

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.016

董晓龙, 郑兰钦, 连海峰, 等. 中国农业净碳汇的时空动态及其驱动因素[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 198-208.

DONG Xiaolong, ZHENG Lanqin, LIAN Haifeng, et al. Temporal and spatial dynamics and drivers of China's agriculture net carbon sink[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 198-208.

中国农业净碳汇的时空动态及其驱动因素

董晓龙^{1,2}, 郑兰钦^{1,2}, 连海峰^{1,2}, 田碧莲^{1,2}, 陈志勇^{1,2}

(1. 福建农林大学计算机与信息学院, 福州 350002; 2. 生态与资源统计福建省高校重点实验室, 福州 350002)

摘要: [目的] 在“双碳”战略背景下, 明确我国农业净碳汇的时空动态及其驱动因素, 为促进我国农业低碳发展提供理论依据。[方法] 基于水稻种植、农地利用、农用物资及畜禽养殖 4 大方面 19 类主要碳源和 7 类主要碳汇, 测算 2002—2022 年我国及 31 个省市区(除港澳台)农业净碳汇, 运用 Arc GIS 统计软件分析其时空动态, 并采用 LMDI 模型分析影响我国农业净碳汇的因素。[结果] 我国农业碳排放的主要碳源已由畜牧业的肠道发酵和粪便管理转向种植业的农用物资; 碳汇以水稻和玉米的贡献为主; 农业净碳汇和碳汇水平整体呈现波动上升的态势, 不同地区的农业净碳汇和碳汇水平表现为东北部高西部低的空间分布格局; 农业净碳汇存在显著的全局空间正相关, 各地区呈现出高高聚集或低低聚集的特征, 且空间聚集呈增长趋势; 农业净碳汇强度、农业产业结构和农村人口规模在抑制农业净碳汇方面发挥了重要作用, 农业经济发展水平在一定程度上增强了碳汇能力。[结论] 我国农业净碳汇呈现明显向好趋势, 提高农业生产水平、优化农业产业结构对推动我国农业低碳发展、实现低碳循环具有重要作用。

关键词: 中国; 农业净碳汇; 时空动态; LMDI 模型

中图分类号: X321; F302.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0198-11

Temporal and Spatial Dynamics and Drivers of China's Agriculture Net Carbon Sink

DONG Xiaolong^{1,2}, ZHENG Lanqin^{1,2}, LIAN Haifeng^{1,2}, TIAN Bilian^{1,2}, CHEN Zhiyong^{1,2}

(1. College of Computer and Information Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Key Laboratory for Ecology and Resources Statistics of Fujian Province, Fuzhou 350002, China)

Abstract: [Objective] Clarifying the temporal and spatial dynamics and drivers of China's agriculture net carbon sink provides a theoretical basis for promoting low-carbon development in the agricultural. [Methods] Based on the 19 types of the major carbon sources form four including of rice cultivation, agricultural land use, agricultural materials, and livestock breeding, and 7 types of carbon sinks, this study calculated the agricultural net carbon sink in China and its 31 provinces and cities (excluding Hong Kong, Macau, and Taiwan) from 2002 to 2022, using Arc GIS statistical software analyze temporal and spatial dynamics of agricultural net carbon sink, and using the LMDI model to analyze the drivers agricultural net carbon sink. [Results] The primary source of carbon emissions from agriculture had shifted from enteric fermentation and manure management in the livestock sector to agricultural materials in the plantation sector. Carbon sinks were dominated by the contribution of rice and maize. Overall, there has been fluctuating upward trends in both levels of agricultural net carbon sinks and carbon sinks. There was a spatial distribution pattern with high levels observed in northeast China while low levels were found in western regions. Furthermore, there was a significant positive correlation between net agricultural carbon sinks which exhibited features of high-high or low-low aggregation. Moreover, there was an increasing trend in spatial aggregation. Agricultural net carbon sink could be restrained by factors such as the intensity of the agricultural net carbon sink, the

收稿日期: 2024-02-05

修回日期: 2024-03-06

录用日期: 2024-03-14

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(42202333); 福建省自然科学基金项目(2022J01152); 福建省省级科技创新重点项目(2021G02007); 福建农林大学科技创新专项(CXZX2020107A)

第一作者: 董晓龙(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态与资源统计研究。E-mail: 2087000438@qq.com

通信作者: 连海峰(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事生态与资源统计研究。E-mail: hlian@fafu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

structure of the agricultural industry and the size of the rural population; however, it can be enhanced by economic development. [Conclusion] China's agriculture showed a positive trend regarding net carbon sinks. Optimizing its industry structure along with improving production methods are crucial for promoting low-carbon development and achieving a sustainable cycle.

Keywords: China; agriculture net carbon sink; temporal and spatial dynamics; LMDI model

Received: 2024-02-05

Revised: 2024-03-06

Accepted: 2024-03-14

Online(www.cnki.net): 2024-05-08

当前,全球气候变暖对生态系统和环境安全的威胁日益加剧,具体表现为极端气候事件频发、病虫害蔓延、海平面上升等诸多自然社会经济问题。现有研究^[1]显示,导致全球气候变暖的主要原因是人类活动引发的二氧化碳、甲烷等温室气体排放。为有效应对全球气候变化,世界各国相继制定了碳减排政策,我国在《国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》中明确提出力争在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。我国是农业大国,为提高农业生产效率以保证粮食产量稳定增加,在农业生产中大量使用化肥、农药、农膜、柴油等农用物资,但这也加剧了温室气体的排放^[2]。值得注意的是,农业系统亦具备碳汇特性,农作物在生长过程中可以吸收大气中的温室气体。因此,减少碳排和增加碳汇对实现我国“双碳”目标具有重大意义。

关于农业碳排放的研究主要围绕2个方面展开:一是农业碳排放测算及时空动态的研究。农业碳排放的测算方法主要包括排放系数法、模型模拟法和实地测量法等^[3],其中排放系数法被广泛应用于水稻种植^[4-5]、农地利用^[6-7]、农用物资^[8]和禽畜养殖^[9-10]等农业活动的碳排放测算。在确定测算方法和碳源后,学者们从国家^[11]和省级^[12]层面对农业碳排放时空动态特征进行分析。二是农业碳排放驱动因素的研究。目前研究农业碳排放影响因素的方法多种多样,如Kaya恒等式^[13]、LMDI模型^[14-15]、STIRPAT模型^[16]、机器学习算法^[17]等,其中LMDI模型被广泛应用于探究农业碳强度、农业产业结构、经济发展水平和人口规模等因素对农业碳排放的影响。近年来,农业碳源碳汇的双重属性也逐渐引起学者^[18]的广泛关注,部分学者^[19-20]将农业碳源碳汇有机衔接,着眼于农业净碳汇的研究。

当前文献对农业净碳汇的研究中,主要侧重于对农业净碳汇的测算,对其空间聚集性的探讨相对较少,对影响因素的研究更是鲜见。基于此,本研究对我国2002—2022年农业净碳汇进行测算,在分析其

