

山东省种植业碳排放时空特征、驱动因素及其未来变化趋势

蔡永俊¹, 任君^{1,2}, 李成英², 步婉茹¹, 王全喜³

(1. 青海大学 财经学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学 土木水利学院, 青海 西宁 810016; 3. 甘肃农业大学 管理学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: [目的] 明确山东省种植业碳排放时空特征、驱动因素及未来变化趋势, 为该省制定差异化减碳措施、实现农业可持续发展提供科学指导。 [方法] 基于2005—2024年《山东省统计年鉴》中16个地级市的农业数据, 运用碳排放因子法测度2004—2023年种植业碳排放量及强度, 结合Tapio脱钩模型、LMDI模型及灰色预测GM(1,1)模型, 在省域和市域两个尺度对山东省种植业碳排放空间差异、驱动因素及2024—2033年碳排放量开展研究。 [结果] ①2004—2023年山东省种植业碳排放呈“增加—波动—减少”的M形变化, 总量从 1.07×10^7 t降至 9.26×10^6 t, 农资投入是山东省种植业碳排放的主要碳源, 其中化肥所占比例最高(46.16%), 其次为农膜(18.15%)和灌溉(15.85%), 作物种植中玉米是第一大碳源, 所占比例为32.24%; ②山东省种植业碳排放与经济增长从“弱脱钩”转为“强脱钩”, 市域层面高碳排放区集中于菏泽、潍坊和临沂, 低碳排放区为淄博和东营等城市; ③从影响因素来看, 种植业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、农村人口规模均抑制碳排放, 地区经济水平、城镇化水平均促进碳排放; ④未来10 a山东省种植业碳排放持续下降, 总量将从 8.95×10^6 t降至 7.32×10^6 t, 市域层面来看, 日照市降幅最大, 枣庄市降幅最小。 [结论] 山东省近20 a种植业碳排放总量与强度均下降, 种植业碳排放与经济增长之间呈现良性发展, 种植业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、农村人口规模对碳减排起到一定作用, 地区经济水平和城镇化水平因素为山东省种植业碳排放量增加的主要因素, 未来山东省种植业碳排放将持续下降, 但山东省高排放区域减排压力仍较大, 需通过优化种植结构, 提升生产效率, 管控农资投入, 以推动农业绿色低碳发展。

关键词: 低碳农业; 种植业碳排放; 驱动因素; 未来趋势; LMDI模型; 山东省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0306-14

中图分类号: F326.1

文献参数: 蔡永俊, 任君, 李成英, 等. 山东省种植业碳排放时空特征、驱动因素及其未来变化趋势[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 306-319. Cai Yongjun, Ren Jun, Li Chengying, et al. Spatiotemporal characteristics, driving factors and future change trends of carbon emissions from planting industry in Shandong Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 306-319.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.006

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.006

Spatiotemporal characteristics, driving factors and future change trends of carbon emissions from planting industry in Shandong Province

Cai Yongjun¹, Ren Jun^{1,2}, Li Chengying², Bu Wanru¹, Wang Quanxi³

(1. School of Finance and Economics, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

2. School of Civil & Water Resources, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

3. School of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal characteristics, driving factors and future changing trends of carbon emissions from the planting industry in Shandong Province were analyzed, in order to provide scientific guidance for the province to formulate differentiated carbon reduction measures and achieve sustainable agricultural

收稿日期: 2025-07-29

修回日期: 2025-09-17

采用日期: 2025-09-19

资助项目: 国家社会科学基金青年项目“青海生态脆弱区耕地占补平衡绩效评价及模式优化研究”(21CGL040); 青海省哲学社会科学青年项目“碳中和愿景下青海省“三生”空间格局演变及优化策略研究”(23Q060); 青海省“昆仑英才·高端创新创业人才培养拔尖人才项目”(QHKLYC-GDCXCXY-2024-226)

第一作者: 蔡永俊(1999—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 硕士研究生, 研究方向为农业碳排放和“三农”问题。Email: 3410334190@qq.com。

通信作者: 任君(1989—), 男(汉族), 甘肃省武威市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地利用碳效应及城市经济方面的研究。Email: Renjun@qhu.edu.cn。

development. [Methods] Based on the agricultural data of 16 prefecture-level cities in Shandong Province from 2005 to 2024 in the ‘Shandong Statistical Yearbook’, the carbon emissions and intensity of the planting industry from 2004 to 2023 were measured using the carbon emission factor method. Combined with the Tapio decoupling model, LMDI model and grey prediction GM(1, 1) model, the spatial differences, driving factors and carbon emissions from 2024 to 2033 of the planting industry in Shandong Province were studied at both provincial and municipal levels. [Results] ① From 2004 to 2023, the carbon emissions of the planting industry in Shandong Province showed an M-shaped change of ‘increase-fluctuation-decrease’, with the total amount dropping from 1.07×10^7 t to 9.26×10^6 t. Agricultural materials input was the main source of carbon emissions in Shandong Province’s planting industry. Among them, chemical fertilizers account for the highest proportion (46.16%), followed by agricultural films (18.15%) and irrigation (15.85%). Among crop planting, corn was the largest carbon source, accounting for 32.24%. ② The carbon emissions of the planting industry and economic growth in Shandong Province have shifted from ‘weak decoupling’ to ‘strong decoupling’. At the municipal level, high carbon emission areas were concentrated in Heze, Weifang and Linyi cities, while low carbon emission areas were in Zibo and Dongying cities. ③ From the perspective of influencing factors, planting industry production efficiency, agricultural industrial structure, regional industrial structure, and rural population size inhibited carbon emissions, while regional economic level and urbanization level promoted carbon emissions. ④ Over the next decade, carbon emissions from the planting industry in Shandong Province are projected to continue declining, with the total amount dropping from 8.95×10^6 t to 7.32×10^6 t. At the municipal level, Rizhao City will have the largest reduction, while Zaozhuang city will have the smallest reduction. [Conclusion] Over the past 20 years, both the total amount and intensity of carbon emissions from the planting industry in Shandong Province have decreased. There is a positive development between the carbon emissions of the planting industry and economic growth. Planting industry production efficiency, agricultural industrial structure, regional industrial structure, and rural population size have played a certain role in carbon reduction. Regional economic level and urbanization level are the main factors contributing to the increase in carbon emissions from the planting industry in Shandong Province. In the future, the carbon emissions of the planting industry in Shandong Province will continue to decline, but the pressure to reduce emissions in high-emission areas remains considerable. It is necessary to promote green and low-carbon development in agriculture through optimizing planting structure, improving production efficiency, and controlling the input of agricultural materials.

Keywords: low-carbon agriculture; carbon emissions of planting industry; drive factor; future trends; LMDI model; Shandong Province

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC)评估报告指出,气候变化是全人类共同面临的挑战,人类活动产生的温室气体是导致全球气候变暖的主要原因^[1]。中国自古以来就是农业大国,农业碳排放在全球的比例相对较高,且呈逐年增加的趋势。目前,中国粗放型农业生产方式产生了显著的负外部性^[2],种植业生产过程中温室气体排放量约占农业温室气体排放总量的34%^[3],且农业碳排放量约有31%的下降空间^[4],这表明农业碳减排压力和潜力巨大。减少农业碳排放是农业可持续发展的关键环节,更是中国实现“双碳”目标和高质量发展的重要议题^[5]。现有研究^[6]表明,种植业实现碳中和,对推进中国“双碳”目标至关重要。山东省作为中国重要的农业生产区,农业生产门类齐全,种植业在全国具有一定的代表性;与此同

时,山东省种植业碳排放面临着碳排放源复杂,区域分布不均及地区间碳排放差异大等问题。因此,研究种植业碳排放的时空特征、驱动因素及未来趋势对理解和推进山东省绿色低碳农业发展具有重要意义。

目前,学者们对种植业碳排放的研究主要集中于不同研究尺度种植业碳排放量测算,影响因素剖析及碳排放量预测等方面。在种植业碳排放量测算方面,学者们主要依据IPCC碳排放系数法对种植业碳排放量进行测算。如郭美洁等^[7]从作物种植和农资投入等方面对山东省种植业碳排放进行测算;Sun Tao等^[8]基于2004—2023年山东省16个城市的面板数据,研究发现山东省农田总碳排放量呈“初期波动上升后稳步下降”趋势。在碳排放影响因素方面,郭玮等^[9]采用LMDI模型(logarithmic mean division index)对青海省种植业和畜牧业碳排放驱动

