],而欧盟通过低碳循环农业、农业碳汇交易等方式实现了农业领域的温室气体减排^[36-37]。从后现代视角来看,中国式的现代化是人与自然和谐共生的现代化^[38],这决定我国不能重蹈高碳排现代化覆辙,亟须探索符合国情的低碳农业现代化道路。

2 数据来源及研究区概况

广东省是我国农业现代化建设的领跑者,2025年广东省政府工作报告指出,截至2024年,广东省农业科技贡献率贡献率达73%,远高于全国平均水平,以全国1.9%的耕地面积贡献了5.7%的农业总产值,农业资源集约化利用与高附加值农业发展成效显著。本研究以广东省91个非城市核心功能区的县级行政单位为研究对象,研究数据包括空间数据及统计面板数据,空间数据来自国家地理信息公

共服务平台(天地图)官方网站(<https://cloudcenter.tianditu.gov.cn>)发布的行政边界矢量数据;统计数据来自《广东省农村统计年鉴》^[39-40],由于数据开放限制,仅获取了2017—2023年的统计数据,因此本研究以2017—2023年为时间范围。

3 研究方法

3.1 农业现代化水平测度

3.1.1 指标选取与权重确定 农业现代化发展水平是对区域农业发展状况的综合测度,包含区域农业的投入产出状况、可持续发展能力以及乡村社会发展状况等主要内容,学术界尚未形成统一的农业现代化发展水平测度的标准。参考国内相关研究^[8,10,41],并结合指标完整性、系统性、可比性及可获得性的原则,构建了包括农业投入水平、农业产出水平及农业可持续发展水平3个方面15个二级指标的广东省农业现代化水平测度指标体系(表1)。本研究采用极差标准化的方法将各指标值进行标准化处理。采用定性与定量结合的方式确定评价因子的权重,运用层次分析法(Analytic hierarchy

表1 广东省农业现代化水平测算指标体系
Table 1 Measurement index system of agricultural modernization level in Guangdong Province

一级指标 Primary indicator	权重 Weight	二级指标 Secondary indicator	计算方法 Calculating method	指标含义 Indicator definition	属性 Attribute	权重 Weight
农业投入水平 Agricultural input level	0.2518	农业人力投入	农业从业人数/总从业人数	农业劳动力投入水平	正	0.1511
		耕地有效灌溉率	耕地有效灌溉面积/耕地面积	农业水资源利用水平	正	0.1180
		农业机械化水平	农业机械总动力/耕地面积, kW/hm ²	农业机械化程度	正	0.1026
		农业科技人员密度	农业科技人员总人数/耕地面积, 人/hm ²	农业科技投入水平	正	0.5921
		化肥使用量强度	化肥使用总量/耕地面积, t/hm ²	农业绿色生产能力	逆	0.0172
		农药使用量强度	农药使用总量/耕地面积, t/hm ²	农业绿色生产能力	逆	0.0190
农业产出水平 Agricultural output level	0.5889	农民收入水平	农村居民可支配收入	农民收入状况	正	0.1252
		农业劳动生产率	农业总产值/农业从业人数	农业生产效率	正	0.2346
		单位面积粮食产量	粮食总产量/耕地总面积, t/hm ²	粮食产出效益	正	0.0671
		农林牧渔业状况	农林牧渔总产值/地方生产总值	农业经济水平	正	0.1650
		农业土地产出	农林牧渔业总产值/耕地面积	农业土地利用水平	正	0.4081
农业可持续发展水平 Agricultural sustainable development level	0.1593	农业节水灌溉率	节水灌溉面积/耕地总面积	农业灌溉效率	正	0.4608
		土地整理面积	耕地增加面积	农业发展前景	正	0.0245
		农业用水保障	单位面积机井数量	农业抗旱能力	正	0.3834
		农业规模化水平	耕地总面积/农业从业人口	规模农业前景	正	0.1313

process, AHP) 确定一级指标的权重, 运用熵值法确定二级指标的权重。

3.1.2 农业现代化水平综合指数测算 采用在农业现代化水平测度研究中广泛应用的综合评价模型法, 测度广东省农业现代化发展综合指数, 综合指数值范围在 0~1 之间, 指数值越大表明农业现代化水平越高, 公式如下:

$$F_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} w_j, \quad (1)$$

式中: F_i 为评价单元 i 的农业现代化水平综合指数; x_{ij} 为评价单元 i 的第 j 项指标的标准化值; w_j 为第 j 项指标的权重; n 为指标数。

在测算各评价单元农业现代化综合指数的基础上, 参考现有研究的分级方法^[42], 按照各研究单元综合分值达到广东省农业现代化平均水平的程度, 以广东省 2017 和 2023 年农业现代化平均水平的 80%、100%、120% 为分界点。将低于广东平均水平 80% 的区域划分为低值区, 达到平均水平

