



山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析

刘 杨, 刘鸿斌

Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province

LIU Yang and LIU Hongbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20210582>

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 con–vergence 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

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

基于LUCC的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究

Carbon emission and ecological compensation of main functional areas in Sichuan Province based on LUCC

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(1): 142–152

低碳绩效测度与动态效应研究——以山东省种植业为例

Low carbon performance measurement and dynamic effects: A case study of the planting industry in Shandong Province

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(3): 581–589

BP神经网络算法在河西绿洲玉米生产碳排放评估中的应用及算法有效性研究

Application and validity of BP neural networks on prediction of carbon emissions from corn production in Hexi Oasis

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(8): 1100–1106



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20210582

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(中英文), 2022, 30(4): 558–569
LIU Y, LIU H B. Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 558–569

山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析

刘 杨¹, 刘鸿斌²

(1. 山东省济南生态环境监测中心 济南 250101; 2. 山东省鲁商建筑设计有限公司 济南 250100)

摘 要: 利用 IPCC 经典碳排放计算理论, 基于农资投入、农田利用及畜禽养殖 3 类主要碳源, 测算了山东省 2000—2020 年农业碳排放量, 采用 LMDI 模型开展影响因素分析, 并运用灰色预测模型 GM(1, 1) 预测 2021—2045 年碳排放量。结果表明: 2020 年山东省农业碳排放量为 1.58×10^7 t, 农业碳排放强度为 $0.205 \text{ t} \cdot (10^4 \text{ ¥})^{-1}$ 。2000—2020 年山东省农业碳排放总量呈先上升后波动下降趋势, 农业碳排放强度逐年降低。农业碳排放源类贡献率由高到低依次为农资投入、畜禽养殖和农田土壤利用。2000—2020 年 16 地市农业碳排放量及排放强度均呈现一定的区域差异, 且有扩大趋势, 菏泽农业碳排放量和平均碳排放强度均居首位。农业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、劳动力因素对碳减排起到一定作用, 地区经济发展水平和城镇化率因素为农业碳排放量增加的主要因素。预测结果表明, 山东省农业碳排放量在 2030 年前已达到峰值, 济南、青岛等 9 市农业碳排放量在 2030 年前已达峰, 枣庄、东营等 7 市在 2030 年前未达峰, 并针对山东省农业碳排放特征及影响因素提出减排建议。

关键词: 农业碳排放; 碳达峰; 碳排放强度; 碳排放源; 碳减排

中图分类号: F323; X196

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province

LIU Yang¹, LIU Hongbin²

(1. Jinan Ecological and Environmental Monitoring Center, Shandong Province, Jinan 250101, China; 2. Shandong Lushang Commercial Architectural Design Co. Ltd, Jinan 250100, China)

Abstract: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report indicated that human-induced climate change has already affected many weather and climate extremes in every region across the globe. Greenhouse gases (GHG) produced via the process of agricultural production constitute a large proportion of the total GHG emissions from worldwide production activities. Therefore, estimation of agricultural GHG emissions, analysis of the influencing factors, and prediction of the peak are important. Based on the classical IPCC carbon emission calculation theory, agricultural carbon emissions were estimated for Shandong Province from 2000 to 2020 by using agricultural material input, livestock and poultry breeding, and agricultural soil utilization. The influence factor decomposition was conducted based on Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI), and the agricultural carbon emissions from 2021 to 2045 were predicted by using the grey model GM (1, 1). Results showed that the total agricultural carbon emissions in Shandong Province in 2020 were 1.58×10^7 t and the intensity of carbon emissions was $0.205 \text{ t} \cdot (10^4 \text{ ¥})^{-1}$. Carbon emissions tended to increase from 2000 to 2006 and then decrease from 2007 to 2020; however, the intensity of carbon emissions decreased at an annual rate of 3.8%. The source structure of agricultural carbon emissions was ranked, with agricultural material input, livestock and poultry breeding, and crop farming accounting for 49.6%, 38.5%, and 11.9%, respectively. Carbon emissions and intensities showed regional differences between the 16 cities and tended to increase. Carbon emissions and the intensity of carbon emissions in Heze were higher than those of other cities. The LMDI decomposition results showed that agricultural production efficiency, agricultural industrial

刘杨, 主要从事环境监测与综合分析工作。E-mail: liuyang05178@163.com

收稿日期: 2021-08-30 接受日期: 2022-01-28

Corresponding author, LIU Yang, E-mail: liuyang05178@163.com

Received Aug. 30, 2021; accepted Jan. 28, 2022

<http://www.ecoagri.ac.cn>

structure, regional industrial structure, and rural population were emission reduction factors, whereas regional economic development level and urbanization were emission growth factors. The prediction results showed that agricultural carbon emission of Shandong Province would reach its peak before 2030, and carbon emissions of cities, such as Jinan, Qingdao, Zibo, Weifang, Jining, Tai'an, Weihai, Rizhao, and Liaocheng, would also reach their peaks before 2030. However, the prediction result showed that the agricultural carbon emissions in Zaozhuang, Dongying, Yantai, Linyi, Dezhou, Binzhou, and Heze did not reach their peaks before 2030. Therefore, suggestions for agricultural carbon emission reduction in Shandong Province were put forward.

Keywords: Agricultural carbon emissions; Carbon peak; Carbon emission intensity; Carbon emission resources; Carbon emission reduction

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告第一工作组报告《气候变化 2021: 自然科学基础》指出, 人类活动导致的温室气体排放是造成气候变暖的主要驱动因素, 极端高温、极端降水、干旱洪水等因人类活动而加剧^[1]。2021 年国民经济和社会发展“十四五”规划明确提出落实 2030 年应对气候变化国家自主贡献目标, 制定 2030 年前碳排放达峰行动方案。农业碳排放是全球温室气体排放的第二大来源, 贡献了全球范围内约 14% 的人为温室气体排放量和 58% 的非人为 CO₂ 排放^[2-3]。我国农业碳排放量占温室气体碳排放总量的 17%, 且排放水平以年均 5% 的速度增长^[4-5]。“十四五”全国农业绿色发展规划明确提出增强农业农村领域减排固碳的要求, 控制农业碳排放水平对我国落实减排承诺、增强适应气候变化能力、实现“双碳”目标具有重要意义。近年来国内学者在农业碳排放测算、影响因素分析等方面作了大量研究, 吴昊玥等^[6]基于 GB-US-SBM 模型测算 2000—2019 年中国 30 省 (市、自治区) 的农业碳排放量, 结果表明中国农业碳排放效率均值为 0.778, 具有较大减排潜力, 中国农业碳排放效率全局 Moran's *I* 显著大于 0 ($P < 0.01$), 空间杜宾模型结果显示农业碳排放效率具有显著的正向溢出效应。杨滨键等^[7]测算了山东省种植业碳排放量、碳汇量、碳排放强度以及碳排放边际减排成本, 运用 DEA-Malmquist 模型测算了种植业低碳绩效水平, 结果表明 2000—2018 年山东省种植业碳排放总量和碳汇总量年均增幅分别为 0.26% 和 1.74%, 而碳排放强度和减排成本年均降低 6.12% 和 2.10%。低碳绩效指数增长较慢, 年均增长速度为 3.00%, 其主要驱动来源于技术进步。张丽琼等^[8]测算 1997—2018 年中国 31 个省区农业碳排放量发现, 农业碳排放量总体呈现波动上升趋势, 农业碳排放强度不断下降; 农业碳排放量总体上表现出东中部高、西部低的空间分布格局, 而碳排放强度的空间布局则相反; 大部分省区的农业碳排放呈现增长态势, 农业碳排放分布状态稳定性高; 中国农业碳排放与农业经济发展之间

多处于弱脱钩和强脱钩状态。伍国勇等^[9]利用 2001—2018 年中国省级面板数据分析了中国农业碳排放强度动态演进, 表明中国农业碳排放强度整体相对差异具有明显的波动演进趋势, 中国农业碳补偿率存在显著的空间正相关, 着力推进农业提质增效并加强区域间协调合作能早日实现中国农业碳达峰和碳中和目标。蒋添诚等^[10]测算 2012—2018 年湖北省农业碳排放强度及 Tapio 脱钩弹性, 结果表明 2012 年以来湖北省农业碳排放强度呈下降趋势, 2015—2018 年为强脱钩阶段, 并提出了农业碳减排的建议。李阳等^[11]运用清单方法核算了中国各省 (直辖市、自治区) 农业源非二氧化碳温室气体排放, 整体呈上升趋势。高情景和中情景下中国农业非 CO₂ 温室气体排放量整体呈上升趋势, 到 2050 年仍未达峰; 2018—2050 年低情景下温室气体排放量整体呈下降趋势, 已于 2018 年达峰。朱通雅^[12]测算了 2010—2019 年长江经济带农业碳排放量呈先缓慢增长后快速下降趋势, 农业经济发展对农业碳排放起极大的促进作用, 而农业生产效率、劳动力规模和生产结构对农业碳排放有较为明显的抑制作用。