因素进行分解;马海清等^[10]采用GWR模型(geographically weighted regression)对甘肃省农业碳排放展开分析;王宝等^[11]采用STIRPAT模型(stochastic impacts by regression on population, affluence and technology)分析了贵州省农村金融发展对农业碳排放的影响。在种植业碳排放与经济增长关系方面,学者们从全国、区域、省域及市域等不同研究尺度对种植业碳排放进行了脱钩效应分析,如徐玥等^[12]对徐州市的农业碳排放与经济增长脱钩关系实证分析,研究发现徐州市农业碳排放脱钩效应从弱脱钩转变为强脱钩;宁静等^[13]对中国粮食主产区碳排放脱钩效应和脱钩转变过程进行了分析。在碳排放预测方面,学者们采用不同的预测模型对碳排放量进行预测,如Javed等^[14]采用灰色预测模型对中国生物燃料产生的CO₂进行分析;张小蓉等^[15]运用R/S模型(rescaled range analysis model)对山西省的农业碳排放展开趋势预测;高亚培等^[16]采用STIRPAT模型探究了青海省未来发展过程中的城乡生活用地与间接碳排放之间的关系。在种植业碳排放研究尺度方面,赵玉等^[17]在全国尺度对中国种植业碳排放展开了研究;索瑞霞等^[18]和Jia Luhao等^[19]分别对黄河流域种植业碳排放展开了研究测算以及影响因素分析;曹俊文等^[20]对长江流域的种植业碳排放空间特征进行分析;郭美洁等^[7]和宋宏恩等^[21]则针对省域种植业碳排放及影响因素展开研究。通过梳理国内外种植业碳排放的研究不难发现,学者们对种植业碳排放开展了丰富的研究,但目前关于山东省种植业碳排放的研究仍有些不足:①已有研究对山东省种植业碳排放的测算主要集中于省域整体,较少有对市域尺度碳排放的研究;②鲜有学者采用预测模型对山东省种植业碳排放的未来演变趋势进行预测,灰色预测模型具有小样本数据计算便捷、高效,短期预测精度较高等优势^[22],适用于山东省短期种植业碳排放预测。

鉴于已有研究聚焦宏观尺度及对种植业未来碳排放研究预测不足的现实,本研究遵循“历史演变—现状特征—未来趋势”的逻辑主线,综合运用多种研究方法,结合山东省实际情况及前人研究成果^[7],从省域和市域“双尺度”对山东省种植业碳排放展开系统研究,通过碳排放因子法厘清2004—2023年碳排放的时空演变特征,借助LMDI模型识别关键驱动因素,利用Tapio脱钩模型揭示经济增长与碳排放的关联状态,最后采用灰色预测GM(1,1)模型对山东省未来10a的种植业碳排放趋势进行预测,并据此提出针对性的对策建议,以期为山东省种植业绿色低碳转型与可持续发展提供参考。

1 研究概况

1.1 研究区概况

山东省位于中国东部沿海地区,地处黄河下游,该省地势中部山地突起,西南、西北低洼平坦,东部缓丘起伏,主要地形区划分为鲁中南山地丘陵区、鲁西北平原区、胶东丘陵区等区域。山东省气候属暖温带季风气候类型,降水集中,雨热同季,春秋短暂,冬夏较长;山东省是中国农业大省,其下辖16个地级行政区,辖区面积 $1.58 \times 10^5 \text{ km}^2$,耕地面积比例较高,粮食产量稳定,是中国重要的粮食、蔬菜和水果产区。

由于黄河流经山东省,形成大面积的冲积平原,为种植业提供了优越的种植区域。根据山东省统计局和国家统计局发布的公告显示,2024年山东省人口约10 080.17万人,2024年粮食播种面积进一步扩大至 $8.41 \times 10^6 \text{ hm}^2$,粮食总产量达 $5.71 \times 10^7 \text{ t}$,粮食单产 $6 787.7 \text{ kg/hm}^2$,稳居全国第3。山东省在粮食种植的过程中,化肥、农药等的使用会产生大量的温室气体排放,随着种植业生产规模的扩大和产量的提高,种植业碳排放问题日益凸显。因此,在保障粮食安全供应的同时,该省需积极探索种植业碳减排的有效途径,以实现生态环境的系统保护和农业的可持续发展。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

以山东省16个地级市为研究对象,水稻、小麦、玉米、大豆、棉花、蔬菜的种植面积以及农资投入的化肥、农药、农膜、农用柴油、有效灌溉面积、土地翻耕面积和文中所使用的农林牧渔业总产值、种植业生产总值以及农业劳动力规模等数据主要来源于《山东省统计年鉴(2005—2024年)》。参考已有研究^[6],化肥为折纯量;农药、农膜为使用量;农用柴油为农业机械柴油使用量;农业灌溉为农作物实际有效灌溉面积;农业劳动力规模采用当年农村总人口数,部分缺失的数据使用插值法来补齐。由于2019年1月莱芜市撤市设区并入济南市,本研究将2019年前莱芜市种植业碳排放数据均并入济南市计算。

2.2 研究方法

2.2.1 碳排放因子法

目前学者们普遍采用碳排放因子法测算碳排放总量,且针对全国各个省市及地区的碳排放系数的测算也较为成熟。因此,本文也采用IPCC所提出的碳排放因子法。结合山东省实际情况,依据不同作

物类型和农资投入方式的碳排放量测算种植业碳排放量(表 1)。

参考索瑞霞等^[18]的研究,山东省种植业碳排放主要包括化肥、农药、农膜等农用物资使用过程中产生的碳排放,农业机械作业消耗柴油产生的碳排放,土地翻耕过程中产生的碳排放以及不同作物类型在种植过程中土壤微生物产生的 N₂O 以及水稻

种植过程中产生的 CH₄,由于各个省市水稻排放系数差别较大,本文参考闵继胜等^[23]的研究成果,山东省水稻的碳排放系数为 210 kg/hm²(以 CH₄计),为方便处理和分析,将各类温室气体统一换算成标准碳,根据 IPCC 指南和《省级温室气体清单编制指南》,可知 1 t CH₄=6.818 2 t C,1 t N₂O=81.272 7 t C^[15]。

表 1 山东省种植业各类碳源的碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficients of various carbon sources in planting industry of Shandong Province

碳源	计算指标	排放系数	参考文献
农资投入	化肥	0.895 6 kg/kg(以 C 计)	美国橡树岭国家实验室
	农药	4.934 1 kg/kg(以 C 计)	美国橡树岭国家实验室
	农膜	5.18 kg/kg(以 C 计)	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
	柴油	0.592 7 kg/kg(以 C 计)	IPCC
	灌溉	266.48 kg/hm ² (以 C 计)	IPCC
	翻耕	3.126 kg/hm ² (以 C 计)	伍芬琳等 ^[24]
作物类型	小麦	2.05 kg/hm ² (以 N ₂ O 计)	刘杨等 ^[25]
	水稻	210 kg/hm ² (以 CH ₄ 计)	刘杨等 ^[25]
		0.24 kg/hm ² (以 N ₂ O 计)	刘杨等 ^[25]
	玉米	2.532 kg/hm ² (以 N ₂ O 计)	刘杨等 ^[25]
	蔬菜	4.21 kg/hm ² (以 N ₂ O 计)	刘杨等 ^[25]
	大豆	0.77 kg/hm ² (以 N ₂ O 计)	刘杨等 ^[25]
棉花	0.480 4 kg/hm ² (以 N ₂ O 计)	刘杨等 ^[25]	

利用碳排放因子法对山东省各类种植业活动的碳排放量进行测算,计算公式为

$$CE = \sum_{k=1}^m E_k = \sum_{k=1}^m e_k \cdot p_k \quad (1)$$

$$CI = \frac{CE}{G_A} \quad (2)$$

式中:CE, E_k分别表示种植业碳排放总量与碳源 k 的碳排放量(10⁵ t); e_k, p_k分别为碳源 k 的实际数量及其排放系数; m 为碳源总量; CI 为种植业碳排放强度(t/万元); G_A为山东省种植业生产总值(万元)。

2.2.2 脱钩模型

Tapio 脱钩模型是用来测算经济发展与碳排放脱钩状态的一种常用方法^[12]。计算公式为

$$Z = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta G/G_0} \quad (3)$$

式中:Z 为脱钩指数; ΔC, ΔG 分别表示研究期内碳排放变化量(10⁵ t)和 GDP 变化量(万元); C₀, G₀ 为基期碳排放量(10⁵ t)与基期 GDP(万元)。本文根据山东省碳排放脱钩的弹性值以及碳排放与种植业产值的变动方向,参考钟妮栖等^[26]研究将碳排放脱钩状态进行划分,结果如图 1 所示。

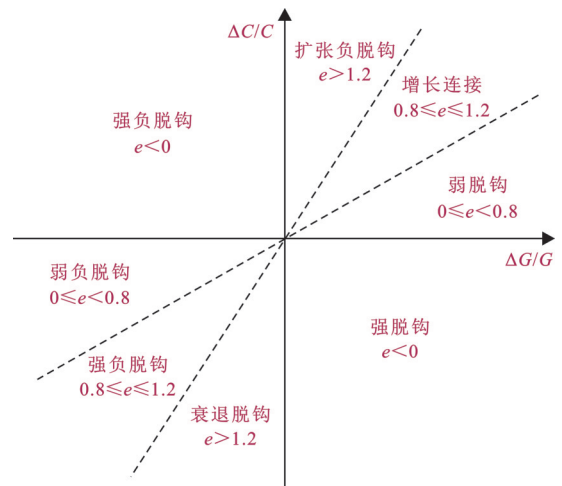


图 1 山东省种植业碳排放脱钩状态判定标准

Fig.1 Criteria for determining decoupling status of carbon emissions in planting industry of Shandong Province

