

中国农业农村碳中和效应时空分异与动态演进特征

熊媛媛, 苏洋

(新疆农业大学 经济管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的] 分析中国2000—2020年中国30个省(市、区)碳中和效应的变化特征和动态演进趋势, 定量揭示农业农村生态环境特征和内在动因机理, 为进一步推动中国农业农村“碳中和”进程提供理论依据。[方法] 基于大农业视角, 运用排放系数法选取37类碳源和28类碳汇指标, 测算了中国2000—2020年21期30个省(市、区)农业农村碳中和效应, 揭示其时空分布特征, 并采用Kernel-Density方法观测其动态演进特征。[结果] ①中国农业农村碳中和效应呈平稳上升趋势, 年均递增2.79%, 环比增速总体处于波动上升态势, 其中碳汇增速明显快于碳排放增速。②中国农业农村碳中和效应空间分布不均衡程度明显增加, 呈“中间低四周高”的分布格局, 省域差异明显: 排在前10位的省(市、区)占全国碳中和效应的66.42%, 而排在后10位的省(市、区)仅占全国的4.72%。③碳中和效应水平呈现: 中部地区>东部地区>西部地区的态势, 各地区间存在较大差异, 种植业是减排增汇的最大源头。④中国农业农村碳中和效应密度函数曲线中心整体向右偏移, 各省(市、区)空间差距逐步扩大, 存在区域发展不均衡的现象。[结论] 低碳经济与现代农业相互交织, 各地区应当因地制宜地制定农业农村领域碳中和发展规划, 实现区域间碳中和协同机制, 加速农业农村碳中和进程。

关键词: 农业农村; 碳中和效应; 时空分异; 动态演进特征; 中国

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0378-11

中图分类号: X22, F205

文献参数: 熊媛媛, 苏洋. 中国农业农村碳中和效应时空分异与动态演进特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 378-388. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240008.002; Xiong Yuanyuan, Su Yang. Spatial-temporal differentiation and dynamic evolution characteristics of carbon neutral effect in agriculture and rural areas of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 378-388.

Spatial-temporal Differentiation and Dynamic Evolution Characteristics of Carbon Neutral Effect in Agriculture and Rural Areas of China

Xiong Yuanyuan, Su Yang

(College of Economics and Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objective] The change characteristics and dynamic evolution trend of carbon neutral effect in 30 provinces (municipalities and regions) in China from 2000 to 2020 were analyzed, and the characteristics and internal motivation mechanism of ecological environment in agriculture and rural area were quantitatively revealed, in order to provide theoretical basis for further promoting the process of “carbon neutral” in agriculture and rural areas of China. [Methods] Based on the perspective of large agricultural production systems, 37 types of carbon sources and 28 types of carbon sinks were selected by the emission coefficient method to calculate the carbon neutrality effect for agriculture and rural areas in 30 provinces (municipalities and regions) in China during 2000—2020. The spatial and temporal distribution characteristics of the carbon neutrality effect were determined, and its dynamic evolution characteristics were observed by the Kernel-Density method. [Results] ① The carbon neutral effect in China’s agriculture and rural areas increased steadily over time, with an average annual increase of 2.79%. The overall growth rate fluctuated, and the growth rate of carbon sinks was significantly faster than the growth rate of carbon emissions. ② The spatial

收稿日期: 2023-04-15

修回日期: 2023-07-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“西北欠发达地区农业碳排放增长机理与减排政策体系研究: 基于新疆农户调查分析”(71640031); 新疆维吾尔自治区“天山青年计划”培养项目“食品安全源头治理中农户低碳生产行为决策与激励机制研究”(2020Q074)

第一作者: 熊媛媛(1999—), 女(回族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 硕士研究生, 研究方向为农村区域与发展。Email: xyy8762022@163.com.