动态变化规律的基础上,进一步分析其空间聚集性,并运用LMDI模型分析我国农业净碳汇的影响因素,旨在为我国实现双碳目标、促进农业绿色低碳发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域及数据来源

中国位于亚洲东部、太平洋的西岸,陆地总面积约960万km²,包括23个省、5个自治区、4个直辖市和2个特别行政区。本研究中我国及31个省(自治区、直辖市)每年化肥(折纯量)、农药、农膜和柴油等农用物资消耗量,主要农作物播种面积及产量,牛、马、驴、骡、猪、山羊和绵羊的年末存栏量,农业总产值及农村人口等基础数据均来自于2003—2023年《中国统计年鉴》^[21]《中国农村统计年鉴》^[22]及《中国人口和就业统计年鉴》^[23]。需要说明的是,鉴于数据获取的局限性,本研究不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾地区。

1.2 农业碳排放量测算

1988年,世界气象组织及联合国环境规划署共同成立政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,简称IPCC),该委员会主要任务是为全球各国提供温室气体排放清单并制定测算方法。本研究基于IPCC指南中的排放因子法,从种植业源和畜牧业源对我国农业碳排放进行测算。种植业源主要包括水稻种植过程中产生的碳排放、农作物种植导致农用地产生的碳排放以及农用物资(如化肥、农药等)的使用所导致的碳排放。畜牧业源包括反刍动物(如牛、羊等)肠道发酵过程中产生的碳排放,以及粪便管理不善导致的碳排放。具体测算公式为:

$$E_{\text{排}} = E_{\text{水稻}} + E_{\text{农用地}} + E_{\text{物资}} + E_{\text{肠道}} + E_{\text{粪便}} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{排}}$ 为农业碳排放总量(10^8t); $E_{\text{水稻}}$ 、 $E_{\text{农用地}}$ 、 $E_{\text{物资}}$ 、 $E_{\text{肠道}}$ 、 $E_{\text{粪便}}$ 分别为水稻种植、农用地、农用物资、反刍动物肠道发酵、粪便管理碳排放总量(10^8t)。

1.2.1 水稻碳排放测算 根据IPCC指南框架下的

排放因子法测算某一区域水稻种植产生的碳排放量,首先,需要对该区域水稻类型(早稻、中稻和晚稻)进行划分。其次,根据各类水稻的种植面积及其相应的甲烷(CH_4)排放因子计算出各类水稻产生的 CH_4 排放量。最后,将各类型水稻产生的 CH_4 排放量乘以其含碳量,并求和,即得到该区域水稻种植产生的碳排放量。将各区域碳排放量求和得我国水稻种植碳排放量,测算公式为:

$$E_{\text{水稻}} = \sum \sum F_{ij} \times \alpha_{ij} \times f_{\text{CH}_4} \quad (2)$$

式中: F_{ij} 为 j 区域 i 类水稻的种植面积 (hm^2); α_{ij} 为 j 区域 i 类水稻产生 CH_4 的排放因子,每个区域各类稻田对应的 CH_4 排放因子采用《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[24] 推荐值,见表 1; f_{CH_4} 为 CH_4 碳含量。IPCC 第六次评估报告^[25] 结果表明, CH_4 转化为 CO_2 潜能值为 27,1 kg CO_2 约包含 0.27 kg C,所以 1 kg CH_4 约包含 7.29 kg C。

表 1 水稻产生 CH_4 排放因子

Table 1 CH_4 emission factor for rice			kg/hm ²
区域	早稻	中稻	晚稻
华北	—	234.0	—
东北	—	168.0	—
华东	211.4	215.5	224.0
中南	241.0	236.7	273.2
西南	156.2	156.2	171.7
西北	—	231.2	—

注:华北区域包括北京、天津、河北、山西、内蒙古;东北区域包括辽宁、吉林、黑龙江;华东区域包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东;中南区域包括河南、湖北、湖南、广东、广西、海南;西南区域包括重庆、四川、贵州、云南、西藏;西北区域包括陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆。

1.2.2 农用地碳排放测算 农作物种植过程中,翻耕土壤会对土壤表层造成破坏,进而导致有机碳、氮的流失,释放大氧化亚氮(N_2O)等温室气体。根据 IPCC 的基本方法^[25],农用地 N_2O 排放量定义为农作物播种面积与其对应排放因子的乘积,将 N_2O 排放量乘以其碳含量即得到农用地碳排放量。本研究主要考虑水稻、小麦、玉米、薯类、豆类、烟叶和蔬菜种植所导致的碳排放,具体测算公式为:

$$E_{\text{农用地}} = \sum H_i \times \beta_i \times f_{\text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

式中: H_i 为第 i 种农作物的播种面积 (hm^2); β_i 为第 i 种农作物产生 N_2O 的排放因子,根据现有研究^[26],水稻、小麦、玉米、薯类、豆类、烟叶、蔬菜的排放因子分别为 0.24, 1.075, 2.53, 0.95, 2.29, 0.95, 4.94

kg/hm²。 $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 含碳量,IPCC 第六次评估报告^[25] 结果表明, N_2O 转化为 CO_2 潜能值为 273,所以 1 kg N_2O 中约包含 73.71 kg C。

1.2.3 农用物资碳排放测算 农业生产过程中使用物资产生的碳排放量可定义为某种农用物资的消耗量与其对应的碳排放因子的乘积。本研究主要考虑化肥、农药、农膜和柴油使用所产生的碳排放量,具体测算公式为:

$$E_{\text{物资}} = \sum Q_i \times \gamma_i \quad (4)$$

式中: Q_i 为第 i 种农用物资的消耗量(kg); γ_i 为第 i 种农用物资的碳排放因子。其中,化肥和农药碳排放因子采用美国橡树岭国家实验室(ORNL)^[27] 的推荐值,分别取 0.89, 4.93 kg/kg;农膜碳排放因子采用南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA)^[28] 的推荐值,取 5.18 kg/kg;柴油碳排放因子采用 IPCC 推荐值,取 0.59 kg/kg。

1.2.4 畜牧业肠道发酵碳排放测算 根据 IPCC 的基本方法^[25],某种动物的肠道发酵 CH_4 排放量等于该种动物的年末存栏数量与对应的 CH_4 排放因子相乘。各种动物的 CH_4 排放量求和后乘以 CH_4 含碳量即得到动物肠道发酵的碳排放量。具体测算公式为:

$$E_{\text{肠道}} = \sum U_i \times \delta_i \times f_{\text{CH}_4} \quad (5)$$

式中: U_i 为第 i 种动物的年末存栏量(头); δ_i 为第 i 种动物肠道发酵产生 CH_4 的排放因子,牛、马、驴、骡、猪、山羊、绵羊肠道发酵产生 CH_4 的排放因子采用《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[24] 推荐值,分别为 80.13, 18.00, 10.00, 10.00, 1.00, 8.33, 8.13 kg/(头·a)。