2.2.3 LMDI 模型

本文根据 Kaya 恒等式的基本形式,本研究借鉴宁静^[13]的研究,将山东省种植业碳排放量做如下变形,运用 LMDI 模型从种植业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济水平、城镇化水平和农村人口规模 6 个方面解析山东省种植业碳排放的驱

动因素。计算公式为

$$C = \frac{C}{G_A} \times \frac{G_A}{G_B} \times \frac{G_B}{G} \times \frac{G}{P} \times \frac{P}{P_A} \times P_A \quad (4)$$

式中： C 为山东省种植业碳排放量(10^5 t)； G_A 为山东省种植业生产总值(亿元)； G_B 为山东省农林牧渔业生产总值(亿元)； G 为山东省地区生产总值(亿元)； P 为山东省地区总人口(万人)； P_A 为山东省农村总人口(万人)。

为便于后续计算，分别使用 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ 表示山东省种植业碳排放的影响因素，其中：

$$\alpha = \frac{C}{G_A}, \beta = \frac{G_A}{G_B}, \gamma = \frac{G_B}{G}, \delta = \frac{G}{P}, \epsilon = \frac{P}{P_A} \quad (5)$$

式中： α 为山东省种植业生产效率(种植业碳排放量与种植业生产总值的比值)； β 为山东省农业生产结构(种植业生产总值在农业生产总值中所占比重)； γ 为山东省地区产业结构(农业生产总值在山东省生产总值中所占比重)； δ 为山东省地区经济水平(人均GDP)； ϵ 为山东省城镇化水平(总人口与农村人口的比值)； P_A 为山东省农村人口规模(山东省农村总人口)。

运用LMDI加法分解方式进一步分解后，山东省种植业碳排放的种植业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济水平、城镇化水平、农村人口规模，对碳排放的贡献度分别为 $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma, \Delta\delta, \Delta\epsilon$ 和 ΔP 。计算公式为

$$\Delta C = \Delta\alpha + \Delta\beta + \Delta\gamma + \Delta\delta + \Delta\epsilon + \Delta P = C_t - C_0 \quad (6)$$

$$\Delta\alpha = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{\alpha_t}{\alpha_0} \quad (7)$$

$$\Delta\beta = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{\beta_t}{\beta_0} \quad (8)$$

$$\Delta\gamma = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{\gamma_t}{\gamma_0} \quad (9)$$

$$\Delta\delta = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{\delta_t}{\delta_0} \quad (10)$$

$$\Delta\epsilon = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{\epsilon_t}{\epsilon_0} \quad (11)$$

$$\Delta P = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times \ln \frac{P_t}{P_0} \quad (12)$$

式中： C_t, C_0 分别表示第 t 年和第 $(t-1)$ 年山东省农业碳排放总量； $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma, \Delta\delta, \Delta\epsilon$ 和 ΔP 分别表示在基年至 t 年其他因素不变条件下的种植业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济水平、城镇化水平、农村人口规模等因素所导致的碳排放变化量。

2.2.4 灰色预测GM(1,1)模型

灰色预测模型通过对原始数据序列进行累加或累减生成新序列，挖掘其中隐藏的指数增长规律，以

此增强数据的规律性和可预测性，其能凭借少量数据，精准预测未来趋势，适用于数据缺失或受外界干扰的情况^[27]。本文引入灰色预测模型GM(1,1)模型，以2014—2023年种植业碳排放量构建初始数列，对山东省2024—2033年的种植业碳排放量开展趋势预测。由于菏泽市部分年份碳排放量出现异常，预测精度较低，因此菏泽市预测时选用2016—2023年8 a数据进行预测。

$$\frac{dX_1}{dt} + aX_1 = \mu \quad (13)$$

$$x_1(k+1) = \left[x_0(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-ak} + \frac{\mu}{a} \quad (14)$$

式中： $X_0 = \{x_0(1), x_0(2) \dots x_0(n)\}$ 为原始时间序列； $X_1 = \{x_1(1), x_1(2) \dots x_1(n)\}$ 为对原始时间序列 X_0 累加处理后生成的新序列； a 代表发展灰数； μ 代表内生控制灰数； $k=1, 2 \dots n$ ；设 a 的估计值 $\hat{a}, \hat{a} = (a/\mu)$ ，利用最小二乘法求解可得 $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n$ ，其中 B 为自变量矩阵； Y_n 为因变量向量，对公式(13)求解得到预测模型公式(14)，最后对灰色预测模型进行精确度检验，根据模型检验结果 p 和 C 判断能否计算出预测值，如果 $p \leq 0.7, C \geq 0.65$ 则需要分析残差序列，重新对公式进行修正。

3 结果与分析

3.1 山东省种植业碳排放时空特征分析

3.1.1 山东省种植业碳排放总量及强度分析

2004—2023年山东省种植业碳排放呈“增加—波动—减少”的M形变化趋势。由图3可知，山东省种植业碳排放具有明显的阶段性特征，大致划分为“迅速增加，平稳波动，稳步下降”3个阶段；在碳排放强度方面，从2004年开始，山东省种植业碳排放强度呈下降趋势，其中几年虽有小幅度回升的趋势，但总体呈下降趋势(图2)。

由表2可以看出，2004—2007年为山东省种植业碳排放迅速增加阶段，种植业碳排放总量从2004年的 1.07×10^7 t增加到2007年 1.15×10^7 t，年平均增长率为2.44%。2008—2014年为平稳波动阶段，在此阶段山东省的种植业碳排放处于稳定阶段，其中化肥利用、农膜投入等农资投入均没有太大的变化，且在作物种植方面也没有明显提升，该阶段山东省的种植业碳排放总体处于平稳状态。2015—2023年为稳步下降阶段，在此阶段，山东省种植业碳排放开始稳步下降，种植业碳排放量从2015年的 1.10×10^7 t下降到2023年的 9.26×10^6 t，年平均下降率为2.09%。在碳排放强度方面，山东省种植业碳排放强

度从 2004 年的 0.567 t/万元持续下降至 2023 年 0.143 t/万元,降幅为 74.78%,年均降幅达到 7%,表明山东省在 20 a 间每单位种植业产值所产生的碳排放量在持续降低,表明山东省种植业生产效率在不断提升,种植业向高质量和可持续发展的方向。

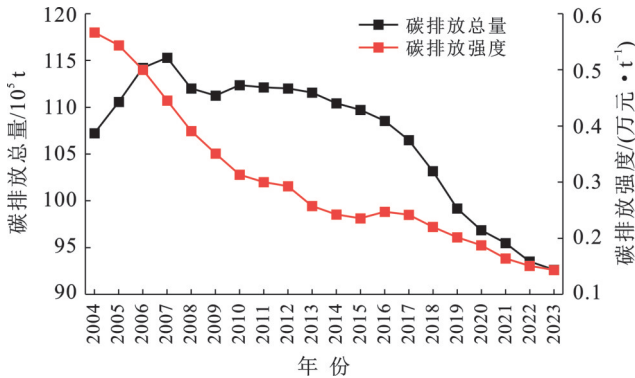


图 2 山东省种植业 2004—2023 年碳排放总量及碳排放强度变化趋势

Fig.2 Changing trends of total carbon emissions and carbon emission intensity in Shandong Province's planting industry from 2004 to 2023

表 2 山东省种植业 2004—2023 年碳排放总量及碳排放强度
Table 2 Total carbon emissions and carbon emission intensity of crop farming in Shandong Province from 2004 to 2023

年份	农资投入 / 10 ⁵ t	作物种植 / 10 ⁵ t	碳排放总量 / 10 ⁵ t	碳排放强度 / (t/万元)
2004	87.90	19.34	107.24	0.567
2005	90.95	19.62	110.57	0.544
2006	94.70	19.53	114.23	0.500
2007	95.37	19.92	115.29	0.445
2008	91.99	20.04	112.03	0.391
2009	90.95	20.29	111.24	0.351
2010	92.04	20.33	112.37	0.313
2011	91.65	20.48	112.13	0.300
2012	91.44	20.59	112.03	0.293
2013	90.73	20.83	111.56	0.257
2014	89.30	21.14	110.44	0.242
2015	88.42	21.30	109.72	0.235
2016	87.38	21.18	108.55	0.247
2017	84.75	21.76	106.51	0.242
2018	81.44	21.74	103.18	0.221
2019	77.72	21.45	99.17	0.202
2020	75.45	21.42	96.87	0.187
2021	73.81	21.69	95.50	0.164
2022	71.85	21.68	93.53	0.151
2023	70.92	21.72	92.64	0.143