80% 且低于 100% 的区域为中低值区, 达到平均水平 100% 且低于 120% 的为中高值区, 达到平均水平 120% 及以上的为高值区。

3.2 农业碳排放强度测度

基于生命周期理论, 农业碳排放核算应涵盖种养业生产过程中的能源物资消耗及废弃物处理的全过程^[29], 具体包括农资投入、农地利用、作物种植和畜禽养殖 4 个方面^[43], 本研究共测算了 18 种碳源的碳排放量 (表 2), 各类碳源的碳排放系数根据现有研究确定。为了统一计算碳排放量, 根据《IPCC 国家温室气体清单指南》^[44] 利用全球增温潜势 (Global warming potential, GWP), 将作物种植过程中土壤排放的 N_2O 以及水稻种植和畜禽生长过程中产生的 CH_4 统一换算成 CO_2 当量 (CO_2e), 1 t CH_4 等于 28 t CO_2e ; 1 t N_2O 等于 265 t CO_2e 。

农业碳排放总量计算公式为:

$$E = \sum E_i = \sum T_i \times \delta_i, \quad (2)$$

式中: E 为农业碳排放总量; E_i 为第 i 种碳源的碳排

表 2 农业生产过程中碳源及碳排放系数

Table 2 Carbon source and carbon emission coefficient in agricultural production process

分类 Classification	碳源 Carbon source	碳排放系数 ¹⁾ Carbon emission coefficient	参考来源 Reference
农资投入 Agricultural input	化肥	895.6 kg/t	美国橡树岭国家实验室
	农药	4934.0 kg/t	美国橡树岭国家实验室
	农膜	5 180.0 kg/t	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
	柴油	597.2 kg/t	IPCC ^[44]
农地利用 Farmland use	翻耕	312.60 kg/hm ²	伍芬琳等 ^[45]
	灌溉	266.48 kg/hm ²	段华平等 ^[46]
作物种植 Crop cultivation	水稻 CH_4	338.00 kg/hm ²	王效科等 ^[47]
	水稻 N_2O	242.18 kg/hm ²	张学智等 ^[48]
	蔬菜 N_2O	342.15 kg/hm ²	张学智等 ^[48]
	薯类 N_2O	172.20 kg/hm ²	张学智等 ^[48]
畜禽养殖(肠道发酵) Livestock and poultry breeding (Enteric fermentation)	猪	68.2 kg	IPCC ^[44]
	牛	375.1 kg	IPCC ^[44]
	羊	34.1 kg	IPCC ^[44]
	家禽	忽略不计	IPCC ^[44]
畜禽养殖(粪便管理) Livestock and poultry breeding (Manure management)	猪	119.10 kg	IPCC ^[44]
	牛	122.54 kg	IPCC ^[44]
	羊	124.15 kg	IPCC ^[44]
	家禽	27.91 kg	IPCC ^[44]

1) 农资投入和农地利用部分的碳排放系数均以碳计; 作物种植及畜禽养殖部分的碳排放系数均以二氧化碳当量计, 其中, 畜禽养殖部分的碳排放系数为每头畜禽产生的二氧化碳当量。

1) The carbon emission coefficients for agricultural input and farmland use are calculated in carbon. The carbon emission coefficients for crop cultivation and livestock & poultry breeding are calculated in carbon dioxide equivalent, and among these, the emission coefficient for livestock & poultry breeding refers to the carbon dioxide equivalent generated per head of livestock & poultry.

放量; T_i 为第 i 种碳源的数量; δ_i 为第 i 种碳源的碳排放系数。

农业碳排放强度是指单位面积农地或单位农业产值所产生的总碳排放量,为了更好地反映农业生产活动强度,本研究采用单位面积农地所产生的总碳排放量来表征广东省农业碳排放强度。公式如下:

$$Q = E/S_i, \quad (3)$$

式中: Q 为农业碳排放强度; S_i 为第 i 个研究区的耕地面积。

3.3 低碳农业现代化测度

现有农业现代化综合评价体系普遍缺乏对农业碳排放强度的表征。为了测度农业现代化过程的低碳化程度,本研究创新性引入逆向标准化处理后的碳排放强度作为修正因子,对农业现代化综合指数进行碳排放强度修正,从而得到低碳农业现代化指数。低碳农业现代化指数值在 0~1 之间,指数值越高代表低碳农业现代化水平越高,指数值越低则相反。低碳农业现代化指数计算公式如下:

$$P_i = F_i \times \tilde{Q}_i, \quad (4)$$

式中: P_i 为第 i 个评价单元的低碳农业现代化指数; \tilde{Q}_i 为第 i 个评价单元逆向标准化后的农业碳排放强度。

3.4 空间关联分析

为系统揭示广东省农业现代化指数与农业碳排放的空间关联特征,本研究参照刘立程等^[49]的研究方法,采用双变量空间自相关模型并遵循“全局-局部”的分析框架。首先,运用双变量全局 Moran's I 指数开展整体空间相关性检验,该指数可用于判断某一变量的空间分布与另一变量空间分布之间是否存在正相关、负相关或空间独立关系。继而利用双变量局部空间关联分析 (Bivariate local indicators of spatial association, Bivariate LISA),揭