山东省作为我国的农业大省, 是全国重要的农产品生产基地, 其耕地面积占全国总耕地面积的 6.17%, 位居全国第 3, 农业增加值长期稳居第一位, 且农产品进出口总值长期位居全国第一^[13]。随着农业的快速发展和农业现代化水平的提高, 化肥、农药等物资的投入不断增加, 农业环境污染问题突出, 导致大量温室气体排放, 严重影响碳达峰目标的实现^[14]。合理并准确估算山东省农业碳排放量, 对制定有效的农业减排措施具有重要意义, 也可评估农业碳减排措施成效及农业碳达峰提供依据。而针对山东省农业碳排放量进行测算同时开展排放量预测的研究尚少见报道。本文通过测算山东省 2000—2020 年主要农业生产活动碳排放量, 分析其排放特征及影响因素, 预测 2021—2045 年山东省农业碳排放量, 提出有针对性的减排建议, 以期为农业碳减排及碳达峰提供理论基础。

1 研究方法与数据来源

1.1 农业碳排放测算

采用 IPCC 发布的碳排放系数法, 结合现有研究成果测算农业碳排放量^[15], 即 $C = \sum C_i = \sum T_i \times \delta_i$, 其中 C 为农业碳排放总量, C_i 为各源类碳排放量, T_i 为各源类活动水平, δ_i 为各源类碳排放系数。综合考虑山东省农业碳排放特征和数据可获得性, 主要测算种植业及畜禽养殖业碳排放量。由于多年来山东省严格按照国家一系列关于秸秆禁烧和综合利用的政策和法律法规推进秸秆综合利用工作, 2015 年秸

秆综合利用率达 85%, 2020 年达 92%, 资源化利用水平较高, 进一步减排的空间有限^[16], 故未将秸秆焚烧碳排放纳入测算。

1.1.1 种植业碳排放

主要有农业物资投入产生的碳排放(化肥、农药、农用薄膜、农用柴油及农业灌溉)、农田土壤利用排放 CH_4 和 N_2O 等温室气体产生的碳排放。种植业碳排放源、碳排放系数及参考来源见表 1。根据 IPCC 第五次评估报告结果, CH_4 和 N_2O 转化为 CO_2 的 100 年增温潜势系数分别为 28 和 265。

表 1 种植业碳排放源、碳排放系数及参考来源

Table 1 Carbon sources, carbon emission coefficients and reference sources for planting industry

农业物资投入 Agricultural material input			农田土壤利用 Farmland utilization		
源类名称 Carbon source	碳排放系数 Carbon emission coefficient	参考来源 Reference source	源类名称 Carbon source	碳排放系数 Carbon emission coefficient	参考来源 Reference source
化肥 Chemical fertilizer	0.8956 kg(C)·kg ⁻¹	ORNL	水稻 Rice	210 kg(CH ₄)·hm ⁻²	[18]
农药 Pesticides	4.9341 kg(C)·kg ⁻¹	ORNL		0.24 kg(N ₂ O)·hm ⁻²	
农膜 Plastic film	5.18 kg(C)·kg ⁻¹	IREEA	冬小麦 Winter wheat	2.05 kg(N ₂ O)·hm ⁻²	
农用柴油 Agricultural diesel oil	0.5927 kg(C)·kg ⁻¹	IPCC	大豆 Soybean	0.77 kg(N ₂ O)·hm ⁻²	
农业灌溉 Agricultural irrigation	266.48 kg(C)·hm ⁻²	[17]	玉米 Corn	2.532 kg(N ₂ O)·hm ⁻²	
			棉花 Cotton	0.4804 kg(N ₂ O)·hm ⁻²	
			蔬菜 Vegetables	4.21 kg(N ₂ O)·hm ⁻²	

ORNL: 美国橡树岭国家实验室; IREEA: 南京农业大学农业资源与生态环境研究所; IPCC: 政府间气候变化专门委员会。ORNL: Oak Ridge National Laboratory; IREEA: Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University; IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

1.1.2 畜禽养殖碳排放

根据 IPCC 评估报告及相关研究, 畜禽养殖碳排放主要来自反刍动物肠道发酵所产生的 CH_4 和粪便管理产生的 CH_4 和 N_2O 。畜禽养殖各碳源排放系数见表 2。

表 2 畜禽养殖碳排放源、 CH_4 和 N_2O 排放系数^[19-20]

Table 2 Carbon sources, CH_4 and N_2O emission coefficients for livestock and poultry farming^[19-20]

源类名称 Carbon source	肠道发酵 Intestinal fermentation	粪便管理 Fecal discharge	
	[kg(CH ₄)·(head·a) ⁻¹]	kg(CH ₄)·(head·a) ⁻¹	kg(N ₂ O)·(head·a) ⁻¹
牛 Cattle	47.00	1.00	1.39
羊 Sheep	5.00	0.16	0.86
猪 Pig	1.00	4.00	0.53
家禽 Poultry	—	0.02	0.02

1.2 农业碳排放强度及碳排放结构

选取农业碳排放强度作为衡量农业碳排放水平的指标, 由地区农业碳排放量与该地区农业生产总值之比得到^[21], 即 $C_{it} = C_i / \text{GDP}_{it}$, 其中 C_{it} 为 t 时期农业碳排放强度, C_i 为 t 时期农业碳排放量, GDP_{it} 为 t 时期农牧业生产总

值的比重, 即 $R_i = C_i / C$, 其中 C_i 为 i 种源类碳排放量, C

为农业碳排放总量。

1.3 农业碳排放影响因素及分解模型

在定量测算农业碳排放量的基础上, 对其影响因素进行系统分解, 把握各因素对碳排放的影响效应, 是制定农业碳减排对策的重要依据^[22]。Kaya 碳排放恒等式用数学方法建立起人类社会活动产生的碳排放与经济、政策和人口等因素的联系, 根据恒等式基本形式并借鉴已有研究, 将碳排放量做如下变形^[23]:

$$C = \frac{C}{\text{GDP}_p} \times \frac{\text{GDP}_p}{\text{GDP}_A} \times \frac{\text{GDP}_A}{\text{GDP}} \times \frac{\text{GDP}}{P_T} \times \frac{P_T}{P_R} \times P_R \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{C}{\text{GDP}_p} \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{\text{GDP}_p}{\text{GDP}_A} \quad (3)$$

$$I_s = \frac{\text{GDP}_A}{\text{GDP}} \quad (4)$$

$$E_{DL} = \frac{\text{GDP}}{P_T} \quad (5)$$

$$U_{RB} = \frac{P_T}{P_R} \quad (6)$$

式中: C 为农业碳排放量, 单位为万 t; GDP_P 为**农业 GDP**; GDP_A 为**农牧渔林业 GDP**; P_T 为**地区总人口**; P_R 为**农村总人口**。 C_1 表示农业生产效率, A_1 表示农业产业结构, I_s 表示地区产业结构, E_{DL} 表示地区经济发展水平, U_{RB} 表示城镇化水平。

采用 LMDI 加和分解方式对上式进行进一步分解, 以量化各因素对碳排放的影响大小, 具体为:

$$\Delta C = C_t - C_0 = \Delta C_1 + \Delta A_1 + \Delta I_s + \Delta E_{DL} + \Delta U_{RB} + \Delta P \quad (7)$$

$$\Delta C_1 = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times (\ln C_{1t} - \ln C_{10}) \quad (8)$$

$$\Delta A_1 = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times (\ln A_{1t} - \ln A_{10}) \quad (9)$$

$$\Delta I_s = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times (\ln I_{st} - \ln I_{s0}) \quad (10)$$

$$\Delta E_{DL} = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times (\ln E_{DLt} - \ln E_{DL0}) \quad (11)$$

$$\Delta U_{RB} = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times (\ln U_{RBt} - \ln U_{RB0}) \quad (12)$$

$$\Delta P = \sum \frac{C_t - C_0}{\ln C_t - \ln C_0} \times (\ln P_{Rt} - \ln P_{R0}) \quad (13)$$

式中: t 表示时期 ($t=1, 2, 3, \dots, n$), 0 表示基期, ΔC_1 、 ΔA_1 、 ΔI_s 、 ΔE_{DL} 、 ΔU_{RB} 、 ΔP 分别表示农业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济发展水平、城镇化水平和农村人口对农业碳排在基期到 t 时间的变化量的贡献值, 单位为万 t。将研究时段逐年贡献值相加即为相应影响因素的累计贡献值。