1.2.5 畜牧业粪便管理碳排放测算 畜牧业粪便管理碳排放量核算方法与肠道发酵类似,但畜牧业粪便管理产生 CH_4 和 N_2O 2 种气体且受气候条件影响不同地区 CH_4 和 N_2O 排放因子存在差异,具体测算公式为:

$$E_{\text{粪便}} = \sum U_{ij} \times \sigma_{ij} \times f_{\text{CH}_4} + \sum U_{ij} \times \tau_{ij} \times f_{\text{N}_2\text{O}} \quad (6)$$

式中: U_{ij} 为 j 区域 i 种动物的年末存栏量(头); σ_{ij} 和 τ_{ij} 为 j 区域 i 种动物粪便管理产生 CH_4 和 N_2O 的排放因子,动物粪便管理产生 CH_4 和 N_2O 排放因子采用《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[24] 推荐值,见表 2。

表 2 动物粪便产生 CH₄ 和 N₂O 排放因子

Table 2 Emission factors for CH ₄ and N ₂ O from animal faeces		kg/(头·a)						
区域	气体	牛	马	驴	骡	猪	山羊	绵羊
华北	CH ₄	5.14	1.09	0.60	0.60	3.12	0.17	0.15
	N ₂ O	1.32	0.33	0.19	0.19	0.23	0.09	0.09
东北	CH ₄	1.63	1.09	0.60	0.60	1.12	0.16	0.15
	N ₂ O	1.00	0.33	0.19	0.19	0.27	0.06	0.06
华东	CH ₄	5.82	1.64	0.90	0.90	5.08	0.28	0.26
	N ₂ O	1.26	0.33	0.19	0.19	0.18	0.11	0.11
中南	CH ₄	6.89	1.64	0.90	0.90	5.85	0.31	0.34
	N ₂ O	1.13	0.33	0.19	0.19	0.16	0.11	0.11
西南	CH ₄	4.86	1.64	0.90	0.90	4.18	0.53	0.48
	N ₂ O	1.26	0.33	0.19	0.19	0.16	0.06	0.06
西北	CH ₄	3.90	1.09	0.60	0.60	1.38	0.32	0.28
	N ₂ O	1.00	0.33	0.19	0.19	0.20	0.07	0.07

1.3 农业碳汇测算

本研究基于不同农作物的碳吸收率、经济系数和平均含水率,对我国主要农作物的碳汇量进行估算,具体测算公式^[29]为:

$$E_{\text{汇}} = \sum \frac{L_i \cdot Y_i \cdot (1 - Z_i)}{C_i} \tag{7}$$

式中: $E_{\text{汇}}$ 为农业碳汇量(10⁸ t); L_i 、 Y_i 、 Z_i 和 C_i 分别为第 i 类农作物的碳吸收率、产量(10⁸ t)、平均含水率和经济系数。其中,碳吸收率参数的取值参考伍国勇等^[30]研究,经济系数和平均含水率的取值参考《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[24],见表 3。

表 3 农业碳汇测算系数

Table 3 Measurement of agricultural carbon sinks				%
农作物	碳吸收率	经济系数	平均含水率	
水稻	41	49	15	
小麦	49	43	13	
玉米	47	44	14	
薯类	42	67	55	
豆类	45	39	18	
烟叶	45	83	17	
蔬菜	45	83	85	

1.4 农业净碳汇量测算

农业净碳汇量可定义为农业碳汇量与农业碳排放量的差。具体测算公式为:

$$E_{\text{净汇}} = E_{\text{汇}} - E_{\text{排}} \tag{8}$$

式中: $E_{\text{净汇}}$ 为农业净碳汇量(10⁸ t)。

1.5 农业净碳汇空间关联分析

空间自相关性是指同一变量在不同地理位置上的相关性,是检验空间点上某一要素的属性值是否与其相邻空间点上的属性值显著相关的重要指标^[31]。

本研究选取全局 Moran's I 指数对我国农业净碳汇的空间关联性进行分析,计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (G_i - \bar{G})(G_j - \bar{G})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}) \sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2} \tag{9}$$

式中: n 为样本量; G_i 、 G_j 为第 i 个和第 j 个样本净碳汇量; $\bar{G}$ 为样本净碳汇平均值(10⁸ t); W_{ij} 为空间权重矩阵,表达式为:

$$W_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{各样本无公共边界} \\ 1 & \text{各样本有公共边界} \end{cases} \tag{10}$$

1.6 农业净碳汇驱动因素分解

Kaya 恒等式包含能源消耗水平,能源消耗强度等 4 个影响碳排放的因素^[32]。具体表达式为:

$$E = \frac{E}{K} \times \frac{K}{\text{GDP}} \times \frac{\text{GDP}}{P} \times P \tag{11}$$

式中: E 、 K 、GDP 分别为碳排放量(10⁸ t)、能源消耗量(10⁸ t)、生产总值(万元); E/K 、 K/GDP 、 GDP/P 、 P 为影响碳排放的 4 个因素,具体为能源消耗水平、能源消耗强度、经济发展水平、人口规模。参考已有研究^[33-34],根据系统性、科学性和可操作性原则,将 Kaya 恒等式变形以分析影响中国农业净碳汇的因素,具体表达式为:

$$E_{\text{净汇}} = \frac{E_{\text{净汇}}}{\text{GDP}_{\text{农牧}}} \times \frac{\text{GDP}_{\text{农牧}}}{\text{GDP}_{\text{农}}} \times \frac{\text{GDP}_{\text{农}}}{P_{\text{农}}} \times P_{\text{农}} \\ = X_1 \times X_2 \times X_3 \times X_4 \tag{12}$$

$$X_1 = \frac{E_{\text{净汇}}}{\text{GDP}_{\text{农牧}}}, X_2 = \frac{\text{GDP}_{\text{农牧}}}{\text{GDP}_{\text{农}}}, X_3 = \frac{\text{GDP}_{\text{农}}}{P_{\text{农}}}, X_4 = P_{\text{农}} \tag{13}$$

式中: $\text{GDP}_{\text{农牧}}$ 为种植业和畜牧业生产总值(万元);

$GDP_{\text{农}}$ 为农业生产总值 (万元); $P_{\text{农}}$ 为农村人口 (万人)。 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为影响农业净碳汇的 4 个因素, 具体为农业净碳汇强度、农业产业结构、农业经济发展水平和农村人口规模。

运用对数迪氏指数分解 (LMDI) 模型对变形后的 Kaya 恒等式进行分解, 对公式 (12) 两边取对数, 表达式为:

$$\ln E_{\text{净汇}} = \ln X_1 + \ln X_2 + \ln X_3 + \ln X_4 \quad (14)$$

若将起始年的 $E_{\text{净汇}}$ 设为 $E_{\text{净汇}}^0$, 则 $\ln E_{\text{净汇}}^0 = \ln X_1^0 + \ln X_2^0 + \ln X_3^0 + \ln X_4^0$; 第 t 年的 $E_{\text{净汇}}$ 设为 $E_{\text{净汇}}^t$, 则 $\ln E_{\text{净汇}}^t = \ln X_1^t + \ln X_2^t + \ln X_3^t + \ln X_4^t$; 令 $\Delta E_{\text{净汇}} = E_{\text{净汇}}^t - E_{\text{净汇}}^0$, 则