3.1.2 山东省种植业碳排放结构特征分析

为进一步分析山东省种植业的碳排放结构特

征,本文从农资投入和作物种植两个方面分析其碳排放结构特征。由图 3 可知,农资投入碳排放量的变化趋势与山东省种植业碳排放总量基本一致,农资投入是山东省种植业碳排放量的主要来源,2004—2023 年山东省农资投入碳排放比例呈现波动下降的趋势,作物种植碳排放量呈现平稳上升趋势。

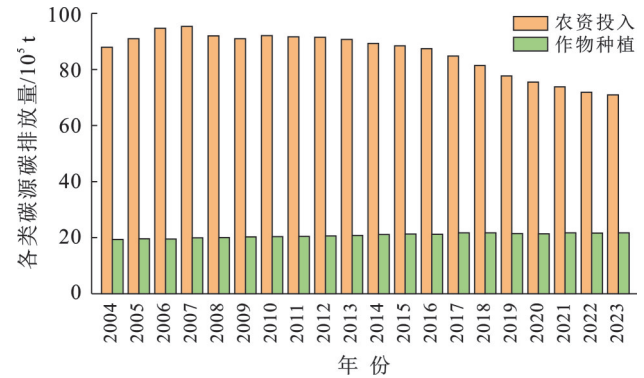


图 3 山东省种植业碳排放结构

Fig.3 Carbon emission structure of planting industry in Shandong Province

山东省农资投入的碳排放因子主要包括化肥、农药、农膜、农用柴油和灌溉。由图 4a 可知,研究期间,化肥碳排放量占比最高,在农资投入中的年均比例为 46.16%,整体呈现“先上升后下降”的变化趋势;其次是农膜使用,占农资投入碳排放的 18.15%,20 a 间呈现波动下降趋势;灌溉平均比例大于 15%,其碳排放持续上升;柴油的碳排放总体上逐年下降,所占比例由 2004 年的 11.30% 缓慢下降至 2023 年的 9.55%;农药的碳排放整体呈现“先上升后下降”变化趋势,比例由 2004 年的 8.64% 上升至 2008 年的 9.30% 后逐渐下降至 2023 年的 7.10%;土地翻耕的碳排放比较稳定,比例约为 0.40% 左右。综上可知,在农资投入中,各因子碳排放量大小及年均比例顺序为:化肥(46.16%)>农膜(18.15%)>灌溉(15.85%)>柴油(11.13%)>农药(8.31%)>翻耕(0.40%)。由此可知,减少农资利用碳排放量的重点在于减少化肥使用量。山东省作物种植的类型主要包括玉米、小麦、蔬菜、水稻、棉花及大豆。由图 4b 可知,玉米是山东省作物种植的碳源结构中的第一大碳排放因子,年均比例 32.24%,总体呈上升趋势;其次是小麦碳排放量,年均比例 29.69%,总体也呈上升趋势;研究期间,蔬菜产生的碳排放呈现先下降后上升再下降的趋势;水稻产生的碳排放呈现逐年下降的趋势,大豆和棉花碳排放量和比例均处于较低水平且平稳波动。综上可知,作物种植结构中,碳排放量及比例大小顺序为:玉米(32.24%)>小麦(29.69%)

>蔬菜(28.16%)>水稻(8.34%)>棉花(1.04%)>大豆(0.53%)。值得注意的是,2017年山东省的作物种植业碳排放结构发生了较大的变化,玉米、蔬菜、

棉花的变动较大,其中玉米碳排放量相较于上一年度显著提升,蔬菜和棉花的碳排放量相较于上年度则出现了显著下降。

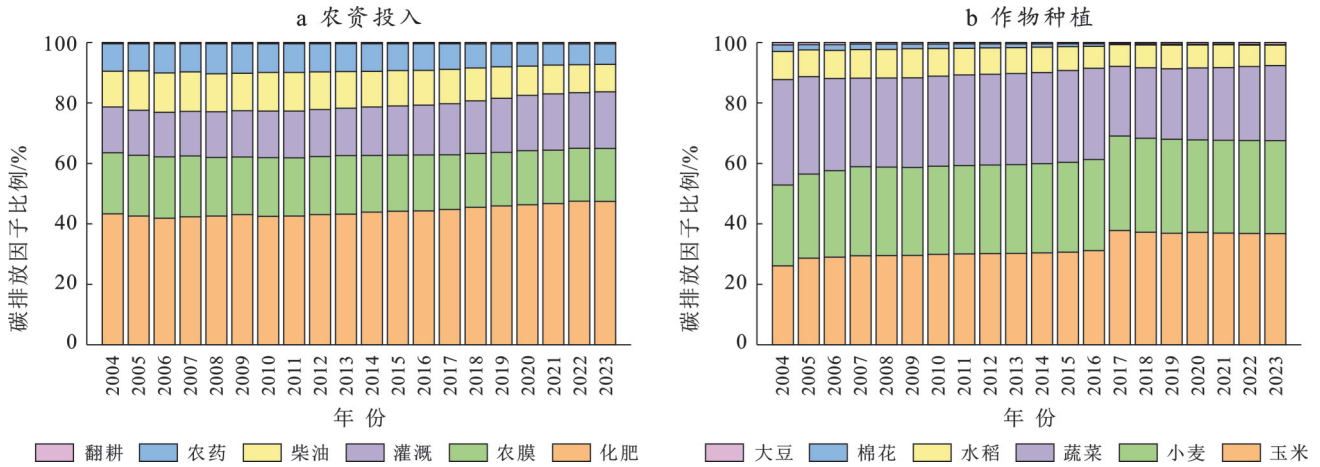


图 4 山东省种植业各碳排放因子比例

Fig.4 Proportion of various carbon emission factors in Shandong Province's planting industry

从市域农资投入碳排放来看(图 5),在 2004—2023 年山东省不同城市农资投入碳排放表现出显著差异,潍坊市、菏泽市和临沂市长期处于高位,这是由于这些城市是山东省传统的农业大市。值得注意的是,潍坊市下辖的寿光市作为“中国菜都”,自古以来都将种植业作为支柱性产业,使得潍坊市种植业碳排放量一直居高不下,处于高碳排放地市。相比之下,淄博市、东营市和日照市等部分城市的农资投入碳排放相对较低,这些城市的耕地面积较小,其碳

排放总量较低;整体来看,山东省多数城市的农资投入碳排放总量较为平稳,波动幅度较小,表明种植业生产在农资投入方面具有一定的稳定性。在作物种植方面,山东省各城市作物种植碳排放情况复杂多变,菏泽市、济宁市和临沂市作物种植的碳排放量较高,这与当地以小麦和玉米为主的种植结构和种植规模有关,威海市、日照市和淄博市等城市则处于较低水平;整体来看,研究期间山东省各市作物种植碳排放呈明显的空间分异特征。

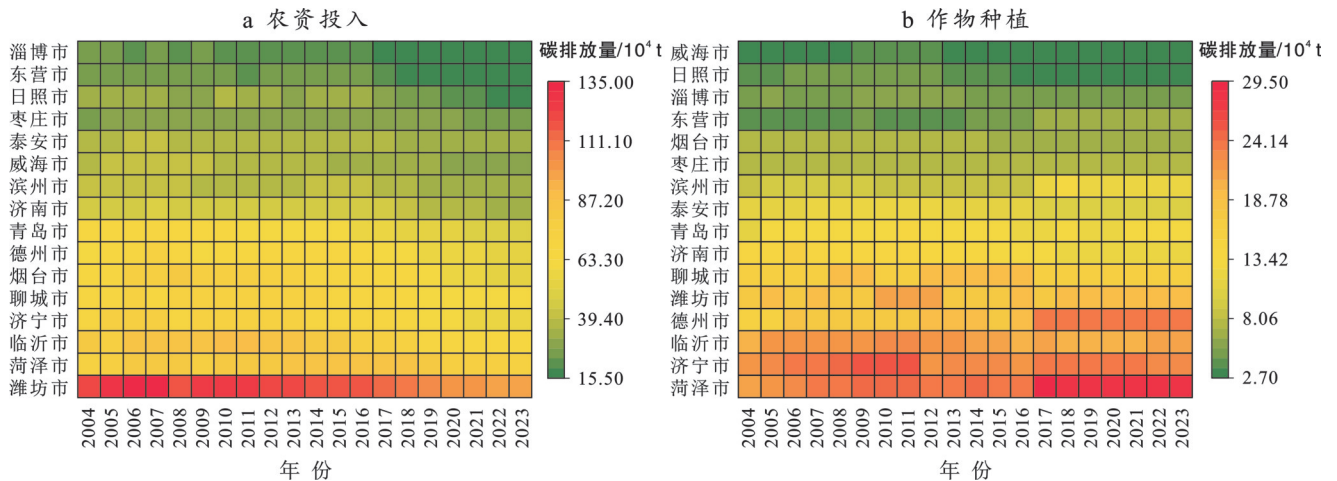


图 5 山东省各市 2004—2023 年碳源排放量热力图

Fig.5 Heatmap of carbon emissions from various carbon sources in cities of Shandong Province from 2004 to 2023