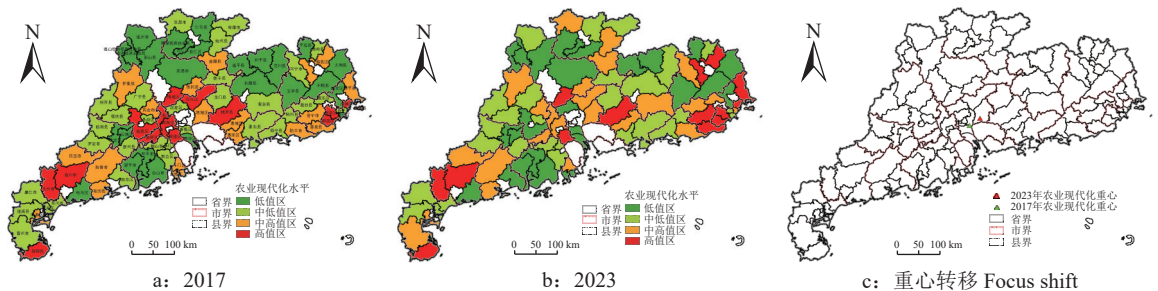
示农业现代化水平与农业碳排放强度的局部空间关联及分异特征。

将农业现代化综合水平指数与农业碳排放强度赋值至县级矢量图层并导入 GeoDa 软件,构建空间权重矩阵后,通过该软件 Space 模块的双变量全局及局部 Moran'I 指数工具,分别判定二者整体空间相关性与局部关联模式。双变量局部 Moran's I 指数通过衡量各单元农业现代化水平与其邻近单元碳排放强度空间滞后值的协同偏离,识别局部空间关联类型。在通过置换检验判定统计显著性 ($P < 0.05$) 的基础上,根据标准化值的正负组合将区域划分为 4 种类型:高现代化-高碳排放 (H-H)、低现代化-低碳排放 (L-L) 的正向集聚,以及高现代化-低碳排放 (H-L)、低现代化-高碳排放 (L-H) 的负向集聚。基于此结果结合矢量图层绘制聚类地图,直观呈现 4 种关联类型的空间分布,反映局部关联异质性。

4 结果与分析

4.1 广东省农业现代化与碳排放的时空变化

4.1.1 农业现代化的时空变化 2017—2023 年间广东省农业现代化建设取得了显著进展。农业现代化发展水平总体呈现上升趋势,低水平区数量减少了 6 个,中低水平区减少了 3 个,中高水平区增加了 8 个,高水平区增加了 1 个。空间上呈现北部发展水平低、中部及东西两翼发展水平高的空间格局 (图 2),这也与广东省农业发展自然及社会资源禀赋格局相匹配,粤北山区地势起伏大,珠三角及东西两翼地势较为平坦,相较于粤北地区更有利于发展规模农业及推广农业科技。2017—2023 年间广东省农业现代化水平的几何中心呈现向东部迁移的趋势,粤东及粤西的农业现代化发展速率要高于全省同期平均水平,珠三角地区的农业发展中心地位逐步弱化。



基于审图号 GS(2024)0650 标准地图绘制,底图未修改。

The maps were drawn based on the standard map with approval number GS (2024) 0650, and the base map had not been altered.

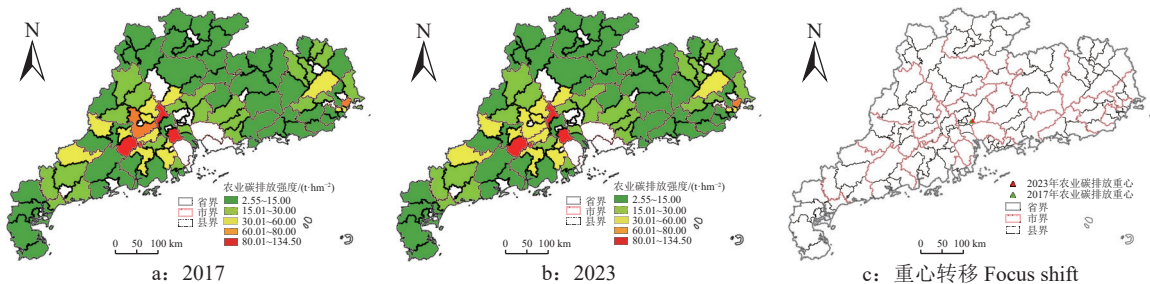
图 2 广东省农业现代化水平时空分布

Fig. 2 Spatial and temporal distribution of agricultural modernization level in Guangdong Province

4.1.2 农业碳排放的时空变化 广东省平均农业碳排放强度总体呈现下降趋势, 2017—2023 年间广东省单位农业产出碳排放平均下降了 $0.72 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{万元}$ 。农业碳排放强度高的区域集中在珠三角西翼地区, 是粤北地区碳排放强度的 10 倍以上; 粤东地区的农业碳排放强度也较高 (图 3)。2017—2023 年间广东省农业碳排放的几何中心几乎没有变化, 落后于农业现代化质心转移速率及强度, 这可能与农业碳循环系统的相对稳定性有关。

4.1.3 低碳农业现代化 通过在各研究区农业现

代化综合指数的基础上, 进行碳排放强度修正, 得到广东省低碳农业现代化发展时空格局 (图 4)。广东省低碳农业现代化呈现明显的时空差异, 2017—2023 年低值区主要集中在珠三角核心区周边, 高值区集中在粤西的雷州半岛及粤东的潮汕平原区, 同时随时间变化呈现集聚趋势。珠三角周边区域的农业发展多采用集约农业, 单位面积耕地农业投入及用地强度大, 单位面积农业碳排放量多; 粤西及粤东地区地势相对平坦适宜发展规模化农业, 有利于降低农业碳排放强度。