1.4 农业碳排放量预测

灰色预测模型 GM(1, 1) 是基于历史资料, 对时间序列数据进行大小预测的模型, 能够得到一条具有指数增长规律的上升形状数列, 基本思想是用原始数据组成原始序列 (0), 经累加生成法生成序列 (1), 它可以弱化原始数据的随机性, 使其呈现出较为明显的特征规律。对生成变换后的序列 (1) 建立 1 阶微分方程模型即 GM(1, 1) 模型。它具有所需样本少、不需要计算统计特征量等优点, 是处理小样本预测问题的有效工具^[24-26]。鉴于此, 本文引入灰色预测模型 GM(1, 1) 模拟 2021—2045 年山东省农业碳排放量情况。模型处理步骤为:

1) 将碳排放量作为原始数列, 计算原始数列 $x^{(0)}$ 的级比 $\lambda^{(0)}(t) = \frac{x^{(0)}(t-1)}{x^{(0)}(t)}$, 其中 $t=1, 2, 3, \dots, n$ 。若

$\lambda^{(0)}(t) \in (e^{\frac{-2}{n+1}}, e^{\frac{2}{n+1}})$, 则原始数列可建立灰色预测模型 GM(1, 1)。

2) 建立碳排放量的微分方程 $\frac{d(x^{(1)}(t))}{dt} + ax^{(1)}(t) = \mu$, 其中 $x^{(1)}(t)$ 为累加数列, 采用最小二乘法求解灰参数 a 和 μ , $\begin{bmatrix} a \\ \mu \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T y_n$, 其中:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$y_n = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (15)$$

3) 将灰参数代入时间函数可得 $x^{(1)}(t) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-a(t-1)} + \frac{\mu}{a}$, 相应碳排放量预测值即为:

$$\hat{x}^{(0)}(t+1) = \hat{x}^{(1)}(t+1) - \hat{x}^{(1)}(t) \quad t=1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (16)$$

4) 采用残差检验、后验差检验、关联度检验等检验模型精度, 并对 2021—2045 年碳排放量进行预测。

1.5 数据来源及处理

本文所需的原始数据主要来自于《山东省统计年鉴》和《山东省农村统计年鉴》, 化肥、农药、农膜及农用柴油均为当年用量, 其中化肥为折纯量; 灌溉面积为有效灌溉面积; 畜禽养殖量数据处理时, 出栏率小于 1 的牛、羊年均饲养量采用上年与本年出栏量均值, 出栏率大于 1 的猪和家禽年均饲养量采用 (当年出栏量 \times 平均生命周期)/365, 猪和家禽的平均生命周期分别为 200 d 和 55 d^[27]。农业总产值以 2000 年为不变价, 将其他年份进行折算, 以剔除价格因素干扰。

2 结果与分析

2.1 山东省农业碳排放特征

2.1.1 碳排放时序特征

2000—2020 年山东省农业碳排放量测算结果及各源排放量占排放总量比例见表 3 及表 4。2000—2020 年山东省农业碳排放总量呈现先增长后波动下降的趋势。2000 年碳排放量为 1558.9 万 t, 2001—2006 年逐年上升, 至 2006 年达最大值 1871.4 万 t, 比 2000 年增加 20.0%, 年均增长 3.3%; 2007—2020 年波动下降, 至 2020 年达最小值 1583.4 万 t, 比 2000 年增加 1.6%。山东省农业碳排放量变化趋势与国家农业

表 3 2000—2020 年山东省农业碳排放量情况
Table 3 Agricultural carbon emissions in Shandong Province from 2000 to 2020

年度 Year	农资投入 Agricultural material input		农田土壤利用 Farmland utilization		畜禽养殖 Livestock and poultry breeding		碳排放总量 Total amount		碳排放强度 Carbon emission intensity	
	排放量 Carbon emission	占比 Proportion	排放量 Carbon emission	占比 Proportion	排放量 Carbon emission	占比 Proportion	总量 Amount	同比变化 Year-on-year growth rate (%)	排放强度 Emission intensity	同比变化 Year-on-year growth rate (%)
	($\times 10^4$ t)	(%)	($\times 10^4$ t)	(%)	($\times 10^4$ t)	(%)	($\times 10^4$ t)		[$t \cdot (10^4 \text{ ¥})^{-1}$]	
2000	786.5	50.5	220.8	14.2	551.6	35.4	1558.9	—	0.821	—
2001	813.5	51.0	204.5	12.8	576.8	36.2	1594.7	2.3	0.776	-5.5
2002	848.8	50.6	213.9	12.8	613.6	36.6	1676.3	5.1	0.791	2.0
2003	859.0	50.4	203.5	11.9	642.8	37.7	1705.4	1.7	0.702	-11.3
2004	875.7	50.2	193.4	11.1	676.7	38.8	1745.7	2.4	0.599	-14.6
2005	906.1	49.9	196.2	10.8	712.0	39.2	1814.3	3.9	0.574	-4.1
2006	943.6	50.4	195.5	10.4	732.3	39.1	1871.4	3.1	0.566	-1.5
2007	950.4	51.3	199.2	10.8	702.7	37.9	1852.3	-1.0	0.474	-16.2
2008	916.5	50.0	200.4	10.9	715.1	39.0	1832.1	-1.1	0.400	-15.6
2009	906.2	49.7	202.8	11.1	715.9	39.2	1824.9	-0.4	0.375	-6.3
2010	917.0	50.2	203.3	11.1	707.7	38.7	1828.0	0.2	0.339	-9.4
2011	913.1	50.6	204.8	11.3	686.5	38.0	1804.4	-1.3	0.304	-10.6
2012	910.5	50.4	205.9	11.4	691.3	38.2	1807.7	0.2	0.294	-3.3
2013	903.9	50.0	208.3	11.5	695.2	38.5	1807.4	0.0	0.268	-8.7
2014	889.6	49.4	211.4	11.7	699.2	38.8	1800.2	-0.4	0.256	-4.5
2015	880.7	49.2	213.0	11.9	698.2	39.0	1791.9	-0.5	0.247	-3.6
2016	870.3	48.9	211.8	11.9	699.4	39.3	1781.5	-0.6	0.254	3.1
2017	844.0	47.7	217.6	12.3	708.2	40.0	1769.8	-0.7	0.256	0.8
2018	810.9	46.6	217.4	12.5	711.2	40.9	1739.5	-1.7	0.245	-4.6
2019	773.8	47.7	214.5	13.2	634.7	39.1	1623.0	-6.7	0.222	-9.4
2020	751.1	47.4	214.2	13.5	618.1	39.0	1583.4	-2.4	0.205	-7.7

表 4 2000—2020 年山东省农业碳排放源排放量占比情况
Table 4 Ratios of different agricultural carbon sources emissions to total amount in Shandong Province from 2000 to 2020