3.1.3 山东省种植业碳排放空间特征分析

为进一步探明山东省 16 个市的种植业碳排放空间演变格局特征,本文选取 2004,2009,2014,2019 和

2023 年每隔 5 a 的种植业碳排放量数据,采用 ArcGIS 软件自然断点法,将山东省种植业碳排放划分为低碳排放区(0~3.00×10⁵ t)、较低碳排放区

($3.00 \times 10^5 \sim 5.50 \times 10^5$ t)、中碳排放区($5.50 \times 10^5 \sim 8.00 \times 10^5$ t)、较高碳排放区($8.00 \times 10^5 \sim 1.05 \times 10^6$ t)、

高碳排放区($> 1.05 \times 10^6$ t)5 种类型,划分结果如图 6 所示。

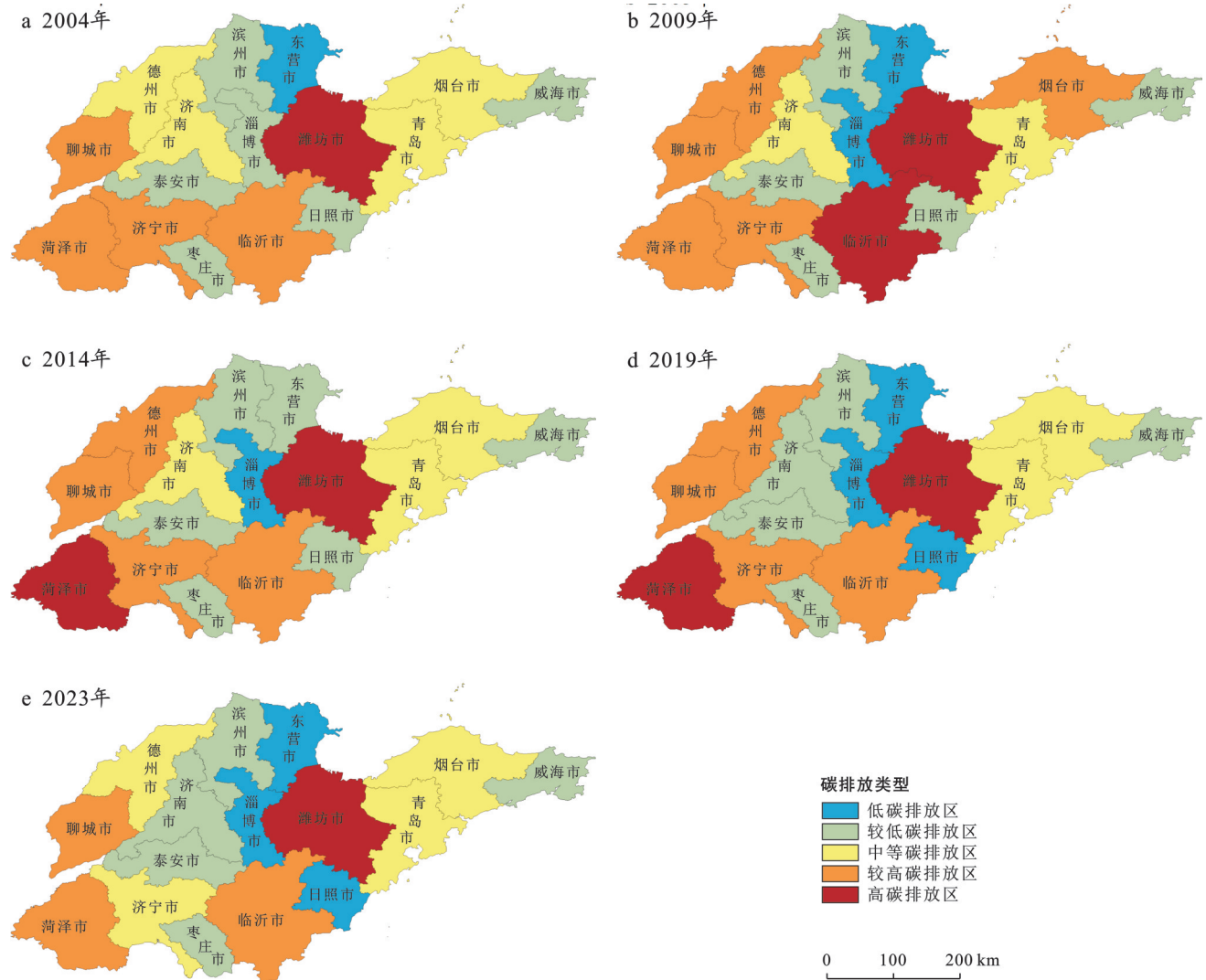


图 6 山东省市域尺度种植业碳排放量时空演变

Fig.6 Spatial and temporal evolution of carbon emissions from planting industry at municipal scale in Shandong Province

从空间分布特征来看(图 6),2004 年,潍坊市种植业碳排放量居于山东省首位,东营市为低碳排放区,低碳和较低碳排放区主要集中在山东省的中部地区;2004—2009 年山东省高碳排放区从 1 个增加到 2 个,淄博市由较低碳区转化为低碳区,此时山东省低碳排放区有淄博市和东营市 2 个市。2009—2014 年山东省高碳排放区数量保持不变,但是临沂市由高碳排放区转变为较高碳排放区,菏泽市由较高碳排放区转为高碳排放区,东营市由传统的低碳排放区转化为较低排放碳区,山东省低碳排放区只有淄博市。2014—2019 年山东省高碳排放区城市保持不变,这一时期,山东省出现 3 个低碳排放区,表明山东省种植业碳排放开始逐步降低。2019—2023 年菏泽市由高碳排放区转化为较高碳排放区,

德州市和济宁市由较高碳排放区转变为中碳排放区,其他地市均未出现增长的趋势,表明山东省种植业碳排放量进一步降低。在碳排放强度方面,研究期间山东省种植业碳排放强度呈现明显空间差异化特征。

3.2 山东省种植业碳排放脱钩效应分析

为了探明种植业碳排放与种植业经济增长的脱钩关系,本文基于 Tapio 脱钩模型分析山东省 2004—2023 年种植业碳排放与种植业经济增长的脱钩关系(表 3)。

由表 3 可知,山东省种植业碳排放总体上呈“弱脱钩”向“强脱钩”转变的过程。2004—2014 年山东省种植业碳排放与经济增长的关系发生显著改变。“强脱钩”年份中,种植业经济增长的同时,碳排放实

现负增长,说明山东省种植业生产在技术革新、能源利用效率提升等方面取得积极进展,逐渐摆脱对高碳排放的依赖;而2009年呈现弱脱钩,碳排放虽有增长,但速度远低于经济增长,表明种植业经济增长对碳排放的依赖程度在降低,整体朝着绿色低碳方向稳步迈进。2015—2023年即便面临经济与市场环境的复杂变化,山东省仍旧实现了“强脱钩”,持续的强脱钩意味着种植业经济增长与碳排放进一步实现良性分离,说明山东省在种植业绿色发展政策推行、节能减排技术普及等方面成效显著。

从市域尺度来看,将山东省种植业碳排放分为4个阶段(图7)。具体来看,2004—2008年只有济南、淄博、潍坊和日照4个城市为强脱钩,其他地级市均表现为弱脱钩;2009—2013年山东省种植业碳排放依然只有弱脱钩和强脱钩,其中菏泽、聊城、德州、东营和日照市依旧为弱脱钩,其他地市均转为强脱钩;2014—2018年山东省种植业碳排放脱钩效应表现相对复杂,这一阶段山东省种植业碳排放出现了5种脱钩模式,菏泽表现为弱脱钩,聊城、滨州、威海市表现为弱负脱钩,德州和枣庄市表现为衰退连接,济南、东营、济宁、潍坊和临沂市表现为衰退脱钩,淄博、泰安、日照、烟台、青岛市表现为强脱钩;2019—2023年山东省种植业所有地市均表现为强脱钩。结合山东省各地级市的情况,说明山东省种植业碳排放整体

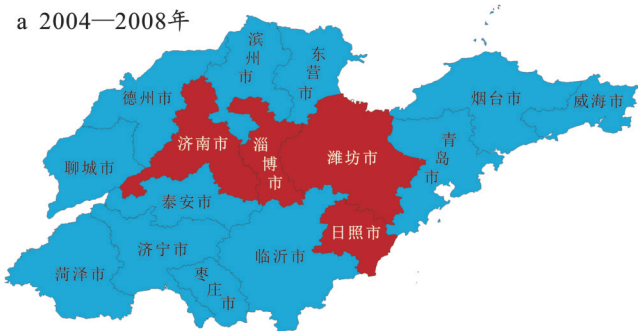
是由弱脱钩向强脱钩转变的过程,这与山东省种植业碳排放整体脱钩效应相吻合。

表3 山东省2004—2023年种植业碳排放与经济增长的脱钩关系

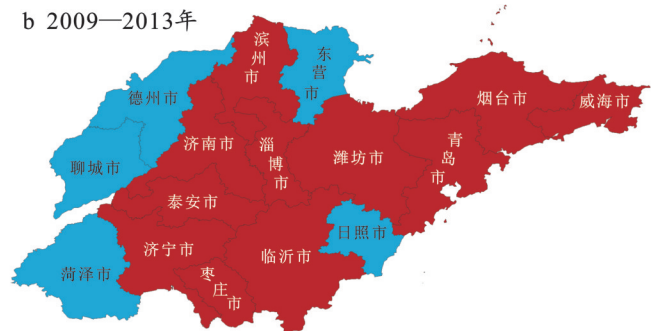
Table 3 Decoupling relationship between carbon emissions from planting industry and economic growth in Shandong Province from 2004 to 2023