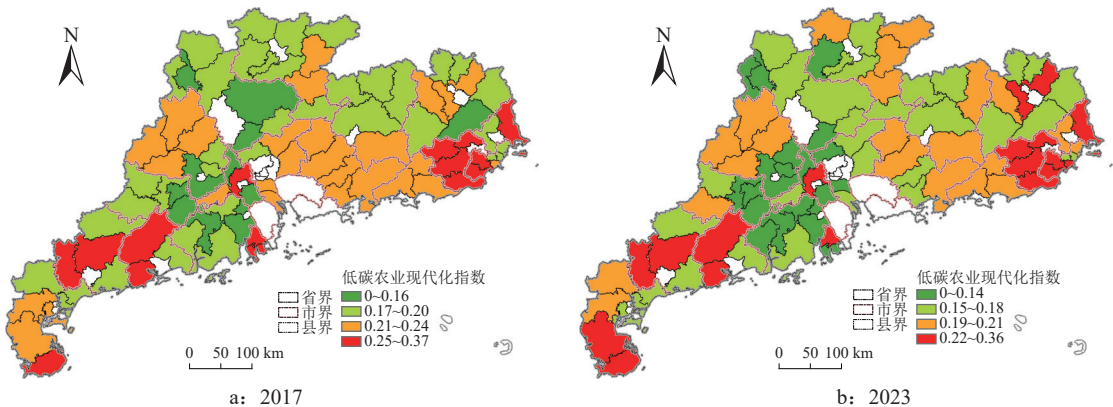


基于审图号 GS(2024)0650 标准地图绘制, 底图未修改。

The maps were drawn based on the standard map with approval number GS (2024) 0650, and the base map had not been altered.

图 3 广东省农业碳排放时空分布

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of agricultural carbon emissions in Guangdong Province



基于审图号 GS(2024)0650 标准地图绘制, 底图未修改。

The maps were drawn based on the standard map with approval number GS (2024) 0650, and the base map had not been altered.

图 4 广东省低碳农业现代化时空分布

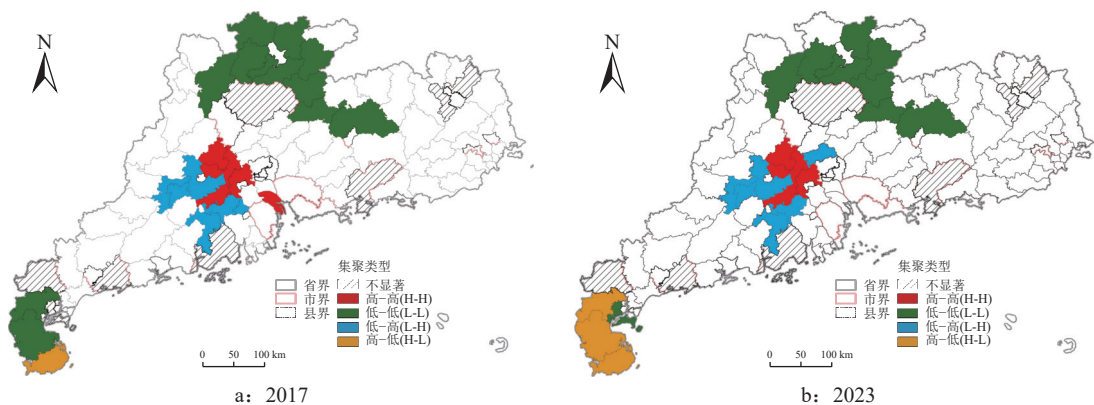
Fig. 4 Spatial and temporal distribution of low-carbon agricultural modernization in Guangdong Province

4.2 农业现代化与农业碳排放的空间关联

农业碳排放与农业现代化之间的双变量全局 Moran's I 指数由 2017 年的 0.151 演进为 2023 年的 -0.143 , 标志着广东省低碳农业现代化建设取得了明显成效进入转型发展阶段, 农业现代化水平整体提升对碳排放的作用已经由促进转变为抑制。这表明, 现代化与高碳排放的“空间锁定”效应被打破。一部分地区成功实现了“增产减排”的解耦, 成为了低碳现代化的高地, 并对周边产生了辐射效

应。实现这一转变除了技术进步所带来的绿色效益之外, 更是“双碳”战略在农业现代化建设中所发挥的引导与约束作用的深刻体现。

在 Bivariate LISA 分析显著性满足 $P < 0.05$ 的水平上绘制农业现代化综合指数及不同维度农业现代化指数与农业碳排放强度的相关性聚类地图 (图 5、6), 表征农业现代化水平与农业碳排放的空间关联模式及分异特征。结果表明, 农业现代化水平与农业碳排放强度的局部空间格局具有明显的