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{净汇}} &= \frac{\Delta E_{\text{净汇}}}{\ln E_{\text{净汇}}^t - \ln E_{\text{净汇}}^0} (\ln E_{\text{净汇}}^t - \ln E_{\text{净汇}}^0) = \\ &= \frac{E_{\text{净汇}}^t - E_{\text{净汇}}^0}{\ln E_{\text{净汇}}^t - \ln E_{\text{净汇}}^0} [(\ln X_1^t + \ln X_2^t + \ln X_3^t + \ln X_4^t) - \\ &\quad - (\ln X_1^0 + \ln X_2^0 + \ln X_3^0 + \ln X_4^0)] = \\ &= \frac{E_{\text{净汇}}^t - E_{\text{净汇}}^0}{\ln E_{\text{净汇}}^t - \ln E_{\text{净汇}}^0} [(\ln X_1^t - \ln X_1^0) + (\ln X_2^t - \ln X_2^0) + \\ &\quad + (\ln X_3^t - \ln X_3^0) + (\ln X_4^t - \ln X_4^0)] = \\ &\quad \Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3 + \Delta X_4 \end{aligned} \quad (15)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Delta X_1 &= \frac{(E_{\text{净汇}}^t - E_{\text{净汇}}^0)(\ln X_1^t - \ln X_1^0)}{\ln E_{\text{净汇}}^t - \ln E_{\text{净汇}}^0} \\ \Delta X_2 &= \frac{(E_{\text{净汇}}^t - E_{\text{净汇}}^0)(\ln X_2^t - \ln X_2^0)}{\ln E_{\text{净汇}}^t - \ln E_{\text{净汇}}^0} \\ \Delta X_3 &= \frac{(E_{\text{净汇}}^t - E_{\text{净汇}}^0)(\ln X_3^t - \ln X_3^0)}{\ln E_{\text{净汇}}^t - \ln E_{\text{净汇}}^0} \\ \Delta X_4 &= \frac{(E_{\text{净汇}}^t - E_{\text{净汇}}^0)(\ln X_4^t - \ln X_4^0)}{\ln E_{\text{净汇}}^t - \ln E_{\text{净汇}}^0} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: ΔX_1 、 ΔX_2 、 ΔX_3 、 ΔX_4 分别为第 t 年与起始年相比, 由农业净碳汇强度、农业产业结构、农业经济发展水平和农村人口规模引起的农业净碳汇变化量。

2 结果与分析

2.1 中国农业净碳汇时序动态

根据公式 (1)~公式 (8) 测算得到中国 2002—2022 年农业碳源碳汇及净碳汇的动态变化情况见表 4 和图 1。中国农业碳排放总量整体呈现“平稳上升—急剧下降—波动上升—波动下降”4 个阶段变化历程。(1) 2002—2006 年为平稳上升阶段。这一阶段“两救济三补贴”政策的落实调动了农民从业积极性, 农业碳排放量从 2002 年 2.64×10^8 t 上涨到 2006 年 2.87×10^8 t, 涨幅为 8.71%。(2) 2007 年畜牧业遭

到高致病性猪蓝耳病等禽流感疫情的影响导致农业碳排放量急剧下降^[35]。(3) 2008—2015 年为波动上升阶段。这一阶段在保证畜牧业稳定增加的同时, 逐年提高农作物播种面积, 并进行一系列种植补贴, 农业碳排放总量从 2.60×10^8 t 上涨到 2.79×10^8 t, 涨幅为 7.31%。(4) 2016—2022 年为波动下降阶段。这一阶段我国实施“一控两减三基本”减排政策及“两山”理念, 提高了农民碳减排积极性, 农业碳排放量从 2.76×10^8 t 下降到 2.60×10^8 t, 预计未来会因“双碳”目标继续下降。

自 2007 年起, 中国农业碳排放主要来源由畜牧业转移至种植业。研究期内农用物资在种植业碳排放量中占比较大, 年平均占比 54.62%, 其中, 化肥是农用物资碳排放的重要来源, 其碳排放量年平均占比 60.95%, 且呈现出倒“U”形变化趋势, 2015 年排放总量达到最高值, 为 5.36×10^7 t, 随后因“化肥零增长行动”呈现逐年下降的趋势。玉米和蔬菜是农用地碳排放的重要来源, 二者碳排放量年平均占比 73.05%, 且二者碳排放量变化呈现出逐年增长的趋势, 增长率分别为 74.84%, 29.28%。牛和猪是畜牧业碳排放量的主要来源, 二者碳排放量年平均占比 81.60%, 且牛碳排放量下降幅度较大, 由 2002 年的 9.27×10^7 t 下降到 2022 年的 7.19×10^7 t, 下降 22.46%, 其原因可能是, 我国注重规模化养殖, 且牛的饲养过程难度大、生长周期长以及养殖成本高, 使得养牛农户逐渐减少。

中国农业碳汇量呈现上涨的态势, 2022 年中国农业碳汇量为 6.13×10^8 t, 较 2002 年 (3.86×10^8 t) 增长 58.81%。水稻、小麦和玉米对我国农业碳汇的贡献较大, 三者碳汇量年平均占比 83.29%, 且均呈现逐年增长的趋势, 增长率分别为 19.45%, 52.34%, 128.51%。表明我国农作物产量稳定增长, 农业碳汇能力逐渐增强。

中国农业净碳汇量呈现波动上升的态势, 从 2002 年的 1.22×10^8 t 上升到 2022 年的 3.53×10^8 t, 上升 189.34%。总体来看, 我国农业领域呈现出的碳效应是以碳汇为主, 碳排放为辅, 这导致农业净碳汇的变化趋势与碳汇的变化趋势基本一致。此外, 中国农业碳汇水平亦呈现波动上升的态势, 所谓农业碳汇水平, 即农业碳汇总量与农业碳排放总量的比值, 农业碳汇水平越高, 农业减排增汇效果越好。研究期内我国农业碳汇水平由 2002 年的 146.21% 上升到 2022 年的 235.77%, 表明我国在逐步提高农业低碳发展水平。