年份	$\Delta C/C$ (碳排放增长)	$\Delta G/G$ (GDP增长)	Z值 (脱钩指数)	状态
2004—2005	0.031 1	0.075 2	0.413 0	弱脱钩
2005—2006	0.033 1	0.122 6	0.269 8	弱脱钩
2006—2007	0.009 3	0.134 1	0.069 4	弱脱钩
2007—2008	-0.028 3	0.105 7	-0.267 5	强脱钩
2008—2009	-0.007 0	0.107 1	-0.065 7	强脱钩
2009—2010	0.010 2	0.132 0	0.077 2	弱脱钩
2010—2011	-0.002 2	0.041 4	-0.053 1	强脱钩
2011—2012	-0.000 9	0.024 7	-0.036 1	强脱钩
2012—2013	-0.004 1	0.132 3	-0.031 3	强脱钩
2013—2014	-0.010 1	0.050 8	-0.197 8	强脱钩
2014—2015	-0.006 6	0.023 4	-0.281 2	强脱钩
2015—2016	-0.010 6	-0.059 0	0.179 6	弱负脱钩
2016—2017	-0.018 9	0.003 6	-5.264 7	强脱钩
2017—2018	-0.031 2	0.062 5	-0.499 8	强脱钩
2018—2019	-0.038 8	0.050 5	-0.769 3	强脱钩
2019—2020	-0.023 2	0.051 7	-0.449 9	强脱钩
2020—2021	-0.014 2	0.125 0	-0.113 2	强脱钩
2021—2022	-0.020 6	0.067 4	-0.305 6	强脱钩
2022—2023	-0.009 5	0.041 2	-0.231 2	强脱钩

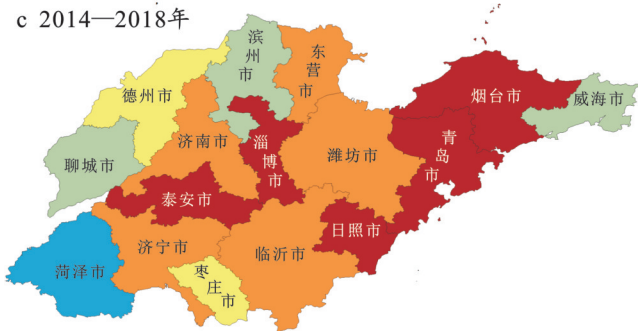
a 2004—2008年



b 2009—2013年



c 2014—2018年



d 2019—2023年



脱钩状态 弱脱钩 弱负脱钩 衰退连接 衰退脱钩 强脱钩

图7 山东省各市种植业碳排放与经济增长的脱钩关系分布

Fig.7 Distribution of decoupling relationship between carbon emissions from planting industry and economic growth in cities of Shandong Province

3.3 山东省种植业碳排放量驱动因素分析

为了探明影响山东省种植业碳排放的驱动因素,本文依据 LMDI 模型得到山东省种植业碳排放影响因素分解结果(表 4)可知,种植业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、农村人口规模对种植业碳排放具有负向驱动作用。研究期间,种植业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、农村人口规模的碳排放量分别减少了 1.47×10^7 t, 7.54×10^5 t, $7.07 \times$

10^6 t, 5.86×10^6 t, 其中,种植业生产效率的贡献度最高,是最显著的负向驱动因素。地区经济水平和城镇化水平对种植业碳排放具有正向的驱动作用,研究期间,其碳排放量分别累计增加了 2.00×10^7 t 和 6.98×10^6 t。总体来看,山东省种植业碳排放影响因素的碳减排效应排序为:地区经济水平 > 种植业生产效率 > 地区产业结构 > 城镇化水平 > 农村人口规模 > 农业产业结构。

表 4 山东省 2004—2023 年种植业碳排放影响因素分解结果
Table 4 Decomposition results of influencing factors of carbon emissions from planting industry in Shandong Province from 2004 to 2023

年份	贡献值/ 10^5 t					
	种植业生产效率	农业产业结构	地区产业结构	地区经济水平	城镇化水平	农村人口规模
2004—2005	-4.56	-0.82	-10.98	19.12	3.17	-2.59
2005—2006	-9.34	3.86	-10.36	18.64	1.05	-0.20
2006—2007	-13.38	-3.68	-2.59	19.92	3.59	-2.80
2007—2008	-14.69	-6.90	-1.75	19.51	1.50	-0.95
2008—2009	-12.15	4.22	-2.45	8.93	-0.12	0.80
2009—2010	-12.73	2.77	-4.38	14.44	4.96	-3.93
2010—2011	-4.80	-7.38	-3.91	15.20	1.67	-1.03
2011—2012	-2.83	-4.78	-3.13	10.77	1.61	-1.74
2012—2013	-14.35	3.53	-0.51	10.50	1.93	-1.56
2013—2014	-6.62	0.31	-2.57	6.22	1.95	-0.41
2014—2015	-3.27	-1.02	-5.81	8.53	7.96	-7.12
2015—2016	5.47	-4.16	-9.13	5.56	2.47	-1.37
2016—2017	-2.43	-0.38	-6.74	6.56	2.49	-1.54
2017—2018	-9.68	3.44	-2.98	4.98	1.56	-0.65
2018—2019	-8.99	2.07	-2.83	5.22	-2.04	2.56
2019—2020	-7.24	-0.18	2.03	2.86	0.87	-0.64
2020—2021	-12.70	-0.03	-1.11	12.29	30.90	-30.72
2021—2022	-8.13	0.86	0.09	5.34	1.54	-1.66
2022—2023	-4.65	0.73	-1.63	4.94	2.71	-2.99
总量	-147.08	-7.54	-70.73	199.51	69.79	-58.56

3.4 山东省未来 10 a 种植业碳排放量预测

碳排放量预测是碳排放控制的重要抓手,本文通过灰色预测模型 GM(1,1),得到山东省未来 10 a 的种植业碳排放量。由表 5 可知,山东省未来 10 a 的种植业碳排放量呈下降趋势,从省域尺度来看,2007 年山东省种植业碳排放已达峰值(1.15×10^7 t)。在市域尺度,16 个地级市的种植业碳排放量也均呈下降趋势,其中日照市下降幅度最大,枣庄市下降幅度最小,山东省未来 10 a 种植业碳排放量整体呈现下降趋势。这表明山东省当前种植业碳减排政策和低碳农业技术已取得一定的成效,并且为今后一段时间种植业碳减排和农业低碳化发展奠定了坚实的基础。未来,山东省要实现种植业碳排放量的持续下

降,还需进一步强化农民减碳意识。通过多元化政策组合和多样化低碳农业技术应用推广,形成政策与技术合力,进一步加大种植业碳减排力度,以期更好地推进山东省种植业绿色低碳高效发展。

4 讨论

本文探究了山东省种植业碳排放的时空特征、影响因素及未来趋势,从碳排放总量来看,山东省种植业碳排放呈“增加—波动—减少”的 M 形变化趋势,碳排放强度持续减小,这与郭美洁等^[7]和刘杨等^[28]的研究结果基本一致,但本文将种植业结构进行了细化,研究发现玉米是种植结构中第一大碳源,而且发现小麦和蔬菜对种植业碳排放的影响也较

大。从脱钩效应来看,山东省种植业碳排放从初期的弱脱钩转变为后期的强脱钩,表明山东省种植业碳排放与经济发展形成了良性发展的状况,这与魏振香等^[29]的研究结果基本吻合。从空间分布特征来看,山东省种植业碳排放总量主要集中在菏泽市、潍坊市、临沂市等传统农业大市。因此,未来山东省的种植业碳减排仍需重点关注这些高碳排放区域,这一结论与杜鹏等^[30]研究山东省农业碳排放的结果相吻合,但是本文从种植业角度出发研究碳排放更具针对性。在影响因素方面,与以往研究不同的是,本文借鉴宁静等^[13]的研究,从种植业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济水平、城镇化水平和农村人口规模6个方面解析山东省种植业碳排放的驱动因素。研究发现,种植业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、农村人口规模4个因素对山东省种植业碳排放具有抑制作用,种植业生产效率主要靠技术进步和集约化经营减少碳排放,优化种植制度避免粗放扩张,可以降低单位产出碳排放;农业产业结构则是通过产业协同和内部调整抑制碳排放,通过多元农业模式减少化肥等使用,调整作物结构降低高碳种植占比等方式促进碳排放减少;在地区