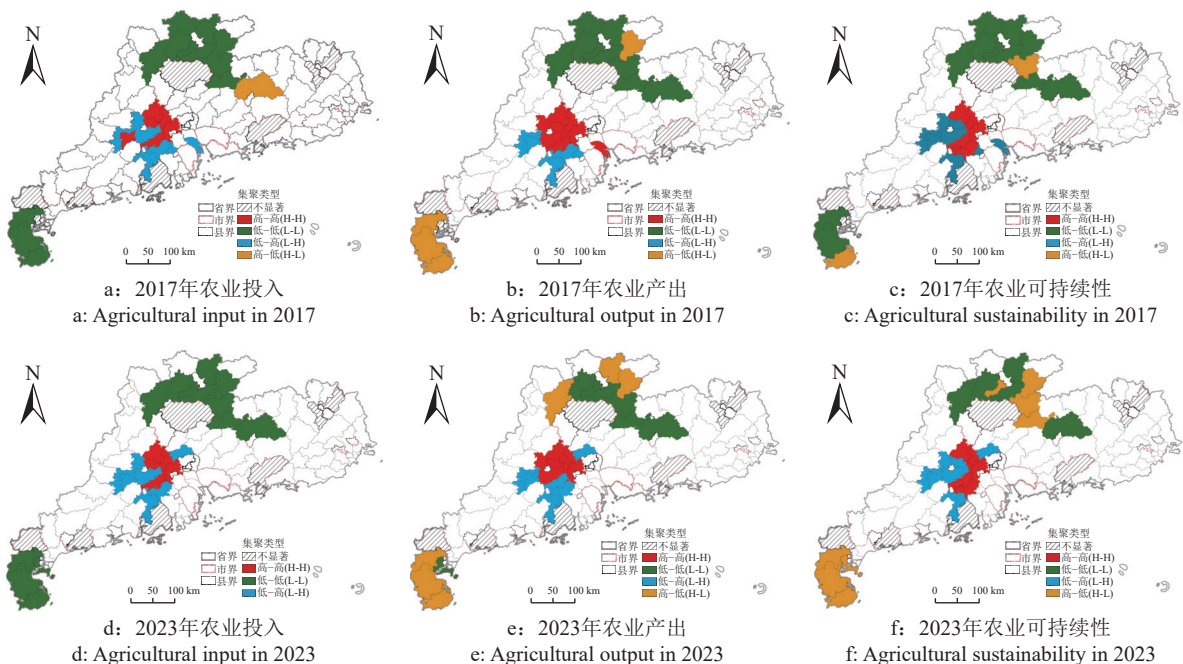


基于审图号 (2024)0650 标准地图绘制, 底图未修改。

The maps were drawn based on the standard map with approval number GS (2024) 0650, and the base map had not been altered.

图5 广东省农业现代化水平与农业碳排放 Bivariate LISA 聚类

Fig. 5 Bivariate LISA clustering of agricultural modernization level and agricultural carbon emissions in Guangdong Province



基于审图号 GS(2024)0650 标准地图绘制, 底图未修改。

The maps were drawn based on the standard map with approval number GS (2024) 0650, and the base map had not been altered.

图6 广东省不同维度农业现代化水平与农业碳排放的 Bivariate LISA 聚类

Fig. 6 Bivariate LISA clustering of agricultural modernization level and agricultural carbon emissions in different dimensions in Guangdong Province

集聚类型连片分布特点, 空间分异格局的背后, 是区域资源禀赋、发展阶段与政策导向共同塑造的差异化农业现代化路径。

低现代化-低碳排放 (L-L) 集聚类型集中分布在粤北地区, 2017—2023 年该类集聚类型保持稳定, 这些地区农业自然基础条件薄弱、经济发展动力不足、生态保护任务重, 限制了农业现代化发展, 农业碳排放强度弱。从不同农业现代化维度来看, 该类地区具有低投入产出与低碳排放特征, 随着农业现代化水平提高, 该类地区呈现高农业可持续性

与低碳排放特征。因此, 该类地区应将生态约束转化为绿色竞争力, 走低碳生态农业现代化路径。

高现代化-高碳排放 (H-H) 集聚类型集中在珠三角腹地, 这些地区位于珠江三角洲平原, 农业发展的自然及经济社会条件优越, 临近农产品消费地, 农业产业链完备, 2017—2023 年该类集聚类型范围有所缩小。从不同农业现代化维度来看, 农业投入、产出及可持续性水平与农业碳排放强度均呈现 H-H 集聚特征, 表明该地区农业现代化建设与高碳排放深度锁定。为突破高碳排放惯性, 需依托区域

优势,建设农业技术、经营模式及绿色激励机制创新先行区。

低现代化-高碳排放(L-H)集聚类型集中在珠三角的外缘地区,该类地区与珠三角区域相似,具有较高的碳排放强度,但农业现代化发展滞后,农业投入、产出及可持续性指数均较低,农业现代化与碳排放失衡。从农业碳排放构成来看,畜禽养殖部分占比大,这类地区与《广东省推进农业农村现代化“十四五”规划》中重点打造生猪大县基本吻合,江门市的开平市、新会区,云浮市的新兴县等均属于生猪重点养殖县(区)。该类地区应重点关注养殖业的碳减排。