年度 Year	农资投入 Agricultural material input					农田土壤利用 Farmland utilization							畜禽养殖 Livestock and poultry breeding			
	化肥 Chemical fertilizer	农药 Pesticides	农膜 Plastic sheeting	农用柴油 Agricultural diesel oil	农业灌溉 Agricultural irrigation	水稻 Rice	冬小麦 Winter wheat	大豆 Soybean	玉米 Corn	棉花 Cotton	蔬菜 Vegetables		猪 Pig	牛 Cattle	羊 Sheep	家禽 Poultry
2000	24.3	4.4	7.5	6.0	8.2	1.6	4.2	0.2	3.5	0.1	4.5		8.7	9.1	16.0	1.6
2001	24.1	4.5	8.4	6.0	8.1	1.6	3.7	0.2	3.2	0.2	4.0		8.9	9.4	16.2	1.7
2002	23.2	4.8	9.0	6.0	7.6	1.3	3.4	0.1	3.1	0.2	4.7		9.0	9.7	16.2	1.7
2003	22.7	4.9	9.3	6.0	7.4	1.0	3.0	0.1	2.9	0.2	4.7		9.3	10.0	16.6	1.8
2004	23.1	4.3	9.7	5.7	7.3	1.0	3.0	0.1	2.9	0.2	3.9		9.8	10.2	16.9	1.9
2005	23.1	4.2	9.5	6.1	7.0	1.0	3.0	0.1	3.1	0.2	3.5		9.9	10.2	17.0	2.1
2006	23.4	4.5	9.5	6.1	6.9	1.0	3.0	0.1	3.0	0.2	3.2		9.9	10.1	16.9	2.1
2007	24.2	4.4	9.5	6.2	7.0	1.0	3.2	0.1	3.2	0.2	3.1		8.4	10.4	17.1	2.0
2008	23.3	4.7	9.1	5.9	7.1	1.0	3.2	0.1	3.2	0.2	3.2		9.2	10.6	17.0	2.3
2009	23.2	4.6	8.9	5.8	7.2	1.1	3.2	0.1	3.3	0.2	3.3		9.8	10.4	16.6	2.3
2010	23.3	4.5	9.2	6.1	7.2	1.0	3.2	0.1	3.3	0.2	3.3		10.2	10.1	15.9	2.5
2011	23.5	4.5	9.1	6.1	7.4	1.0	3.3	0.1	3.4	0.2	3.4		10.3	9.8	15.3	2.7
2012	23.6	4.4	9.1	5.9	7.4	1.0	3.3	0.1	3.4	0.1	3.4		11.2	9.4	14.6	2.9
2013	23.4	4.3	9.1	5.7	7.4	1.0	3.4	0.1	3.5	0.1	3.5		11.8	9.4	14.4	2.9
2014	23.3	4.3	8.8	5.5	7.5	1.0	3.5	0.1	3.6	0.1	3.5		12.3	9.2	14.6	2.7
2015	23.2	4.2	8.7	5.5	7.6	0.9	3.5	0.0	3.6	0.1	3.6		12.2	9.1	14.8	2.8
2016	22.9	4.1	8.7	5.4	7.7	0.9	3.6	0.0	3.7	0.1	3.6		12.1	9.0	14.9	3.2
2017	22.3	3.9	8.4	5.3	7.8	0.9	3.8	0.0	4.7	0.0	2.8		12.4	9.0	15.3	3.3
2018	21.6	3.7	8.2	5.0	8.0	0.9	3.9	0.1	4.7	0.0	2.9		12.4	9.2	16.0	3.3
2019	21.8	3.7	8.5	5.0	8.6	1.0	4.1	0.1	4.9	0.0	3.1		8.3	9.6	17.4	3.8
2020	21.5	3.6	8.7	4.7	8.9	1.0	4.1	0.1	5.0	0.0	3.2		8.9	8.6	17.2	4.2
平均 Average	23.1	4.3	8.9	5.7	7.6	1.1	3.5	0.1	3.6	0.1	3.5		10.2	9.7	16.1	2.6

政策紧密相关^[28], 2002 年提出“多予、少取、放活”的指导思想, 2004 年提出“两减免, 三补贴”的财税政策, 2005 年提出加大对种粮农民的直接补贴力度, 2006 年全面取消在我国沿袭 2600 多年的传统农业税, 一系列的政策提高了农民种粮积极性, 农业生产资料投入逐年增加, 农业生产水平及机械化程度得到较大提高。但由于当时农民低碳意识较为淡薄, 农业碳排放量随农资投入的增加而增加, 农资投入碳排放量在 2007 年达最大值^[29]。伴随着种植业的发展, 粮食产量增长、农村人口稳定、农村经济持续发展, 为畜禽养殖业提供了食物保障、劳动力保障和销售市场^[30], 2000—2006 年山东省猪、牛、羊、家禽养殖规模逐年上升, 碳排放量也相应增加, 2006 年畜禽养殖碳排放量达最大值, 同年农业碳排放总量也达最大值。2007 年中国共产党第十七次全国代表大会强调了资源节约、生态环境保护的重要性; 2008 年中央一号文件也明确指出要通过降低生产成本实现增收, 大力发展节约型农业, 促进秸秆等副产品和生活废弃物资源化利用, 提高农业生产效益^[31]; 2014 年的中央一号文件提出“发展生态友好型农业”, 2015 年开始实施“到 2020 年化肥使用量零增长行动”和“到 2020 年农药使用量零增长行动”, 自 2007 年起山东省农业碳排放量总体逐年下降。

山东省农业碳排放强度呈逐年下降趋势, 由 2000 年的 $0.821 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 下降至 2020 年的 $0.205 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$, 下降 75.1%, 年均降幅 3.8%, 与曹俐等^[32]的研究结果一致。碳排放量及碳排放强度变化趋势均表明山东省农业可持续发展政策成效显著, 农业增长方式正由粗放型向低碳节约型的绿色农业转变。

分析山东省农业碳排放结构(表 4)可知, 2000—

2020 年农资投入碳排放量占农业碳排放总量平均比例为 49.6%, 畜禽养殖排放量平均占比为 38.6%, 农田土壤利用排放量平均占比为 11.9%。农资投入排放量占比近五成, 其中化肥施用占 23.1%, 在各源类中排放量最大, 与黄锐等^[33]的研究结果一致。从年际变化看, 2013 年后农资投入碳排放量占比呈波动下降趋势, 也验证了山东省农业增长方式正在转变中。随着人民生活水平的提高, 对畜禽养殖业产品需求增加, 养殖规模不断扩大, 2020 年畜禽养殖业生产总值比 2000 年增长 3.3 倍, 碳排放量占比也呈上升趋势, 其中羊、猪养殖碳排放量较高。山东省作为我国粮食主产区和蔬菜种植大省, 农田土壤利用碳排放源中冬小麦、玉米和蔬菜碳排放量占比较大, 2017 年蔬菜种植碳排放量占比较 2016 年下降 22.2%, 与 2017 年前后山东省出现低温、冷冻、洪涝、干旱等极端天气, 对蔬菜种植规模造成较大影响有关^[34]。

2.1.2 碳排放区域特征

2000—2020 年山东省各地市累计农业碳排放总量如图 1 所示。2019 年起济南市与莱芜市合并, 为保证数据可比性, 将 2000—2018 年原济南市与原莱芜市数据合并统计。结果显示, 菏泽、潍坊累计农业碳排放量超过 4000 万 t, 分别为 4821.6 万 t、4252.3 万 t。德州、临沂、济宁累计农业碳排放量为 3300 万~3700 万 t, 烟台、青岛、济南、聊城为 2100 万~3000 万 t, 威海、日照、东营、枣庄、滨州、泰安为 1000 万~2000 万 t, 淄博为 883.7 万 t。

农业碳排放强度不受资源总量基数的影响, 可直观反映地区间低碳农业发展水平差异。2000—2020 年山东省各地市平均碳排放强度范围 $0.326 \sim 0.738 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 。其中淄博、烟台、济南、青岛 4 市

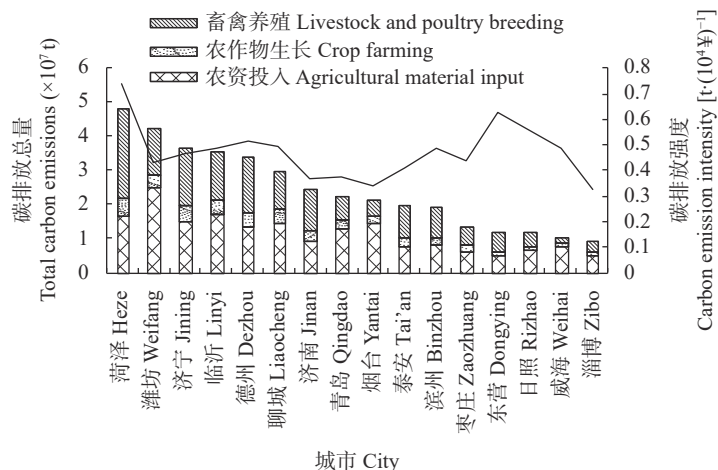


图 1 2000—2020 年山东省各地市累计碳排放量及平均碳排放强度

Fig. 1 Total agricultural carbon emissions and average carbon emission intensity in cities of Shandong Province from 2000 to 2020

低于 0.400 t/万元⁻¹, 泰安、潍坊、枣庄、济宁、威海、临沂、滨州和聊城介于 0.400~0.500 t/万元⁻¹ 之间, 德州和日照介于 0.500~0.600 t/万元⁻¹ 之间, 菏泽和东营大于 0.600 t/万元⁻¹。山东省 2000—2020 年平均碳排放强度为 0.427 t/万元⁻¹, 淄博、烟台、济南、青岛、泰安 5 市碳排放强度低于全省平均, 其他 11 市高于全省平均。

总体来看以农业生产为主、粮食作物种植面积占比大的地市碳排放量大、碳排放强度高, 经济作物种植面积占比大、经济较发达和工业相对发达城市农业碳排放强度低。菏泽碳排放强度为 0.738 t/万元⁻¹, 比全省平均高 72.8%, 比其他地市平均值高 63.0%, 菏泽市畜禽养殖碳排放量占比最大, 农业高投入、高污染、可持续发展问题突出。

从农业碳排放结构上看, 16 地市农资投入、农田土壤利用、畜禽养殖碳排放量平均占比范围分别为 34.8%~75.9%、7.0%~13.6%、17.1%~54.6%, 农资投入占比最大的地市有潍坊、临沂、聊城、青岛、烟台、枣庄、日照、威海和淄博, 畜禽养殖碳排放量占比最大的地市有菏泽、济宁、德州、济南、泰安、滨州和东营。各地市农田土壤利用碳排放量占比均最小。