产业结构方面,非农业产业发展助力山东省种植业降碳,产业升级减少粗放种植压力,工业、服务业提供低碳技术和服,从而实现间接减碳;农村人口规模方面,人口减少推动规模化经营,便于统一用低碳技术,避免小农户分散种植的资源浪费,从而实现减碳效应。地区经济水平和城镇化水平则具有促进作用,地区经济水平主要是居民的需求扩张与高碳投入促排放,经济水平的发展促进了消费者对农产品需求,农产品生产靠扩大规模,增加投入满足消费者,低碳技术应用滞后,从而导致碳排放量增加;城镇化水平则是通过城镇人口增加从而促进农产品需求,而种植业主要依靠高投入保障供应,从而导致集约化种植能耗高,使其成为促进碳排放的重要因素。本文通过GM(1,1)模型,对山东省种植业碳排放进行预测,从趋势预测来看,2024—2033年山东省和各地市的种植业碳排放均整体呈下降趋势,其中,枣庄市下降幅度最小,日照市下降幅度最大;然而需要注意的是,碳排放总量的下降并不意味着减排压力的减轻,山东省作为中国重要的种植业生产区,其种植业碳排放仍将保持较高水平,尤其是在菏泽市、潍坊市、临沂市等传统农业大市。

表5 山东省未来10 a种植业碳排放预测结果

Table 5 Forecast results of carbon emissions from planting industry in Shandong Province for next 10 years

地级市	碳排放量/10 ⁵ t									
	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年	2031年	2032年	2033年
济南	4.35	4.21	4.07	3.93	3.80	3.68	3.55	3.44	3.32	3.21
青岛	5.99	5.87	5.75	5.63	5.51	5.40	5.29	5.18	5.08	4.97
淄博	1.94	1.88	1.83	1.78	1.73	1.68	1.63	1.59	1.54	1.50
枣庄	3.48	3.44	3.40	3.36	3.31	3.27	3.23	3.19	3.15	3.12
东营	2.18	2.11	2.04	1.97	1.91	1.85	1.78	1.73	1.67	1.61
烟台	5.68	5.49	5.31	5.13	4.96	4.79	4.63	4.48	4.33	4.18
潍坊	11.06	10.80	10.54	10.28	10.03	9.79	9.55	9.32	9.09	8.87
济宁	7.74	7.58	7.43	7.27	7.12	6.97	6.83	6.69	6.55	6.41
泰安	4.02	3.94	3.86	3.78	3.71	3.64	3.56	3.49	3.42	3.36
威海	3.08	3.01	2.94	2.88	2.81	2.75	2.69	2.63	2.57	2.51
日照	1.94	1.80	1.67	1.55	1.44	1.34	1.25	1.16	1.08	1.00
临沂	8.09	7.88	7.69	7.49	7.31	7.12	6.94	6.77	6.60	6.43
德州	7.61	7.49	7.38	7.28	7.17	7.06	6.96	6.86	6.76	6.66
聊城	7.77	7.63	7.50	7.37	7.25	7.12	7.00	6.88	6.77	6.65
滨州	4.35	4.28	4.20	4.13	4.06	3.98	3.91	3.85	3.78	3.71
菏泽	10.19	10.05	9.91	9.78	9.64	9.51	9.38	9.26	9.13	9.01
总量	89.47	87.46	85.52	83.61	81.76	79.95	78.18	76.52	74.84	73.20

与已有种植业碳排放局限于总量测算和影响因素的研究相比,本研究更加注重碳排放的时空格局

与未来演进,综合运用ArcGIS空间分析技术与灰色预测GM(1,1)模型,对山东省16个地市的种植业碳

排放进行时空演变刻画及趋势预测,既弥补了仅从时间序列分析的局限性,更填补了对山东省种植业碳排放预测不足的空白。尽管如此,本文仍存在一定局限性,本文数据主要来源于统计年鉴,针对山东省主要作物类型进行测算,受数据可获性限制,未涵盖零星作物种植,可能导致结果存在偏差;其次,模型未引入气候变化、政策突变等外生变量,对其潜在影响未作充分考量。未来研究应融合遥感监测、农户调查及土壤普查数据,开展种植业全生命周期碳排放效应评估,以期对山东省种植业低碳转型提供更为系统与精准的科学支撑。

5 结论

(1) 山东省种植业碳排放总量与强度均呈下降趋势,2004—2023年山东省种植业碳排放总量呈“增加—波动—减少”的M形变化趋势,碳排放强度从0.567 t/万元降至0.143 t/万元,呈现波动下降趋势。农资投入是种植业碳排放的主要来源,占比约为80%,其中化肥为最大的碳排放来源,农膜和灌溉次之,这与山东省长期依赖化肥增产的传统种植模式密切相关;在作物种植中,玉米是第一大碳源,小麦次之,说明山东省以玉米与小麦为主的粮食种植结构对碳排放的主导作用。

(2) 山东省市域种植业碳排放空间分异显著,脱钩状态升级印证“经济—减排”良性互动,这得益于山东省种植业技术革新、绿色政策的持续发力,标志着山东省种植业“经济增长不依赖碳排放增加”的良性发展格局初步形成。从市域尺度看,高碳排放区域长期集中于潍坊、菏泽、临沂等传统农业大市,主要是这些地市耕地面积广、种植规模大且传统高碳作物占比高;而淄博、东营等城市因耕地规模小、产业结构偏向非农产业,碳排放持续处于低位。

(3) 种植业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、农村人口规模是山东省种植业碳排放的主要抑制因素,生产效率提升通过技术降碳贡献最大减排量;农业产业结构与地区产业结构优化通过降低种植业占比,推动非农产业反哺低碳农业间接减碳;农村人口规模缩减则促进规模化种植,减少分散经营的资源浪费。地区经济水平与城镇化水平是主要的促进因素,因经济增长初期依赖“扩规模,增投入”满足农产品需求,低碳技术应用滞后于需求扩张,城镇化则通过推高农产品消费间接带动种植规模与碳排放增加。

(4) 灰色预测GM(1,1)结果显示,2024—2033年山东省及16个地市种植业碳排放均呈下降趋势,表

明山东省当前减排政策已形成长效机制,但区域降幅差异显著,根源在于各地市转型基础不同,日照因耕地规模小,非农产业占比高,减排阻力小;枣庄则因传统粮食种植依赖度高,低碳技术渗透慢,减排进度相对滞后,未来需针对不同区域制定差异化减排策略。

6 建议

基于以上分析,为助力种植业低碳转型发展和“双碳”目标实现,结合山东省种植业现状,提出以下减碳增汇建议。

(1) 聚焦高排放区域,实施差异化减排策略,针对菏泽、潍坊、临沂等传统农业大市碳排放高的特点,山东省应制定区域差异化的碳减排目标与路径,按照《加快建设农业强国规划(2024—2035年)》的要求,引入低碳品种和节水灌溉技术,降低单位面积碳排放,逐步减少碳排放强度高的作物种植比例,增加大豆等低排放作物的种植面积。

(2) 强化农资投入管控,推动化肥减量与替代,化肥是山东省种植业碳排放的最大来源,应大力推进有机肥替代,缓释肥应用等技术,建立化肥使用总量控制和效率提升的双控机制,在农膜使用重点区域,推广全生物降解地膜和可再次利用地膜,减少残留污染与碳排放。

(3) 提升种植业绿色生产效率,推动技术集成示范,依托山东省农业科技创新平台,研发推广节能农机、智能灌溉系统、保护性耕作等低碳技术。在鲁西南平原等重点区域建立绿色生产示范区,推广市域绿色有机肥,减少农药投入使用量,同时,结合农业信息化手段,建立碳排放智能监测与管理平台,实现精准减排。

(4) 完善政策激励与监测体系,强化制度保障,政府加强政策引导与支持,制定完善的低碳农业发展政策体系,支持农业低碳技术研发、示范推广和应用,建立健全农业碳排放监测体系,准确掌握农业碳排放动态,为政策制定和实施提供科学依据。

参考文献(References)

- [1] 黄浚婷,钟业喜,毕曼玉.鄱阳湖流域土地利用变化对碳源/汇时空格局的影响[J].长江流域资源与环境,2025(3):546-557.
Huang Yuanting, Zhong Yexi, Bi Manyu. Effects of land use change on spatio-temporal pattern of carbon source/sink in Poyang Lake basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2025(3):546-557.
- [2] 杨晨,张燕媛.粮食主产区农业碳排放效率与粮食安全