高现代化-低碳排放(H-L)集聚类型集中在粤西的雷州半岛,2017—2023年呈现扩展态势,从仅湛江市徐闻县增加至徐闻、雷州及遂溪3个县。该模式的发展验证了“高农业现代化-低碳排放”的可行性。雷州半岛作为广东省农业现代化建设的重点区域,有良好的自然及农业政策条件,有利于现代农业经营模式及农业科技的推广,形成了低投入、高产出及高可持续性且低碳排放的良好模式。该区域应作为低碳高效农业示范区,通过技术与政策溢出辐射带动周边地区的发展。

5 讨论与结论

5.1 农业现代化与“双碳”战略协同的内在逻辑及政策优化

低碳农业现代化是我国农业现代化战略与“双碳”战略的交汇点,其本质是农业生产力革新与生态约束的动态平衡。当前,我国农业现代化建设的高耗能、高排放倾向并未扭转。推动农业现代化与农业碳减排目标相协调、有效形成政策合力,是实现农业高质量发展、落实国家“双碳”战略及践行全球气候责任的关键。现有农业现代化与农业碳排放的研究主要关注农业现代化对碳排放效率的影响,缺乏对二者交互关系的系统性解构;而且我国农业现代化时空动态与区域异质性显著,多数减排政策未充分考虑这种区域发展不平衡^[50],因此难以匹配精准化的低碳农业现代化策略。从双战略协同推进的成本效益来看,短期内农业生产效率提升措施可能提高碳排放,农业碳减排投入会增加农业生产成本,农业收益不确定性加大。从长远目标来看,农业现代化水平的提高为农业碳减排提供了技术及经济可能性,农业碳减排压力会反向推动农业产业升级。因此,政府应通过财政激励、绿色补贴、碳汇交易以及绿色产品认证等方式,承担或转

移农业碳减排成本,从而推动短期收益与长远目标相协调。未来应更加关注农业现代化与农业碳减排协同系统内涵及边界、整体统筹及区域差异化策略以及全流程农业现代化措施碳排放评估等内容,以消解两大战略在路径选择上的冲突,实现绿色低碳农业现代化。

5.2 农业现代化与碳排放的空间关联特征及分区治理

从地理学视角来看,农业现代化与农业碳排放之间存在显著的空间关联性与异质性。随着农业现代化进程推进,全国农业碳排放总量虽呈下降趋势,但整体仍未摆脱对高碳路径依赖。研究表明,农业发展水平对碳排放具有明显的空间溢出效应,地理邻近性、财政支持、劳动力规模、绿色技术进展等因素显著增强了空间溢出效应,而农业产业结构差异则是实现该效应的主要障碍^[25,51]。我国各地区在资源禀赋、种植结构及社会经济发展水平方面的差异,进一步导致农业现代化与碳排放协调程度呈现空间分异^[52-53]。这些内在差异预示着大水漫灌式的农业现代化推广策略已不适用,未来应转向分区分类的精准治理。当前,我国正处于农业现代化建设与绿色发展转型的关键时期,处于L-L型的区域要充分发挥低排放优势,强化生态保护与土壤固碳,重点发展生态农业,推动绿色反哺现代化;H-H型区域应实施减排增汇组合策略,通过保护性耕作与有机肥施用提升碳固定,打破原有高碳锁定;L-H型区域农业现代化路径与碳排放失衡,不符合当前绿色农业发展战略,应从农业投入-产出-可持续等多维度重构其农业现代化发展策略;H-L型区域要扩大发展优势并形成示范效应,通过技术及政策的交流互通,实现低碳农业现代化的空间趋同。

5.3 农业现代化影响碳排放的动态演进规律与推进策略

从动态演进视角来看,农业现代化对碳排放的影响呈现先促进后抑制的“倒U型”规律^[25,54]。其内在机理在于驱动力的阶段性转换,初期以增产为导向的要素投入扩张主导,提高碳排放;当现代化水平跨越拐点后,技术进步与结构优化的减排效应成为主导。在发展过程中,生态与循环农业政策及绿色金融推动农业现代化并减少了农业碳排放^[55],农业管理措施的改进对增加农业碳固定具有显著成效^[56-58]。实现该转型有赖于“技术-政策-产业-市场”协同的绿色农业现代化体系支撑。在技术层面,强调科技创新对推动农业绿色生产力升级的作用,推广节能、高效、循环农业技术,提升生产效率

的同时减排增固;在政策层面,构建绿色信贷与碳汇交易等激励机制,将农业碳汇纳入生态补偿范畴,促进生态价值经济转化;在产业与市场层面,推动产业链绿色整合与低碳品牌建设,以市场需求倒逼农业供给侧结构性改革,如广东省建立的“12221 市场营销体系”有效减少了滞销导致的资源浪费和碳排放。受限于数据获取年限及范围,本研究结果离精准匹配低碳农业现代化策略仍有一定差距。为提升政策精准性,未来应构建长时序、全流程的农业碳监测体系,将空间类型与发展阶段相结合,实施“分区—分阶段”双重导向的治理路径。对拐点前的区域(L-L/L-H型),需进行绿色技术与管理模式的前瞻性布局,规避碳锁定风险;对拐点附近区域(H-H),重在助推跨越,强化技术扩散与政策激励;对拐点后区域,鼓励其探索深度脱碳路径,并推动绿色溢出,实现区域协同减排。