表 4 2002—2022 年中国农业净碳汇变化情况

Table 4 Changes in China's net agricultural carbon sink from 2002 to 2022

年份	种植业碳排放					畜牧业碳排放		碳排放量/ 10 ⁸ t	碳汇量/ 10 ⁸ t	净碳汇量/ 10 ⁸ t	碳汇水平/ %
	水稻种植/	农用地/	农用物资/	总量/	占比/%	总量/	占比/%				
	10 ⁸ t	10 ⁸ t	10 ⁸ t	10 ⁸ t		10 ⁸ t					
2002	0.44	0.16	0.62	1.22	46.21	1.42	53.79	2.64	3.86	1.22	146.21
2003	0.42	0.16	0.63	1.21	45.32	1.46	54.68	2.67	3.67	1.00	137.45
2004	0.45	0.16	0.68	1.29	46.07	1.51	53.93	2.80	4.00	1.20	142.86
2005	0.46	0.17	0.70	1.33	46.18	1.55	53.82	2.88	4.15	1.27	144.41
2006	0.46	0.17	0.72	1.35	47.04	1.52	52.96	2.87	4.25	1.38	148.08
2007	0.45	0.17	0.75	1.37	53.31	1.20	46.69	2.57	4.34	1.77	168.87
2008	0.46	0.17	0.76	1.39	53.46	1.21	46.54	2.60	4.59	1.99	176.54
2009	0.46	0.18	0.79	1.43	53.96	1.22	46.04	2.65	4.63	1.98	174.72
2010	0.47	0.18	0.81	1.46	54.68	1.21	45.32	2.67	4.79	2.12	179.40
2011	0.47	0.18	0.84	1.49	55.60	1.19	44.40	2.68	5.01	2.33	186.94
2012	0.47	0.19	0.86	1.52	55.88	1.20	44.12	2.72	5.19	2.47	190.81
2013	0.47	0.19	0.87	1.53	56.04	1.20	43.96	2.73	5.32	2.59	194.87
2014	0.47	0.19	0.88	1.54	55.80	1.22	44.20	2.76	5.37	2.61	194.57
2015	0.47	0.20	0.89	1.56	55.91	1.23	44.09	2.79	5.52	2.73	197.85
2016	0.47	0.20	0.88	1.55	56.16	1.21	43.84	2.76	5.48	2.72	198.55
2017	0.48	0.20	0.86	1.54	58.56	1.09	41.44	2.63	5.83	3.20	221.67
2018	0.47	0.20	0.82	1.49	58.20	1.07	41.80	2.56	5.81	3.25	226.95
2019	0.46	0.20	0.79	1.45	58.70	1.02	41.30	2.47	5.88	3.41	238.06
2020	0.46	0.20	0.76	1.42	56.13	1.11	43.87	2.53	5.93	3.40	234.39
2021	0.46	0.21	0.76	1.43	55.21	1.16	44.79	2.59	6.07	3.48	234.36
2022	0.46	0.21	0.74	1.41	54.23	1.19	45.77	2.60	6.13	3.53	235.77

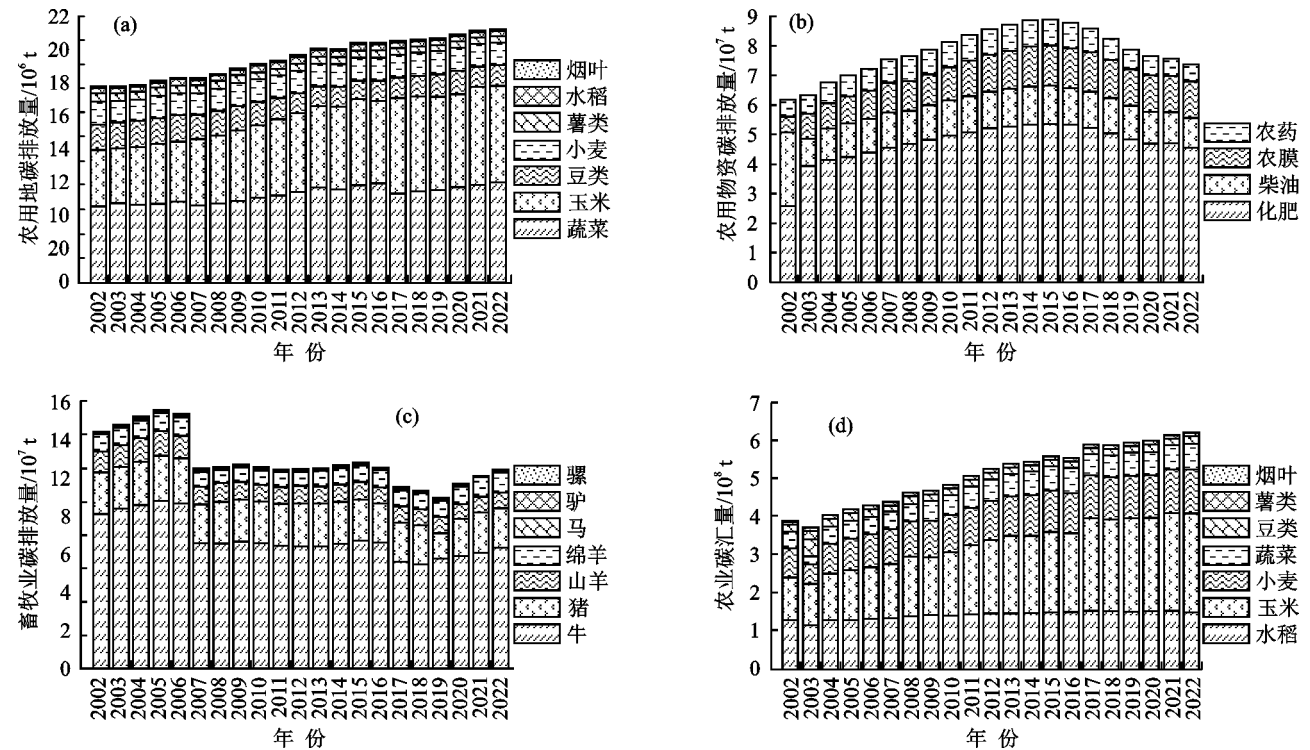


图 1 2002—2022 年中国农业碳源碳汇变化

Fig. 1 Changes in agricultural carbon sources and sinks in China from 2002 to 2022

2.2 中国农业净碳汇空间动态

2.2.1 中国农业净碳汇空间特征 取 2002 年、2012 年和 2022 年即前中后 3 个重点年份分析我国 31 省(自治区、直辖市)农业净碳汇和碳汇水平空间变化情况(图 2、图 3)。

农业净碳汇空间变化特征划分为低(<0)、较低

($0\sim1\times10^7\text{ t}$)、中等($1\times10^7\sim2\times10^7\text{ t}$)、较高($2\times10^7\sim3\times10^7\text{ t}$)和高($>3\times10^7\text{ t}$)5 个等级;农业碳汇水平空间变化特征划分为低($0\sim100\%$)、较低($100\%\sim200\%$)、中等($200\%\sim300\%$)、较高($300\%\sim400\%$)和高($400\%\sim500\%$)5 个等级,等级区间均为右连续。



注:底图来源于国家测绘地理信息局标准地图服务系统,审图号GS(2019)1822。下同。

图 2 2002—2022 年中国农业净碳汇空间变化特征
Fig. 2 Characteristics of spatial changes in China's net agricultural carbon sinks from 2002 to 2022