- 耦合研究[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(7): 12-27.
- Yang Chen, Zhang Yanyuan. Study on the coupling of agricultural carbon emission efficiency and food security in major grain-producing areas [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024, 45(7): 12-27.
- [3] 闫帅, 陈玉成, 蒋乙玮, 等. 重庆市农业投入品碳排放特征、影响因素及脱钩分析[J]. 中国生态农业学报, 2025, 33(5): 847-857.
- Yan Shuai, Chen Yucheng, Jiang Yiwei, et al. Characteristics, influencing factors and decoupling analysis of carbon emissions of agricultural input in Chongqing [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(5): 847-857.
- [4] Tang Kai, Ma Chunbo. The cost-effectiveness of agricultural greenhouse gas reduction under diverse carbon policies in China [J]. China Agricultural Economic Review, 2022, 14(4): 758-773.
- [5] Yang Jieqiong, Luo Panzhu. Review on international comparison of carbon financial market [J]. Green Finance, 2020, 2(1): 55-74.
- [6] 高旺盛, 陈源泉, 王小龙, 等. 中国种植业碳中和技术路径探讨与对策建议[J]. 农业现代化研究, 2022, 43(6): 941-947.
- Gao Wangsheng, Chen Yuanquan, Wang Xiaolong, et al. Discussion of the technical path and the countermeasures on the carbon neutralization of crop planting sector in China [J]. Research of Agricultural Modernization, 2022, 43(6): 941-947.
- [7] 郭美洁, 刘波涛, 郭紫璇, 等. 山东省种植业碳排放因素分解及脱钩效应研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(4): 320-327.
- Guo Meijie, Liu Botao, Guo Zixuan, et al. Research on decomposition of carbon emission factors and decoupling effect of cultivation in Shandong Province [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(4): 320-327.
- [8] Sun Tao, Li Ran, Zhao Zichao, et al. Spatio-temporal dynamics, driving mechanisms, and decoupling evaluation of farmland carbon emissions: A case study of Shandong Province, China [J]. Sustainability, 2025, 17(15): 6876.
- [9] 郭玮, 胡西武, 丁芬菱. 2000—2021年青海省农牧业碳排放驱动因素及脱钩效应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 347-355.
- Guo Wei, Hu Xiwu, Ding Fenling. Driving factors and decoupling effects of carbon emissions from agriculture and animal husbandry in Qinghai Province during 2000—2021 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 347-355.
- [10] 马海清, 陈强强. 甘肃省农业碳排放时空分异特征及影响因素[J]. 干旱区地理, 2025, 48(5): 879-892.
- Ma Haiqing, Chen Qiangqiang. Spatial-temporal differentiation characteristics and influencing factors of agricultural carbon emissions in Gansu Province [J]. Arid Land Geography, 2025, 48(5): 879-892.
- [11] 王宝, 赵子钰. 基于STIRPAT模型的贵州省农村金融发展对农业碳排放的影响研究[J]. 农业与技术, 2023, 43(7): 144-147.
- Wang Bao, Zhao Ziyi. Study on the impact of rural financial development on agricultural carbon emissions in Guizhou Province based on STIRPAT model [J]. Agriculture & Technology, 2023, 43(7): 144-147.
- [12] 徐玥, 王辉, 韩秋凤. 徐州市农业碳排放时空特征与脱钩效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 395-403.
- Xu Yue, Wang Hui, Han Qiufeng. Spatial-temporal characteristics and decoupling effects of agricultural carbon emissions at Xuzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 395-403.
- [13] 宁静, 李亚洁, 王震, 等. 中国粮食主产区农业碳排放特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 450-459.
- Ning Jing, Li Yajie, Wang Zhen, et al. Characteristics and influencing factors of agricultural carbon emissions in major grain producing provinces in China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 450-459.
- [14] Javed S A, Zhu Bangzhu, Liu Sifeng. Forecast of bio-fuel production and consumption in top CO₂ emitting countries using a novel grey model [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123997.
- [15] 张小蓉, 杨燕. 山西省农业碳排放演化趋势及影响因素研究[J/OL]. 中国农业资源与区划, 2025: 1-15. (2025-03-13). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20250313.1426.016.html>.
- Zhang Xiaorong, Yang Yan. Research on the evolution trend and influencing factors of agricultural carbon emissions in Shanxi Province [J/OL]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025: 1-15. (2025-03-13). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20250313.1426.016.html>.
- [16] 高亚培, 刘玮, 李成英, 等. 青藏高原高寒区“三生空间”演变及碳排放多情景模拟: 以青海省为例[J]. 环境科学, 2025, 46(8): 4923-4933.
- Gao Yapei, Liu Wei, Li Chengying, et al. Evolution of production-living-ecological spaces and multi-scenario simulation of carbon emissions in the Qinghai-Tibet Plateau vulnerable region: A case study of Qinghai Province, China [J]. Environmental Science, 2025, 46(8):

- 4923-4933.
- [17] 赵玉,陈霖波,张玉,等.中国粮食种植业碳效应时空演化及碳排放公平性[J].生态学报,2024,44(12):5059-5069.
Zhao Yu, Chen Linbo, Zhang Yu, et al. Spatial and temporal evolution of carbon effect and carbon equity of grain planting industry in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(12):5059-5069.
- [18] 索瑞霞,王琪,张帆,等.黄河流域种植业碳排放的脱钩效应及影响因素分析[J].环境科学研究,2025,38(2):220-230.
Suo Ruixia, Wang Qi, Zhang Fan, et al. Study on the decoupling effect and drivers of carbon emissions from plantations in the Yellow River basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2025,38(2):220-230.
- [19] 贾 Luhao, Wang Mingya, Yang Shili, et al. Analysis of agricultural carbon emissions and carbon sinks in the Yellow River basin based on LMDI and tapio decoupling models [J]. *Sustainability*, 2024,16(1):16010468.
- [20] 曹俊文,谢雨欣.长江经济带种植业碳源/汇空间特征及公平性研究[J].生态经济,2023,39(9):108-113.
Cao Junwen, Xie Yuxin. Study on spatial characteristics and equity of carbon sources/sinks of plantation industry in Yangtze River economic zone [J]. *Ecological Economy*, 2023,39(9):108-113.
- [21] 宋宏恩,姜常宜,李树超,等.山东省种植业碳排放度量分析[J].中国农学通报,2023,39(8):43-50.
Song Hongen, Jiang Changyi, Li Shuchao, et al. Measurement and analysis of carbon emissions of Shandong planting industry [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023,39(8):43-50.
- [22] 白桦锐,裴健宇,王琪,等.黄河流域九省区农业碳排放的驱动因素及预测[J].水土保持通报,2025,45(4):244-255.
Bai Huarui, Pei Jianyu, Wang Qi, et al. Driving factors and prediction of agricultural carbon emissions in nine provinces of Yellow River basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025,45(4):244-255.
- [23] 闵继胜,胡浩.中国农业生产温室气体排放量的测算[J].中国人口·资源与环境,2012,22(7):21-27.
Min Jisheng, Hu Hao. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China [J]. *China Population Resources and Environment*, 2012,22(7):21-27.
- [24] 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.
Wu Fenlin, Li Lin, Zhang Hailin, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12):2035-2039.
- [25] 刘杨,刘鸿斌.山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析[J].中国生态农业学报,2022,30(4):558-569.
Liu Yang, Liu Hongbin. Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022,30(4):558-569.
- [26] 钟妮栖,夏瑞,张慧,等.黄河流域城市群水资源利用与经济发展脱钩关系研究[J].环境科学研究,2024,37(1):102-113.
Zhong Nixi, Xia Rui, Zhang Hui, et al. Research on the decoupling relationship between water resources utilization and economic development in urban agglomerations of the Yellow River basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024,37(1):102-113.
- [27] 郝仪佳,夏咏,张扬,等.西北地区水—能源—粮食系统耦合协调发展时空动态及预测分析[J].水土保持研究,2025,32(3):251-259.
Hao Yijia, Xia Yong, Zhang Yang, et al. Research and forecast analysis on the coupling coordinated development of water-energy-food system in Northwest China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025,32(3):251-259.
- [28] 刘杨,代雪静,杨晓钰,等.2000—2020年山东省种植业碳排放量及碳汇量时空差异分析[J].四川环境,2023,42(5):317-326.
Liu Yang, Dai Xuejing, Yang Xiaoyu, et al. Spatial and temporal characteristics of carbon emission and carbon sink of planting industry in Shandong Province from 2000 to 2020 [J]. *Sichuan Environment*, 2023,42(5):317-326.
- [29] 魏振香,吴晓娟.山东省农业低碳发展及驱动因素分析[J].河南科学,2021,39(11):1878-1886.
Wei Zhenxiang, Wu Xiaojuan. Low-carbon agricultural development and driving factors in Shandong Province [J]. *Henan Science*, 2021,39(11):1878-1886.
- [30] 杜鹏,董文姗,周东旭.山东省农业碳排放空间演化及对策研究[J].现代农业,2024,49(3):14-23.
Du Peng, Dong Wenshan, Zhou Dongxu. Research on the spatial evolution and countermeasures of agricultural carbon emissions in Shandong Province [J]. *Modern Agriculture*, 2024,49(3):14-23.