5.4 结论

本研究立足于低碳农业现代化视角,解析广东省农业现代化与碳排放强度的交互机制及空间关联,旨在推动农业现代化建设与农业碳减排相协调,实现农业生产效率与碳减排的双重目标,主要结论如下:

1) 2017—2023年广东省农业现代化整体处于转型及转型发展阶段,农业现代化水平整体提升,而农业碳排放强度持续下降。农业现代化与农业碳排放空间上呈现集聚态势,但二者的演进特征不同,农业现代化重心向粤东方向的迁移速率显著快于碳排放重心,揭示了现代化进程的空间引导作用以及碳排放的滞后响应特征。

2) 低碳农业现代化指数测算结果显示,珠三角的低碳农业现代化水平低,粤东及粤西地区的低碳农业现代化水平高,且区域差异持续扩大,呈现集聚强化的趋势。农业现代化建设对农业碳排放具有空间溢出效应,珠三角都市农业区与潮汕平原精细农业及雷州半岛的现代农业所采取的农业发展策略具有较大差异,由此导致低碳农业现代化水平不同。

3) 空间关联分析揭示,农业现代化水平与农业碳排放强度具有显著的空间依赖,但二者并非线性对应关系,相同现代化水平下可产生差异化碳排放模式,同类模式呈现明显的空间集聚特征。H-H与H-L集聚类型的同时存在表明现代化与减排目标可协同实现,且呈现空间扩散趋势;L-L与L-H集聚类型的共存表明高碳排放路径并不能确保提升农业现代化综合水平。

参考文献:

- [1] 张红宇,张海阳,李伟毅,等.中国特色农业现代化:目标定位与改革创新[J].中国农村经济,2015(1):4-13.
- [2] 孙炜琳,王瑞波,姜茜,等.农业绿色发展的内涵与评价研究[J].中国农业资源与区划,2019,40(4):14-21.
- [3] 于法稳.新时代农业绿色发展动因、核心及对策研究[J].中国农村经济,2018(5):19-34.
- [4] 叶兴庆.实现更高质量更可持续的农村和谐稳定[N].农民日报,2016-05-28.
- [5] 黄修杰,蔡勋,储霞玲,等.我国农业高质量发展评价指标体系构建与评估[J].中国农业资源与区划,2020,41(4):124-133.
- [6] 匡远配,彭云,李姗姗.新时代中国农业农村现代化的多重逻辑、基本特征及实现路径[J].中国农村经济,2024(12):2-22.
- [7] 国务院发展研究中心农村经济研究部课题组,叶兴庆,程郁.新发展阶段农业农村现代化的内涵特征和评价体系[J].改革,2021(9):1-15.
- [8] 钱佰慧,陈思霖,徐洋,等.农村现代化水平评价指标体系构建与测度分析[J].农业经济与管理,2021(6):39-49.
- [9] 刘玉洁,吕硕,陈洁,等.青藏高原农业现代化时空分异及其驱动机制[J].地理学报,2022,77(1):214-227.
- [10] 杨奇峰,张平宇,李静,等.东北地区农业现代化发展水平测度与时空演变分析[J].地理科学,2022,42(9):1588-1599.
- [11] 杜志雄.农业农村现代化:内涵辨析、问题挑战与实现路径[J].南京农业大学学报(社会科学版),2021,21(5):1-10.
- [12] 张林,冉光和,郑强.农业现代化与工业化、信息化、城镇化的耦合协调发展研究[J].农村经济,2015(8):89-93.
- [13] 张平淡,袁赛,夏晓华.基于农业现代化视角的“五化”协同发展影响因素分析[J].经济地理,2017,37(3):152-157.
- [14] 丁志伟,张改素,王发曾,等.中国工业化、城镇化、农业现代化、信息化、绿色化“五化”协调定量评价的进展与反思[J].地理科学进展,2016,35(1):4-13.
- [15] 龙冬平,李同昇,苗园园,等.中国农业现代化发展水平空间分异及类型[J].地理学报,2014,69(2):213-226.
- [16] 丁泽霖,杜志雄.中国农业现代化的道路选择与面临的新形势:“中外农业现代化比较国际研讨会”会议纪要[J].中国农村经济,2001(3):77-80.
- [17] 中共中央 国务院关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见[N].人民日报,2021-02-22.
- [18] 冯献,李宁辉,郭静利.“四化同步”背景下我国农业现代化建设的发展思路与对策建议[J].农业现代化研究,2014,35(1):11-14.
- [19] 张俊飏,何可.“双碳”目标下的农业低碳发展研究:现状、误区与前瞻[J].农业经济问题,2022,43(9):35-46.
- [20] 金书秦,林煜,牛坤玉.以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J].改革,2021(5):29-37.
- [21] 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.
- [22] ZHANG S, LI X, NIE Z, et al. The significance of agricultural modernization development for agricultural carbon emission efficiency in China[J]. Agriculture, 2024, 14(6): 939.