2000—2020 年山东省各地市农业碳排放量及碳排放强度如表 5 和表 6。2000—2006 年各地市碳排放量总体呈上升趋势, 济南、青岛、淄博、潍坊、济宁、威海、日照、聊城和烟台 9 市在 2006 年左右出现峰值; 临沂、东营、德州、滨州、菏泽、泰安和枣庄持续波动上升, 至 2012—2015 年出现峰值, 然后波动变化。各地市碳排放强度均明显下降, 2020 年碳排放强度比 2000 年下降 65.0%~82.3%, 与山东省碳排放强度变化趋势一致。

变异系数 (CV) 可以反映数据的离散程度, CV 越小, 表示数据离散程度越小, 反之表示数据离散程度越大。2000—2020 年山东省各地市农业碳排放量年变异系数范围 48.5%~52.8%, 碳排放强度年变异系数范围 17.9%~35.7%, 表明各地市农业碳排放量及碳排放强度均呈现一定的空间非均衡性。从年际变化看, 碳排放量及碳排放强度的变异系数均有增加趋势, 且碳排放强度变异系数增加幅度高于碳排放量, 表明 2000—2020 年山东省各地市农业发展水平持续不平衡, 碳排放地区差异和演变趋势表现出一定的差异且有扩大趋势, 农业生产效率高、绿色低碳农业较发达的地市碳排放量降幅大、农业生产总值增加快, 碳排放强度下降幅度大。各地市的农业可

表 5 2000—2020 年山东省各地市逐年农业碳排放量及其变异系数

Table 5 Agricultural carbon emissions and coefficients of variation in cities of Shandong Province from 2000 to 2020

年度 Year	农业碳排放量 Agricultural carbon emission ($\times 10^4$ t)																CV (%)
	济南 Jinan	青岛 Qingdao	淄博 Zibo	枣庄 Zaozhuang	东营 Dongying	烟台 Yantai	潍坊 Weifang	济宁 Jining	泰安 Tai'an	威海 Weihai	日照 Rizhao	临沂 Linyi	德州 Dezhou	聊城 Liaocheng	滨州 Binzhou	菏泽 Heze	
2000	107.3	115.7	37.5	48.2	40.8	84.5	184.2	158.7	77.0	41.8	53.7	142.5	122.5	131.1	74.6	155.8	48.5
2001	108.4	117.0	41.8	49.7	41.4	85.1	187.4	164.0	81.4	41.6	53.9	148.9	124.3	134.8	80.7	165.7	48.5
2002	113.7	120.6	43.0	53.1	45.0	87.4	193.0	181.0	87.1	43.2	54.1	155.2	143.1	152.7	83.6	186.1	49.8
2003	118.5	125.2	44.5	56.2	49.9	92.9	202.6	182.4	92.8	44.0	56.7	156.8	142.7	160.1	87.2	199.4	49.3
2004	124.8	126.3	45.6	59.8	55.1	93.8	211.4	197.4	100.9	46.2	60.8	162.9	158.1	158.4	89.3	212.2	49.5
2005	131.0	133.6	47.3	63.3	59.7	101.0	225.3	220.7	102.9	53.4	60.5	167.3	171.7	164.0	94.1	232.5	50.6
2006	134.2	134.3	43.3	68.2	65.2	109.8	226.5	214.4	101.2	54.1	62.6	173.6	172.7	159.9	97.0	247.9	50.3
2007	123.0	119.7	41.7	65.5	63.5	111.3	208.2	179.6	96.7	53.5	57.9	166.2	160.8	132.6	90.3	243.8	49.5
2008	116.6	104.8	41.7	64.6	62.0	114.4	193.6	171.5	93.2	53.6	52.4	172.0	167.9	132.8	93.6	242.8	49.9
2009	118.8	101.1	44.6	67.7	64.4	111.6	204.3	186.1	94.4	52.5	53.7	176.8	171.1	139.1	94.1	249.0	50.9
2010	122.8	101.0	45.2	69.5	65.8	111.3	209.9	192.5	96.4	50.6	60.4	183.3	172.8	145.0	97.7	254.8	51.0
2011	125.9	101.2	45.6	69.2	63.6	111.0	214.6	191.3	99.7	51.6	60.8	185.6	177.3	143.1	98.6	257.9	51.3
2012	127.3	100.2	45.9	70.8	64.6	107.6	217.6	187.9	102.7	52.8	60.1	185.8	181.8	141.9	98.2	261.1	51.6
2013	128.0	99.5	45.9	72.5	66.1	106.3	213.7	187.2	105.0	51.4	57.5	185.2	185.4	142.2	101.1	268.1	51.9
2014	127.4	98.4	44.0	73.7	61.8	105.9	209.6	174.6	107.5	49.4	59.0	179.3	184.9	144.0	101.7	270.6	52.0
2015	124.3	94.8	40.9	74.1	52.5	104.2	208.9	163.6	109.5	47.7	58.6	177.5	173.0	143.1	98.8	266.8	52.8
2016	120.0	93.0	39.8	72.9	48.6	103.9	209.0	155.0	107.1	47.1	58.1	175.4	157.3	139.9	94.0	253.1	52.3
2017	107.3	91.3	37.6	65.3	53.7	103.4	197.0	150.2	91.5	46.4	52.7	177.4	162.4	132.7	94.9	232.1	51.7
2018	96.3	90.9	37.2	60.9	55.4	103.1	189.1	148.9	83.7	45.3	48.8	171.7	165.8	121.0	91.4	220.3	51.9
2019	87.0	87.4	35.9	58.2	48.8	97.8	178.2	138.9	79.3	43.5	45.6	156.0	154.4	114.0	88.9	217.4	52.6
2020	76.2	83.4	34.6	50.8	50.7	91.0	168.1	124.7	68.1	40.4	38.3	155.7	135.2	110.6	81.1	184.1	51.7

CV: 变异系数。CV: coefficients of variation.

表 6 2000—2020 年山东省各地市逐年农业碳排放强度及其变异系数

Table 6 Agricultural carbon emission intensities and coefficients of variation in cities of Shandong Province from 2000 to 2020

年度 Year	农业碳排放强度 Agricultural carbon emission intensity [t·(10 ⁴ ¥) ⁻¹]																CV (%)
	济南 Jinan	青岛 Qingdao	淄博 Zibo	枣庄 Zaozhuang	东营 Dongying	烟台 Yantai	潍坊 Weifang	济宁 Jining	泰安 Tai'an	威海 Weihai	日照 Rizhao	临沂 Linyi	德州 Dezhou	聊城 Liaocheng	滨州 Binzhou	菏泽 Heze	
2000	0.633	0.639	0.542	0.742	1.025	0.574	0.714	0.861	0.686	0.812	0.948	0.781	0.786	0.860	0.786	0.954	17.9
2001	0.604	0.618	0.562	0.708	0.957	0.544	0.696	0.865	0.685	0.752	0.961	0.791	0.764	0.851	0.828	0.964	18.3
2002	0.614	0.632	0.559	0.702	1.021	0.560	0.722	0.891	0.711	0.756	0.905	0.791	0.851	0.925	0.871	1.033	19.4
2003	0.607	0.651	0.554	0.710	0.992	0.573	0.695	0.845	0.693	0.765	0.973	0.780	0.780	0.931	0.772	1.050	19.5
2004	0.566	0.596	0.501	0.629	0.949	0.482	0.637	0.738	0.646	0.717	0.867	0.676	0.758	0.793	0.701	0.949	20.0
2005	0.530	0.572	0.473	0.588	0.914	0.462	0.618	0.711	0.585	0.743	0.798	0.614	0.760	0.743	0.663	0.894	20.4
2006	0.507	0.551	0.409	0.579	0.879	0.444	0.592	0.665	0.544	0.673	0.771	0.593	0.717	0.681	0.646	0.887	21.5
2007	0.431	0.454	0.333	0.488	0.751	0.400	0.478	0.488	0.455	0.603	0.616	0.489	0.590	0.498	0.522	0.794	23.1
2008	0.347	0.350	0.310	0.387	0.659	0.354	0.380	0.381	0.367	0.470	0.499	0.442	0.487	0.400	0.462	0.736	26.3
2009	0.331	0.335	0.315	0.388	0.635	0.344	0.379	0.399	0.356	0.450	0.479	0.431	0.469	0.396	0.424	0.722	25.8
2010	0.289	0.280	0.266	0.342	0.557	0.285	0.354	0.350	0.312	0.383	0.457	0.418	0.429	0.372	0.385	0.692	28.9
2011	0.267	0.258	0.244	0.315	0.472	0.257	0.331	0.312	0.291	0.342	0.409	0.399	0.411	0.334	0.339	0.675	30.3
2012	0.254	0.246	0.233	0.308	0.465	0.242	0.309	0.292	0.276	0.347	0.395	0.384	0.396	0.314	0.321	0.648	30.9
2013	0.228	0.222	0.211	0.281	0.419	0.213	0.276	0.261	0.253	0.290	0.346	0.346	0.358	0.284	0.304	0.630	33.8
2014	0.220	0.211	0.194	0.275	0.375	0.201	0.258	0.230	0.250	0.259	0.331	0.321	0.340	0.266	0.294	0.615	35.0
2015	0.208	0.190	0.175	0.265	0.314	0.192	0.247	0.203	0.244	0.237	0.310	0.304	0.301	0.252	0.276	0.586	35.7
2016	0.195	0.183	0.161	0.246	0.284	0.180	0.236	0.182	0.230	0.224	0.296	0.286	0.262	0.231	0.246	0.534	34.8
2017	0.196	0.196	0.165	0.269	0.331	0.195	0.249	0.204	0.199	0.292	0.292	0.318	0.292	0.259	0.299	0.510	31.2
2018	0.172	0.185	0.158	0.240	0.326	0.186	0.234	0.197	0.176	0.285	0.256	0.292	0.301	0.230	0.288	0.465	31.2
2019	0.153	0.166	0.150	0.228	0.282	0.157	0.220	0.179	0.167	0.274	0.234	0.240	0.294	0.213	0.291	0.425	31.7
2020	0.128	0.151	0.137	0.190	0.272	0.138	0.199	0.152	0.137	0.247	0.192	0.221	0.243	0.196	0.248	0.334	29.5