<http://stbxcj.alljournal.com.cn>

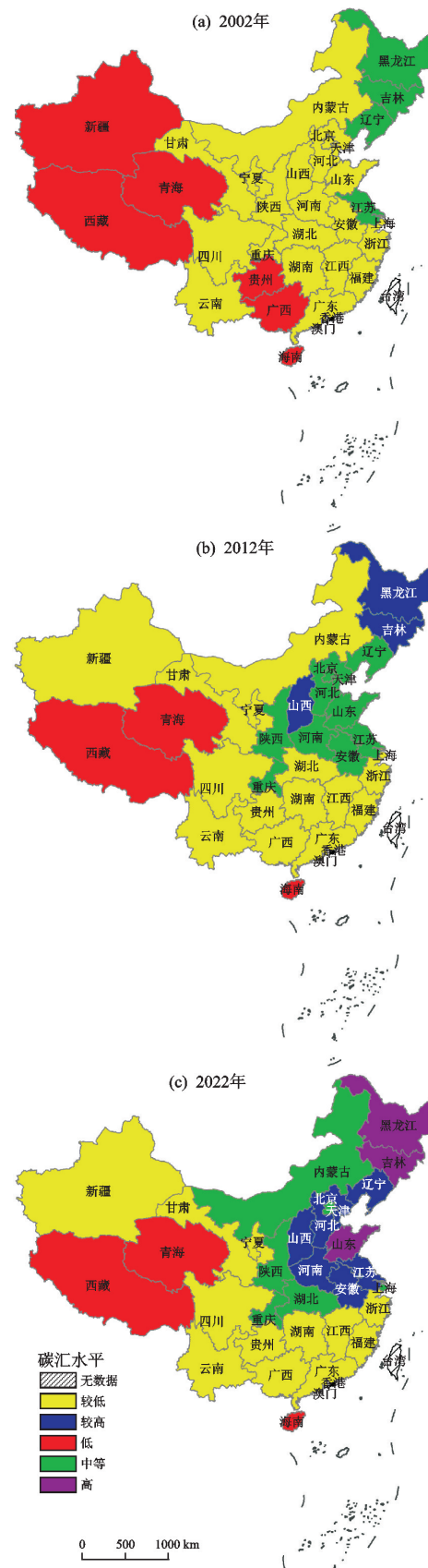


图 3 2002—2022 年中国农业碳汇水平空间变化特征

Fig. 3 Characteristics of spatial changes in the level of agricultural carbon sinks in China from 2002 to 2022

由图 2、图 3 可知,中国农业净碳汇和碳汇水平呈现东北部高西部低的空间分布格局。西部地区多

属草原牧区,得天独厚的自然资源为畜牧业的发展提供优越条件,值得注意的是,畜牧业本身暂未具备碳汇属性,且以畜牧业为主的地区往往无法实现碳汇补偿^[36],因此,西部地区农业净碳汇和碳汇水平相对较低;东北地区土地平坦肥沃,适宜大规模机械化农业生产,且该区域农业生产技术发展水平较高,因此,东北地区农业净碳汇和碳汇水平相对较高。

由图2、图3可知,2002—2022年我国大部分地区农业净碳汇和碳汇水平呈上升态势。例如,东北地区的辽宁、吉林和黑龙江,东部地区的天津、河北、江苏、山东,中部地区的山西、安徽和河南等,这些地区农业碳汇水平上升1~2个等级,且农业碳汇水平在中等以上。新疆、贵州等西部地区农业净碳汇和碳汇水平虽有上升态势,但大部分地区农业碳汇处于较低水平,表明这些地区农业碳减排已初见成效,但仍需

进一步加大碳减排力度。综合来看,我国农业碳减排工作应由东向西倾斜,进而推动我国农业低碳发展。

2.2.2 中国农业净碳汇空间关联特征 由表5可知,2002—2022年Moran's *I*指数均为正值,在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 的情况下, p 值均小于0.05,表明中国农业净碳汇存在显著的空间正相关。中国各地区农业净碳汇的空间分布并非表现出完全随机性,在空间上呈现出空间聚集(高高聚集或低低聚集)的现象,即农业净碳汇较高水平的地区相邻,较低水平的地区也相邻。各年份的空间聚集程度较为稳定,Moran's *I*指数sd值为0.02,表明2002—2022年中国农业净碳汇的空间总体格局没有发生较大变动,只是在原有格局上略有聚集调整。2002—2022年Moran's *I*指数呈现波动上升态势,由此可见中国各地区农业净碳汇趋于聚集的趋势在逐渐增强。

表5 中国农业净碳汇Moran's *I*指数

Table 5 Moran's *I* index of net carbon sinks in Chinese agriculture

年份	Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	年份	Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	年份	Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>
2002	0.42	3.72	0	2009	0.42	3.76	0	2016	0.42	3.79	0
2003	0.40	3.58	0	2010	0.41	3.70	0	2017	0.43	3.85	0
2004	0.43	3.78	0	2011	0.41	3.74	0	2018	0.42	3.83	0
2005	0.44	3.94	0	2012	0.42	3.81	0	2019	0.42	3.82	0
2006	0.48	4.27	0	2013	0.44	3.91	0	2020	0.42	3.83	0
2007	0.47	4.20	0	2014	0.42	3.80	0	2021	0.42	3.83	0
2008	0.45	4.03	0	2015	0.42	3.78	0	2022	0.43	3.87	0

2.3 中国农业净碳汇驱动因素分解

运用LMDI模型将农业净碳汇的驱动因素分解为农业净碳汇强度、农业产业结构、农业经济发展水平和农村人口规模,基于公式(12)~公式(16)测算2002—2022年历来各因素对中国农业净碳汇的影响方向和贡献值(表6)。

农业净碳汇强度是抑制我国农业净碳汇的主要驱动因素,2002—2022年农业净碳汇强度累计效应抑制农业净碳汇 1.35×10^8 t,历年来农业净碳汇强度对农业净碳汇基本呈现负向影响。农业净碳汇强度是指我国农业净碳汇总量与农牧业生产总值的比值,我国农业净碳汇总量呈现上升的态势,农牧业生产总值亦呈现上升的态势,但农业净碳汇强度呈现下降态势,表明农业净碳汇的增长速度落后于农牧业经济增长的速度。因此,我国应注重农牧业经济增长与农业生产力的提升协调发展,进而提高我国农业净碳汇强度。

农业产业结构是抑制我国农业净碳汇的另一驱动因素,与农业净碳汇强度相比,农业产业结构对农业净碳汇的抑制效果较小。2002—2022年农业产业结构累计效应抑制净碳汇 0.09×10^8 t,历年对净碳汇的贡献值呈现正向效应和负向效应的波动变换,表明

我国农林牧渔产业结构在不断调整优化以提高农业碳汇水平,如我国由2019年农林牧渔总产值的比值的38:42:18:2发展到2020年的42:38:18:2,由此可见,不断加强种植业等具备碳汇功能的产业有助于提高碳汇水平。