- [23] 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, 39(9): 66-75.
- [24] 陈银娥, 陈薇. 农业机械化、产业升级与农业碳排放关系研究: 基于动态面板数据模型的经验分析[J]. *农业技术经济*, 2018(5): 122-133.
- [25] 田云, 尹恣昊. 中国农业碳排放再测算: 基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. *中国农村经济*, 2022(3): 104-127.
- [26] YANG F. Impact of agricultural modernization on agricultural carbon emissions in China: A study based on the spatial spillover effect[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(39): 91300-91314.
- [27] MA S L, YAN H, LI D, et al. The impact of agricultural mechanisation on agriculture carbon emission intensity: Evidence from China[J]. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 62(1): 99-110.
- [28] WANG L, LYU J, WANG S, et al. Unveiling the influence of agricultural mechanization on greenhouse gas emission intensity: Insights from China using causal machine learning model[J]. *Agricultural Systems*, 2025, 226: 104307.
- [29] 张广胜, 王珊珊. 中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J]. *农业经济问题*, 2014, 35(7): 18-26.
- [30] 王翌秋, 徐丽, 曹蕾. “双碳”目标下农业机械化与农业绿色发展: 基于绿色全要素生产率的视角[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2023(6): 56-69.
- [31] 田佳琳. 农业现代化水平对农业碳排放强度的影响研究[J]. *江西农业学报*, 2024, 36(1): 177-184.
- [32] 杨钧. 农业技术进步对农业碳排放的影响: 中国省级数据的检验[J]. *软科学*, 2013, 27(10): 116-120.
- [33] YANG X H, JIA Z, YANG Z M, et al. The effects of technological factors on carbon emissions from various sectors in China: A spatial perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 301: 126949.
- [34] XIA M, ZENG D, HUANG Q, et al. Coupling coordination and spatiotemporal dynamic evolution between agricultural carbon emissions and agricultural modernization in China 2010-2020[J]. *Agriculture*, 2022, 12(11): 1809.
- [35] BALOGH J M. The impacts of agricultural development and trade on CO₂ emissions? Evidence from the Non-European Union countries[J]. *Environmental Science & Policy*, 2022, 137: 99-108.
- [36] NSABIYEZE A, MA R Q, LI J, et al. Tackling climate change in agriculture: A global evaluation of the effectiveness of carbon emission reduction policies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 468: 142973.
- [37] BALOGH J M. The impacts of agricultural subsidies of Common Agricultural Policy on agricultural emissions: The case of the European Union[J]. *Agricultural Economics (Zemědělská Ekonomika)*, 2023, 69(4): 140-150.
- [38] 韩保江, 李志斌. 中国式现代化: 特征、挑战与路径[J]. *管理世界*, 2022, 38(11): 29-43.
- [39] 《广东农村统计年鉴》编辑委员会. 广东农村统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2025.
- [40] 《广东农村统计年鉴》编辑委员会. 广东农村统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [41] 刘云菲, 李红梅, 马宏阳. 中国农垦农业现代化水平评价研究: 基于熵值法与 Topsis 方法[J]. *农业经济问题*, 2021, 42(2): 107-116.
- [42] 辛岭, 蒋和平. 我国农业现代化发展水平评价指标体系的构建和测算[J]. *农业现代化研究*, 2010, 31(6): 646-650.
- [43] 黄天阳, 谢立勇, 邓天乐, 等. 基于 LMDI 模型的辽宁省农业碳排放效率及驱动因素分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33(3): 424-434.
- [44] IPCC. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[M]. 叶山, 日本: 全球环境战略研究所 (IGES), 2006.
- [45] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [46] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 203-208.
- [47] 王效科, 李长生, 欧阳志云. 温室气体排放与中国粮食生产[J]. *生态环境*, 2003(4): 379-383.
- [48] 张学智, 王继岩, 张藤丽, 等. 中国农业系统 N₂O 排放量评估及低碳措施[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(5): 1215-1223.
- [49] 刘立程, 刘春芳, 王川, 等. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究: 以兰州市为例[J]. *地理学报*, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [50] JIN Y, YANG L, LEE J. Spatiotemporal dynamics of agricultural development and CO₂ emissions in China[J]. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2025, 12: 100167.
- [51] HE Y, FANG G Z, QI C J, et al. Research on the spatial correlation network and driving mechanism of agricultural green development in China[J]. *Agriculture*, 2025, 15(7): 693.
- [52] XIE K, DING M, ZHANG J, et al. Trends towards coordination between grain production and economic development in China[J]. *Agriculture*, 2021, 11(10): 975.
- [53] CUI Y, KHAN S U, DENG Y, et al. Regional difference decomposition and its spatiotemporal dynamic evolution of Chinese agricultural carbon emission: Considering carbon sink effect[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(29): 38909-38928.
- [54] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(8): 80-86.
- [55] KNICKEL K, ASHKENAZY A, CHEBACH T C, et al. Agricultural modernization and sustainable agriculture: Contradictions and complementarities[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2017, 15(5): 575-592.
- [56] SHI L, ZHAO J L, XIAO S Y, et al. The carbon sequestration efficiency of conservation agriculture is constrained by initial carbon contents and duration: Evidence from a meta-analysis of experimental data in China[J]. *Catena*, 2025, 255: 109058.
- [57] LESSMANN M, ROS G H, YOUNG M D, et al. Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(3): 1162-1177.
- [58] WANG Y C, TAO F L, CHEN Y, et al. Interactive impacts of climate change and agricultural management on soil organic carbon sequestration potential of cropland in China over the coming decades[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 817: 153018.