CV: 变异系数。CV: coefficients of variation.

持续发展水平差异越来越明显。

2.2 山东省农业碳排放影响因素分析

山东省全省及 16 地市农业碳排放影响因素分解结果见表 7 和表 8。从表 7 可以看出, 与基期相比, 2001—2020 年山东省农业碳排放量累积增加 4075.8 万 t。农业生产效率、农业产业结构因素、地区产业结构因素及劳动力规模因素对农业碳减排起到一定作用。农业生产效率提升是农业碳减排的最主要影响因素, 与基期相比农业生产效率提升累计实现 26 515.2 万 t 减排, 如其他影响因素保持不变, 可使碳排放年均递减 1325.8 万 t。农业产业结构优化、地区产业结构调整及劳动力规模因素对减排也起到一定作用, 如其他影响因素保持不变, 分别可产生年均递减量 52.7 万 t、612.9 万 t 和 250.8 万 t。山东省种植业和畜牧业生产总产值占农业生产总产值的比例由 2000 年的 82.8% 下降至 2020 年的 76.0%, 相对低碳的林业、渔业生产总产值占比提升, 三产比例由 2000 年的 14.9 : 49.6 : 35.5 调整为 2020 年的 7.2 : 39.8 : 53.0, 农村人口占比由 2000 年的 73.2% 下降至 2020 年的 49.6%, 一系列变化都表明山东省不断推进农业产业结构和地区产业结构调整、优化种植业资源配置、发展低碳农业、提升城镇化水平, 且减排成效

显著。

地区经济发展水平和城镇化率因素为农业碳排放量增加的主要因素, 与基期相比分别累计增加碳排放量 41 822.4 万 t、7096.4 万 t, 表明山东省农业发展仍处于“库兹涅茨曲线”拐点左侧, 碳排放与经济发展未完全脱钩^[35], 今后一段时间内经济发展仍将是山东省农业碳排放量增加的主要因素, 碳减排工作仍需要进一步加强。

从表 8 可以看出, 16 地市农业碳排放量与基期相比, 仅青岛和日照分别累计减排 181.9 万 t 和 14.3 万 t, 其他地市碳排放量累计增加 26.1 万~1598.4 万 t。与全省影响因素作用一致, 各地市农业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、劳动力因素对碳减排起到一定作用, 地区经济发展水平及城镇化因素促使农业碳排放量增加。但农业产业结构对不同地市碳减排贡献差距较大, 威海和日照农业产业结构因素促进减排量仅为 4.9 万 t, 菏泽仅为 0.9 万 t。分析威海、日照、菏泽 3 市 2020 年养殖业 GDP 比 2000 年分别增长 3.4 倍、4.5 倍、4.5 倍, 在 16 地市中增长倍数较高, 高于济南和潍坊的 2.0 倍、青岛的 1.4 倍、聊城和淄博的 2.0 倍, 而 2020 年种植业 GDP 仅比 2000 年增长 1.6 倍、1.7 倍、1.9 倍。3 市的畜

表 7 2001—2020 年山东省碳排放的影响因素

Table 7 Driving factors decomposition of agricultural carbon emission in Shandong Province from 2001 to 2020

年份 Year	贡献值 Contribution value ($\times 10^4$ t)						ΔC
	ΔC_1	ΔA_1	ΔI_s	ΔE_{DL}	ΔU_{RB}	ΔP	
2001	-89.0	18.7	-39.1	136.6	22.8	-14.2	35.8
2002	-59.6	21.4	-162.3	301.0	49.4	-32.6	117.4
2003	-255.6	18.6	-65.8	425.3	97.9	-73.9	146.5
2004	-519.7	31.4	-108.5	749.4	125.7	-91.5	186.8
2005	-600.8	32.8	-280.4	1059.9	177.2	-133.3	255.4
2006	-636.6	-26.5	-442.6	1360.6	196.1	-138.6	312.5
2007	-933.3	-12.3	-478.6	1648.7	248.3	-179.4	293.3
2008	-1215.3	-16.4	-502.0	1929.9	269.3	-192.5	273.1
2009	-1323.4	-20.5	-538.1	2061.1	266.9	-180.0	266.0
2010	-1491.7	-18.0	-604.7	2281.1	342.1	-239.6	269.1
2011	-1669.1	-30.9	-659.2	2493.2	364.8	-253.4	245.5
2012	-1727.3	-83.8	-706.8	2657.1	389.3	-279.7	248.8
2013	-1880.8	-86.2	-714.4	2814.6	418.3	-303.1	248.4
2014	-1953.9	-94.3	-751.7	2902.7	446.9	-308.5	241.3
2015	-2010.7	-94.4	-838.2	3025.5	566.9	-416.1	233.0
2016	-1954.4	-116.3	-975.2	3101.5	603.0	-435.8	222.6
2017	-1934.1	-152.4	-1076.2	3192.4	639.3	-458.1	210.9
2018	-1994.1	-148.3	-1113.5	3242.7	658.4	-464.5	180.6
2019	-2083.2	-141.4	-1119.6	3212.9	603.6	-408.2	64.1
2020	-2182.6	-135.5	-1080.3	3226.2	610.1	-413.4	24.5
合计 Total	-26 515.2	-1054.3	-12 257.0	41 822.4	7096.4	-5016.5	4075.8

ΔC_1 、 ΔA_1 、 ΔI_s 、 ΔE_{DL} 、 ΔU_{RB} 、 ΔP 分别表示农业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济发展水平、城镇化水平和农村人口对农业碳排在基期到*t*时间的变化量的贡献值。 ΔC 表示基期到*t*时间农业碳排放变化量。 ΔC_1 、 ΔA_1 、 ΔI_s 、 ΔE_{DL} 、 ΔU_{RB} and ΔP respectively stand for the contribution values of agricultural production efficiency, agricultural structure, regional industry structure, regional economic development level, urbanization rate and rural population to carbon emission variation. ΔC stands for carbon emission variation during study period.