经济发展水平是促进我国农业净碳汇的主要驱动因素。2002—2022年经济发展水平累计效应导致净碳汇增加 4.88×10^8 t。历年来农业经济发展水平对我国农业净碳汇均呈现正向影响,表明我国在推动农业经济发展的同时,也在关注生态环境的可持续性,以实现二者的和谐共进。

农村人口规模是抑制我国农业净碳汇的重要驱动因素,其抑制效果介于农业净碳汇强度和农业产业结构之间。2002—2022年农村人口规模累计效应抑制农业净碳汇 1.13×10^8 t。农村人口规模是指我国农村人口数量的变动导致农业净碳汇的变动,2002—2022年我国农村人口呈现逐年下降的变化趋势,从2002年的78 241万人下降到2022年的49 104万人,年平均下降1.77%,随着我国城镇化水平的不断加快,预计未来农村人口规模对农业净碳汇仍起到抑制作用。

表 6 2002—2022 年中国农业净碳汇驱动因素分解

Table 6 Decomposition of the drivers of China's net agricultural carbon sink from 2002 to 2022

年份	对中国农业净碳汇影响方向和贡献值				总效应
	农业净碳汇 强度效应	农业产业 结构效应	农业经济 发展水平 效应	农村人口 规模效应	
2002—2003	-0.27	-0.04	0.11	-0.02	-0.22
2003—2004	-0.04	0.02	0.24	-0.02	0.20
2004—2005	-0.03	0	0.12	-0.02	0.07
2005—2006	0.08	-0.02	0.07	-0.02	0.11
2006—2007	0.10	0.02	0.31	-0.04	0.39
2007—2008	-0.10	0.01	0.34	-0.03	0.22
2008—2009	-0.06	-0.02	0.11	-0.04	-0.01
2009—2010	-0.14	0.01	0.32	-0.05	0.14
2010—2011	-0.12	0	0.40	-0.07	0.21
2011—2012	-0.06	-0.01	0.26	-0.05	0.14
2012—2013	-0.06	-0.01	0.25	-0.06	0.12
2013—2014	-0.09	-0.02	0.18	-0.05	0.02
2014—2015	0.02	-0.01	0.19	-0.08	0.12
2015—2016	-0.12	-0.01	0.20	-0.08	-0.01
2016—2017	0.44	-0.03	0.16	-0.09	0.48
2017—2018	-0.05	-0.02	0.21	-0.09	0.05
2018—2019	-0.16	0.02	0.39	-0.09	0.16
2019—2020	-0.43	0.06	0.46	-0.10	-0.01
2020—2021	-0.11	-0.03	0.30	-0.08	0.08
2021—2022	-0.15	-0.01	0.26	-0.05	0.05
累积效应	-1.35	-0.09	4.88	-1.13	2.31

3 结论

(1)2002—2022 年中国农业净碳汇呈现波动上升的态势,2022 年农业净碳汇为 3.53×10^8 t,较 2002 年(1.22×10^8 t)增长 189.34%。我国农业碳排放量呈现“平稳上升—急剧下降—波动上升—波动下降”四阶段变化历程,农业碳汇量呈现逐年上升的态势,2022 年中国农业碳汇量为 6.13×10^8 t,较 2002 年(3.86×10^8 t)增长 58.81%。

(2)碳源方面,我国农业碳排放的主要来源已由畜牧业转移至种植业,其中,农用物资是种植业碳排放的主要来源,2022 年农用物资碳排放占种植业碳排放总量的 52.48%;牛和猪是畜牧业碳排放量的主要来源,2022 年牛和猪的碳排放量占畜牧业碳排放总量的 80.70%。碳汇方面,水稻、小麦和玉米是碳汇的主要来源,2022 年水稻、小麦和玉米碳汇量(5.17×10^8 t)占总碳汇量的 84.32%。

(3)我国各地区农业净碳汇和碳汇水平均呈现上升趋势,且不同年份和地区的农业净碳汇存在差异,表现为东北部高西部低的空间分布格局。我国农业净碳

汇存在显著的全局空间正相关,各地区呈现出高高聚集或低低聚集的特征,且空间聚集程度逐渐增强。

(4)经济发展水平在促进农业净碳汇方面发挥了重要作用,农业净碳汇强度、农业产业结构和农村人口规模在抑制农业净碳汇方面发挥了重要作用。其中,经济发展水平和农业净碳汇强度对我国农业净碳汇的影响程度较大。

参考文献:

- [1] 张学智,王继岩,张藤丽,等.中国农业系统甲烷排放量评估及低碳措施[J].环境科学与技术,2021,44(3):200-208. ZHANG X Z, WANG J Y, ZHANG T L, et al. Assessment of methane emissions from China's agricultural system and low carbon measures[J]. Environmental Science and Technology, 2021, 44(3): 200-208.
- [2] 陈红,陈莎,叶艳妹.面向农业高质量发展的耕地保护转型研究[J].农业现代化研究,2023,44(1):55-64. CHEN H, CHEN S, YE Y M. Research on the transformation path of farmland protection under the high-quality agricultural development[J]. Research of Agricultural Modernization, 2023, 44(1): 55-64.
- [3] 胡永浩,张昆扬,胡南燕,等.中国农业碳排放测算研究综述[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(2):163-176. HU Y H, ZHANG K Y, HU N Y, et al. Review on measurement of agricultural carbon emission in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(2): 163-176.
- [4] 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. TIAN Y, YIN M H. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: Basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects[J]. China's Rural Economy, 2022(3): 104-127.
- [5] 吴昊玥,周蕾,何艳秋,等.中国种植业碳排放达峰进程初判及脱钩分析[J].中国生态农业学报(中英文),2023, 31(8):1275-1286. WU H Y, ZHOU L, HE Y Q, et al. Peaking process and decoupling analysis of carbon emissions of crop production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(8): 1275-1286.
- [6] 杨思存,霍琳,王成宝,等.基于 STIRPAT 模型的甘肃省农业碳排放特征分析[J].干旱区地理,2023, 46(9): 1493-1502. YANG S C, HUO L, WANG C B, et al. Characteristics of agricultural carbon emissions in Gansu Province based on STIRPAT model[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1493-1502.
- [7] 范振浩,邢巍巍,卜元卿,等.江苏省种植业碳排放的测算及达峰分析[J].水土保持学报,2023,37(5):78-85.