表 8 2000—2020 年山东省各地市碳排放的影响因素

Table 8 Driving factors decomposition of agricultural carbon emission in each city of Shandong Province from 2000 to 2020

城市 City	贡献值 Contribution value ($\times 10^4$ t)						ΔC
	ΔC_1	ΔA_1	ΔI_s	ΔE_{DL}	ΔU_{RB}	ΔP	
济南 Jinan	-1604.6	-63.5	-1097.0	2775.0	984.9	-810.2	184.6
青岛 Qingdao	-1522.9	-64.4	-1827.5	3041.0	917.9	-726.0	-181.9
淄博 Zibo	-586.3	-47.0	-407.7	1067.2	207.5	-207.5	26.1
枣庄 Zaozhuang	-805.4	-40.1	-536.9	1591.9	250.4	-196.9	263.0
东营 Dongying	-636.1	-140.5	-369.1	1422.7	230.2	-251.7	255.5
烟台 Yantai	-1308.2	-37.0	-1027.5	2698.2	598.4	-583.0	340.8
潍坊 Weifang	-2469.2	-173.6	-2050.8	4981.3	1457.3	-1284.5	460.6
济宁 Jining	-2744.8	-131.4	-1129.7	4185.5	842.5	-633.2	389.0
泰安 Tai'an	-1238.8	-59.5	-779.6	2375.2	392.6	-359.0	330.9
威海 Weihai	-622.5	-4.9	-383.3	1120.1	296.5	-340.1	65.6
日照 Rizhao	-783.7	-4.9	-745.3	1528.2	322.1	-330.7	-14.3
临沂 Linyi	-1877.0	-60.4	-1669.9	3931.4	923.8	-650.5	597.4
德州 Dezhou	-1558.3	-230.3	-1394.4	3859.9	729.5	-578.4	828.0
聊城 Liaocheng	-1991.0	-60.0	-1791.3	3879.9	747.2	-571.3	213.7
滨州 Binzhou	-1061.0	-143.9	-991.3	2500.6	490.9	-464.3	331.0
菏泽 Heze	-1241.8	-0.9	-3366.3	5770.0	1011.6	-574.2	1598.4

ΔC_1 、 ΔA_1 、 ΔI_s 、 ΔE_{DL} 、 ΔU_{RB} 、 ΔP 分别表示农业生产效率、农业产业结构、地区产业结构、地区经济发展水平、城镇化水平和农村人口对农业碳排在基期到*t*时间的变化量的贡献值。 ΔC 表示基期到*t*时间农业碳排放变化量。 ΔC_1 、 ΔA_1 、 ΔI_s 、 ΔE_{DL} 、 ΔU_{RB} and ΔP respectively stand for the contribution values of agricultural production efficiency, agricultural structure, regional industry structure, regional economic development level, urbanization rate and rural population to carbon emission variation. ΔC stands for carbon emission variation during study period.

禽养殖规模扩大导致碳排放量增加,亟需优化农业产业结构,实现结构性降碳。

2.3 碳排放量预测及达峰分析

以山东省及 16 地市 2000—2020 年农业碳排放

量为依据,构建灰色预测模型 GM(1, 1) 预测 2021—2045 年农业碳排放量,考虑到篇幅限制,仅列出 2025 年、2030 年及 2045 年预测值(表 9)。根据预测结果,山东省农业碳排放量在 2020 年后持续下降,在 2030 年前已达到峰值,这与付帮杰^[36]的研究结论一致。16 地市中枣庄、东营等 7 个地市农业碳排放

量在 2020 年后仍有上升趋势,但年均上升幅度持续下降。济南、青岛等其他 9 个地市碳排放量呈逐年下降趋势,在 2030 年前均已达到峰值。可见,山东省控制农业碳排放要因地制宜,根据各地市不同情况制定相应的减排目标,以确保各地市 2030 年均能实现达峰,并最终实现中和目标。

表 9 2025 年、2030 年和 2045 年山东省及 16 地市农业碳排放量预测值
Table 9 Forecasted agricultural carbon emissions in Shandong Province and 16 cities in 2025, 2030 and 2045 $\times 10^4$ t

区域 Region	2025	2030	2045	区域 Region	2025	2030	2045	区域 Region	2025	2030	2045
山东省 Shandong	1742	1736	1715	烟台 Yantai	107	109	114	临沂 Linyi	180	183	193
济南 Jinan	100	95	82	潍坊 Weifang	191	187	176	德州 Dezhou	173	176	187
青岛 Qingdao	76	68	49	济宁 Jinning	141	131	105	聊城 Liaocheng	118	111	93
淄博 Zibo	37	35	31	泰安 Tai'an	91	90	87	滨州 Binzhou	97	98	103
枣庄 Zaozhuang	70	72	78	威海 Weihai	47	46	45	菏泽 Heze	256	264	291
东营 Dongying	58	58	59	日照 Rizhao	49	47	41	—	—	—	—

3 结论与建议

3.1 结论

通过测算山东省 2000—2020 年农业碳排放量及碳排放强度,分析其时空变化规律、碳排放结构,并对其影响因素进行总结,预测了山东省农业碳排放量变化趋势,得到结论如下:

2020 年山东省农业碳排放量为 1583.4 万 t,农业碳排放强度为 $0.205 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$, 2000—2020 年山东省逐年农业碳排放量呈先增长后波动下降的趋势,农业碳排放强度呈持续下降趋势,山东省农业正由粗放型向低碳节约型的绿色农业转变。农资投入是最大的农业碳源,其排放量占农业碳排放总量的近五成,其次是畜禽养殖,农田土壤利用碳排放量占比最小。农资投入中化肥施用排放量最高。山东省 16 地市农业碳排放量及碳排放强度均呈现一定的空间非均衡性,以农业生产为主、粮食作物种植面积占比大的地市碳排放量大、碳排放强度高,经济作物种植面积占比大、经济较发达和工业相对发达城市农业碳排放强度低,且区域差异呈现扩大趋势,各地市的农业可持续发展水平差异越来越明显。

山东省农业生产效率、农业产业结构、地区产业结构及劳动力规模对农业碳减排起到一定作用,地区经济发展水平和城镇化率是导致农业碳排放量增加的主要因素。预测结果表明维持现在农业发展趋势和相应碳排放水平的基础上,山东省农业碳排放量在 2030 年前已达到峰值,济南、青岛等 9 市农业碳排放量在 2030 年前已达峰,枣庄、东营等 7 地市未达峰,山东省农业碳排放要实现 2030 年达到峰值,减排任重道远。

3.2 建议

为有效控制农业碳排放总量,进一步降低农业排放强度,争取早日实现“双碳”目标,考虑到山东省农业碳排放空间非均衡性,各地政府应立足本土实际情况,制定差异化的低碳农业发展政策。

第一,大力发展各种集约型循环农业、低碳农业,提升农资利用效率以减少农资投入碳排放量。农资投入碳排放量占山东省农业碳排放的 47%~51%,是最大的排放源。为实现碳减排,要在保证粮食产量的前提下,采取措施控制农资投入,如积极推广有机肥及新型化肥施用方式,实行测土配方施肥和平衡施肥,推广新型肥料如长效肥、缓释肥以提升作物对肥料的利用效率,从而减少化肥用量;培育抗旱、抗病作物品种,提高作物的水分利用效率和抗虫害的能力;推广病虫害绿色防控技术,减少灌溉和农药施用碳排放等。

第二,积极调整农业内部产业结构,促进产业减排,扩大碳库以增加农业固碳。威海、日照、菏泽 3 市农业产业结构因素碳减排量明显小于其他地市,应进一步优化调整,大力发展具有区域优势的林业、生态农业旅游产业,加强林业的固碳能力;充分发挥海洋资源优势,大力发展碳汇渔业,以实现农业的最优发展。调整种植业内部结构,在保证基本粮食需求前提下增加经济作物种植面积,提高农业综合生产能力,并通过优选作物种类、提高种植技术以增加植物生产力和固碳能力。

第三,提升畜禽养殖业低碳发展水平。畜禽养殖业碳排放量占山东省农业碳排放量的 35%~41%,具有一定的减排空间。各地市可依照市场情况合理调整畜牧业结构,优化牲畜品种,提升饲喂技术的科

学化和牲畜粪便处理的先进化水平,以减少碳排放量。

第四,加强宣传培训,提升农民低碳发展意识。充分利用各种渠道和方式广泛宣传低碳农业,提升农民对低碳农产品的安全性和优越性的认识,让低碳生产和低碳生活成为农民共识,促进农业生产方式转变和农业碳减排。开展技能培训,提升农民掌握先进生产技术的水平,提高农业生产效率,促进碳减排。

第五,加强农业碳排放统计与核算,完善农业碳排放监测与计量体系,建立农业碳排放数据信息系统和农业碳排放核算方法体系,试点农业碳排放年度报告制度。

本文测算碳排放量时排放系数主要应用了现有成果,难以体现出山东省差异化,仅将主要排放源纳入研究,未考虑如秸秆、有机肥还田对土壤温室气体排放的影响,在预测部分选取了简单易操作的模型,这些还有待进一步探究。本文的因素分析和预测结果可为相关研究提供一定的理论方向。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[EB/OL]. IPCC, (2021-08-09) [2022-01-12]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [2] 郎慧, 肖诗顺, 王艳. 四川省农业碳排放与经济增长的脱钩效应分析[J]. 山东农业大学学报: 社会科学版, 2019(2): 70-78
LANG H, XIAO S S, WANG Y. Decoupling analysis of agricultural carbon emissions and economic development in Sichuan Province[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2019(2): 70-78
- [3] 郝小雨. 黑龙江省30年来农田生态系统碳源/汇强度及碳足迹变化[J]. 黑龙江农业科学, 2021(8): 97-104
HAO X Y. Changes of carbon source/sink intensity and carbon footprint of farmland ecosystem in Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2021(8): 97-104
- [4] 程琳琳. 中国农业碳生产率时空分异: 机理与实证[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018
CHENG L L. Spatial and temporal differentiation of China's agricultural carbon productivity mechanism and demonstration[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018
- [5] 孙英. 山东省农业碳排放时空特征及其影响因素分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018
SUN Y. Spatial and temporal characteristics of agricultural carbon emission and its influencing factors in Shandong Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018
- [6] 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
- [7] 杨滨键, 孙红雨. 低碳绩效测度与动态效应研究——以山东省种植业为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(3): 581-589
YANG B J, SUN H Y. Low carbon performance measurement and dynamic effects: A case study of the planting industry in Shandong Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(3): 581-589
- [8] 张丽琼, 何婷婷. 1997—2018年中国农业碳排放的时空演进与脱钩效应——基于空间和分布动态法的实证研究[J]. 云南农业大学学报: 社会科学, 2022, 16(1): 78-90
ZHANG L Q, HE T T. Spatio-temporal of agricultural carbon emission and decoupling in China during 1997-2018: an empirical research based on spatial and distribution dynamics method[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Social Science, 2022, 16(1): 78-90
- [9] 伍国勇, 刘金丹, 杨丽莎. 中国农业碳排放强度动态演进及碳补偿潜力[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10): 69-78
WU G Y, LIU J D, YANG L S. Dynamic evolution of China's agricultural carbon emission intensity and carbon offset potential[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(10): 69-78
- [10] 蒋添诚, 胡纯, 王巧稚, 等. 湖北省农业碳排放时空特征及脱钩研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(11): 1476-1480
JIANG T C, HU C, WANG Q Z, et al. Research on spatial-temporal characteristics and decoupling of agricultural carbon emissions in Hubei[J]. Environmental Pollution & Control, 2021, 43(11): 1476-1480
- [11] 李阳, 陈敏鹏. 中国省域农业源非CO₂温室气体排放的影响因素分析与峰值预测[J]. 环境科学学报, 2021, 41(12): 5174-5189
LI Y, CHEN M P. Analysis of influencing factors and peak forecast of non-CO₂ greenhouse gas emissions from provincial agricultural sources in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(12): 5174-5189
- [12] 朱通雅. 农业碳排放的驱动因素与退耦效应研究——以长江经济带为例[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(24): 118-121
ZHU T Y. Research on driving factors and decoupling effects of agricultural carbon emissions — Taking the Yangtze River Economic Belt as an example[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(24): 118-121
- [13] 吕斯涵, 张小平. 山东省农业净碳汇时空演化特征分析[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 227-234
LYU S H, ZHANG X P. Spatial-temporal characteristics of agricultural net carbon sink in Shandong Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 227-234
- [14] 王梁, 赵杰, 陈守越. 山东省农田生态系统碳源、碳汇及其碳足迹变化分析[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(7): 133-141
WANG L, ZHAO J, CHEN S Y. Analysis of ecosystem carbon sources/sinks and carbon footprint in farmland ecosystem of Shandong Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(7): 133-141
- [15] 田云, 张俊彪. 中国省级区域农业碳排放公平性研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11): 36-44
TIAN Y, ZHANG J B. Fairness research of agricultural carbon emissions between provincial regions in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(11): 36-44
- [16] 张晓芸. 中国秸秆焚烧大气污染物高分辨率排放特征研究[D]. 南京: 南京大学, 2019
ZHANG X H. High-resolution characteristics of air pollutant emissions from crop residue burning in China[D]. Nanjing:

- Nanjing University, 2019
- [17] 许清涛, 李玉波, 杨淑杰. 吉林省农业现代化进程中碳排放测算与分解[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(7): 103-109
XU Q T, LI Y B, YANG S J. Measurement and decomposition of carbon emission by the process of agricultural modernization in Jilin Province[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(7): 103-109
- [18] 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 J S, HU H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 21-27
- [19] 冉锦成, 马惠兰, 苏洋. 西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(3): 623-632
RAN J C, MA H L, SU Y. A study on agricultural carbon emission and carbon emission reduction potential in five provinces in Northwest China[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(3): 623-632
- [20] 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
- [21] 章胜勇, 尹朝静, 贺亚亚, 等. 中国农业碳排放的空间分异与动态演进——基于空间和非参数估计方法的实证研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1356-1363
ZHANG S Y, YIN Z J, HE Y Y, et al. Spatial differentiation and dynamic evolution of agricultural carbon emission in China — Empirical research based on spatial and non-parametric estimation methods[J]. China Environmental Science, 2020, 40(3): 1356-1363
- [22] 张小平, 王龙飞. 甘肃省农业碳排放变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 1029-1035
ZHANG X P, WANG L F. Variations and influential factors of agricultural carbon emissions in Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 1029-1035
- [23] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 中国农业碳排放特征及影响因素研究[J]. 统计与决策, 2020(5): 56-61
HU W L, ZHANG J X, WANG H L. Characteristics and influencing factors of agricultural carbon emission in China[J]. Statistics & Decision, 2020(5): 56-61
- [24] 赵宇. 江苏省农业碳排放动态变化影响因素分析及趋势预测[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(5): 97-102
ZHAO Y. Influencing factors and trend prediction on dynamic change of agricultural carbon emissions in Jiangsu Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(5): 97-102
- [25] 旷爱萍, 胡超. 广西农业碳排放影响因素和趋势预测[J]. 西南林业大学学报: 社会科学, 2020, 4(2): 5-13
KUANG A P, HU C. Influencing factors and trend forecast of agricultural carbon emission in Guangxi[J]. Journal of Southwest Forestry University: Social Science Edition, 2020, 4(2): 5-13
- [26] 何慧爽, 付帮杰. 我国粮食主产区农业碳排放测度与减排压力研究[J]. 生态经济, 2019, 35(11): 99-104
HE H S, FU B J. Measurement of agricultural carbon emission and pressure of emission reduction in main grain-producing areas of China[J]. Ecological Economy, 2019, 35(11): 99-104
- [27] 田成诗, 陈雨. 中国省际农业碳排放测算及低碳化水平评价——基于衍生指标与TOPSIS法的运用[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 359-410
TIAN C S, CHEN Y. China's provincial agricultural carbon emissions measurement and low carbonization level evaluation: based on the application of derivative indicators and TOPSIS[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 359-410
- [28] 王先锋. 改革开放以来中国共产党的惠农政策研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2012
WANG X F. Since the reform and opening up agricultural policy of the Communist Party of China[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2012
- [29] 杨滨键, 田景仁, 孙红雨. 农业生产碳足迹影响因素研究——基于SVAR模型[J]. 生态经济, 2019, 35(8): 120-127
YANG B J, TIAN J R, SUN H Y. Study on the factors affecting the carbon footprint of agricultural production based on the SVAR model[J]. Ecological Economy, 2019, 35(8): 120-127
- [30] 李明杰. 山东省种植业-养殖业时空变化分析及其驱动力研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019
LI M J. Analysis of spatio-temporal changes and driving force research of crop farming and aquaculture in Shandong Province[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019
- [31] 李波, 张俊彪, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80-86
LI B, ZHANG J B, LI H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(8): 80-86
- [32] 曹俐, 王莹, 雷岁江. 山东省农业碳排放的时空特征与脱钩弹性研究[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(17): 250-256
CAO L, WANG Y, LEI S J. Study on spatial-temporal characteristics and decoupling elasticity of agricultural carbon emissions in Shandong Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(17): 250-256
- [33] 黄锐, 周玉玺, 周霞. 山东省农业碳排放强度的时空特征与趋势演进[J]. 山东农业大学学报: 社会科学版, 2021, 23(2): 57-63
HUANG R, ZHOU Y X, ZHOU X. Space and temporal characteristics and trend evolution of agricultural carbon emission intensity in Shandong Province[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Social Science Edition, 2021, 23(2): 57-63
- [34] 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 Z X, WU X J. Low-carbon agricultural development and driving factors in Shandong Province[J]. Henan Science, 2021, 39(11): 1878-1886
- [35] 梁青青. 基于经典环境库茨涅茨曲线的我国农业碳排放拐点预测及区域比较[J]. 科技与经济, 2017, 30(177): 106-110
LIANG Q Q. Prediction and regional comparison of China's agriculture carbon emissions based on classical environmental Kuznets curves[J]. Science & Technology and Economy, 2017, 30(177): 106-110
- [36] 付帮杰. 粮食主产区农业碳排放动态变化与减排潜力研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020
FU B J. Dynamic change of agricultural carbon emission and its emission reduction potential in major grain producing areas[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020