- FAN Z H, XING W W, BU Y Q, et al. Calculation and peak analysis of carbon emissions from agricultural planting in Jiangsu Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 78-85.
- [8] 王秀兰, 孟焱鑫, 单玉红, 等. 农户农业生产的碳排放及其影响因素: 以湖北省部分地区为例[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(6): 160-167, 174.
- WANG X L, MENG Y X, SHAN Y H, et al. Carbon emissions and influencing factors of farmers' agricultural production: Taking some areas in Hubei Province as examples[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6): 160-167, 174.
- [9] 白雪冰, 胡浩, 周应恒, 等. 中国畜牧业碳排放的时空演进及其影响因素分析[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(9): 260-274.
- BAI X B, HU H, ZHOU Y H, et al. Study on space-time evolution and influence factors of carbon emissions in China's animal husbandry[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(9): 260-274.
- [10] 白妙琴, 马文江, 彭星琳, 等. 新疆畜牧业碳排放强度动态演变与驱动力分析[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(2): 268-271, 278.
- BAI M Q, MA W J, PENG X L, et al. Dynamic evolution and driving force analysis of carbon emission intensity of animal husbandry in Xinjiang[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2024, 46(2): 268-271, 278.
- [11] 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.
- [12] 常青, 蔡为民, 谷秀兰, 等. 河南省农业碳排放时空分异、影响因素及趋势预测[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(1): 367-377.
- CHANG Q, CAI W M, GU X L, et al. Spatial-temporal variation, influencing factors, and trend prediction of agricultural carbon emissions in Henan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1): 367-377.
- [13] 桂河, 李静, 尚梦媛. “双碳”背景下的宁夏农业碳排放时序特征、驱动机理与脱钩效应研究[J]. *中南林业科技大学学报(社会科学版)*, 2021, 15(6): 37-44.
- GUI H, LI J, SHANG M Y. Study on temporal characteristics, driving mechanism and decoupling effect of agricultural carbon emission in Ningxia under the background of 'double carbon'[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology (Social Sciences)*, 2021, 15(6): 37-44.
- [14] 贺亚亚, 田云, 张俊飏. 湖北省农业碳排放时空比较及驱动因素分析[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2013, 32(5): 79-85.
- HE Y Y, TIAN Y, ZHANG J B. Analysis on spatial-temporal difference and driving factors of agricultural carbon emissions in Hubei Province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2013, 32(5): 79-85.
- [15] 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, 36(5): 56-62.
- HU W L, ZHANG J X, WANG H L. Characteristics and influencing factors of agricultural carbon emission in China[J]. *Statistics and Decision*, 2020, 36(5): 56-62.
- [16] 田云, 蔡艳蓉. 长江经济带农业碳排放 EKC 检验及其驱动因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(11): 2403-2417.
- TIAN Y, CAI Y R. EKC-based test for agricultural carbon emissions in Yangtze River economic belt and analysis of driving factors[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(11): 2403-2417.
- [17] 邓路, 袁圣博, 白萍, 等. 基于机器学习算法的新疆农业碳排放评估及驱动因素分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(2): 265-279.
- DENG L, YUAN S B, BAI P, et al. Evaluation of agricultural carbon emissions in Xinjiang and analysis of driving factors based on machine learning algorithms[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(2): 265-279.
- [18] 张精, 方埭, 魏锦达, 等. 基于碳足迹的安徽省农田生态系统碳源/汇时空差异[J]. *福建农业学报*, 2021, 36(1): 78-90.
- ZHANG J, FANG Y, WEI J D, et al. Carbon footprint-based temporal and spatial analysis on carbon sources/sinks at farmlands in Anhui Province[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36(1): 78-90.
- [19] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1298-1309.
- TIAN Y, ZHANG J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8): 1298-1309.
- [20] 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.
- LÜ 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.
- [21] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- National Bureau of Statistics. *China statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.

- [22] 国家统计局农村社会经济调查司.中国农村统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.
Department of Rural Social and Economic Survey, National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook[M].Beijing:China Statistics Press,2023.
- [23] 国家统计局人口和就业统计司.中国人口和就业统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.
Department of Population and Employment Statistics, National Bureau of Statistics. Chinese population and employment statistics yearbook[M].Beijing:China Statistics Press,2023.
- [24] 国家发展和改革委员会.省级温室气体清单编制指南(试行)[Z].北京:国家发展和改革委员会,2011.
National Development and Reform Commission. Guidelines for the preparation of provincial greenhouse gas inventories (trial)[Z].Beijing:National Development and Reform Commission,2011.
- [25] Intergovernmental Panel on Climate Change.AR6 Synthesis report: Climate change [Z].2023.
- [26] 宁静,李亚洁,王震,等.中国粮食主产省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 J, LI Y J, WANG Z, 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.
- [27] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emission, and net carbon emission, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J].Agriculture Ecosystems and Environment,2002,91(1/2/3):217-232.
- [28] CHENG K, PAN G X, SMITH P, et al. Carbon footprint of China's crop production: An estimation using agro-statistics data over 1993—2007 [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2011,142(3):231-237.
- [29] 李克让.土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M].北京:气象出版社,2000.
LI K R. Land use change, net greenhouse gas emissions, and terrestrial ecosystem carbon cycling[M].Beijing: Meteorological Publishing House,2000.
- [30] 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.
- [31] 徐小雨,董会忠,庞敏.东北三省农业碳排放效率时空演化特征及驱动因素分析[J].中国环境管理,2023,15(2):86-97.
XU X Y, DONG H Z, PANG M. Analysis on the spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of agricultural carbon emission efficiency in three north-eastern provinces of China[J].Chinese Journal of Environmental Management,2023,15(2):86-97.
- [32] 刘顺翊,李松青.湖南省农业碳排放脱钩弹性及驱动因素:基于 Tapio 脱钩模型与 LMDI 分析[J].四川农业大学学报,2023,41(5):952-960.
LIU S Y, LI S Q. Decoupling elasticity and drivers of agricultural carbon emissions in Hunan Province: Based on Tapio decoupling model and LMDI analysis[J].Journal of Sichuan Agricultural University,2023,41(5):952-960.
- [33] 孟军,范婷婷.黑龙江省农业碳排放动态变化影响因素分析[J].生态经济,2020,36(12):34-39.
MENG J, FAN T T. Research on affecting factors decomposition of agricultural CO₂ emission in Heilongjiang Province [J]. Ecological Economy, 2020, 36(12):34-39.
- [34] 郑博福,梁涵,万炜,等.江西省县域农业碳排放时空格局及影响因素分析[J].农业工程学报,2022,38(23):70-80.
ZHENG B F, LIANG H, WAN W, et al. Spatial-temporal pattern and influencing factors of agricultural carbon emissions at the county level in Jiangxi Province of China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(23):70-80.
- [35] 王树芬,高冠龙,李伟,等.2000—2020 年山西省农业碳排放时空特征及趋势预测[J].农业环境科学学报,2023,42(8):1882-1892.
WANG S F, GAO G L, LI W, et al. Carbon emissions from agricultural and animal husbandry in Shanxi Province: Temporal and regional aspects, and trend forecast [J].Journal of Agro-Environment Science,2023,42(8):1882-1892.
- [36] 陈卫洪,钱海慧,颜光耀.畜牧业产业集聚对畜牧业碳排放的影响:基于库兹涅茨曲线与空间间接效应分析[J].黑龙江畜牧兽医,2023(20):10-21,28.
CHEN W H, QIAN H H, YANG G Y. Effects of animal husbandry industry agglomeration on animal husbandry carbon emissions: Based on EKC and spatial spillover effect analysis[J].Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine,2023(20):10-21,28.