通信作者: 苏洋(1987—), 男(汉族), 河南省安阳市人, 博士, 副教授, 主要从事农村资源与环境方面的研究。Email: 398199494@qq.com.

imbalance of the carbon neutral effect in China's agriculture and rural areas increased significantly, showing a distribution pattern of "lower in the middle and higher in the periphery". The difference between provinces was obvious: the top 10 provinces (municipalities and regions) accounted for 66.42% of the national carbon neutral effect, while the bottom 10 provinces (municipalities and regions) accounted for only 4.72% of the national carbon neutrality effect. ③ The level of the carbon neutrality effect showed a distribution trend of "central region > eastern region > western region", and there were great differences between different regions. The planting industry was the largest source of emission reduction and sink increase. ④ The center of the carbon neutrality effect density function curve in China's agriculture and rural areas had shifted to the right as a whole, and the spatial gap between provinces (municipalities and regions) has gradually expanded. Unbalanced regional development was observed. [Conclusion] Low-carbon economy and modern agriculture are intertwined. All regions should formulate carbon neutral development plans in agriculture and rural areas according to local conditions, bring about an inter-regional carbon neutral coordination mechanism, and accelerate the process of carbon neutral in agriculture and in rural areas.

Keywords: agriculture and rural areas; carbon neutral effect; spatial-temporal differentiation; dynamic evolution characteristics; China

实现“碳达峰”和“碳中和”目标是中国应对气候变化和促进社会低碳转型做出的实质性承诺^[1]。统筹农业农村发展和碳中和的双赢格局是农业农村领域响应可持续发展目标的关键路径^[2]。农业农村碳中和涉及农业生产、农民生活、生态环境保护和资源利用等,意味着涉农产业链的全方位变革,要求农业农村的发展模式全面向绿色低碳转型^[3]。2021年9月22日,中共中央、国务院发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰、碳中和工作的意见》,为包括农业农村在内的重点领域实现碳达峰、碳中和指明了方向。2022年6月30日,农业农村部、国家发改委印发《农业农村减排固碳实施方案》,进一步提出农业农村领域要以实施降碳升汇为抓手,降低温室气体排放强度。中国在绿色低碳发展理念推动下,实现经济发展的转型是进一步迈向高质量一体化发展的内在需求^[4],因此,完善农业农村领域碳中和核算体系,科学估算农业农村碳中和效应,厘清其时空演化特征对推动低碳治理、支撑双碳战略实施具有重要意义。

目前,碳排放、碳汇的单一视角下的研究较为广泛,也是研究农业农村碳中和问题的基础^[5]。测算方法包括遥感估算法^[6]、排放系数法^[7]、投入产出法^[8]等,在核算的基础上,相关学者运用状态空间模型(state space model)^[9], logarithmic mean divisia index模型^[10], Tapio脱钩模型^[11]等传统计量模型围绕着经济增长、能源结构、技术进步等因素展开研究。其研究尺度涵盖宏观、微观,覆盖时空差异^[12]、空间溢出^[13]等方向。对农业农村碳中和问题的研究主要是研究视角不同,分为农业单一产业或单一地区的净碳核算^[14-15]、农业碳中和实现成本^[16-17]和实现路径^[18]两方面,关于综合性的农业视角构建全面的碳

中和核算体系的研究有限,已有研究更是忽略了农村生活能源消耗方面,而事实上农村生活能源消耗产生的碳排放不可小觑^[11],并且对于时空差异、动态演进特征方面关注较少。因此,本研究以大农业为视角,将农业、农村两个领域碳排放、碳汇纳入统一核算框架,构建全面的农业农村碳中和效应核算体系,并从时空角度分析中国2000—2020年30个省(市、区)碳中和效应的变化特征和动态演进趋势,可以定量揭示农业农村生态环境特征和内在动因机理,对于进一步推动“碳中和”进程具有重要的理论参考意义。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 碳排放测算方法及系数

目前,农业农村碳排放源头呈现多样性特征: ①种植业农业生产过程中的生产资料的投入产生的碳排放及农作物种植过程中对土壤的破坏产生的温室气体; ②畜牧业养殖过程中产生的温室气体; ③机动渔船使用时化石燃料消耗产生的碳排放; ④农村居民生活所需能源消费产生的碳排放。根据全碳分析原理,参考李国志等^[10]、万文玉等^[8]等构建中国农业农村碳排放测算公式为:

$$E_{\text{总}} = \sum E_i = \sum (T_i \times \epsilon_i) \quad (1)$$

式中: $E_{\text{总}}$ 为农业农村种植业、畜牧业、农村居民生活能源碳排放总量(t); E_i 为各类碳源排放量(t); T_i 为各类碳源投入量(t); ϵ_i 为各类碳源的碳排放系数。渔业碳排放测算见公式(3)。

在此基础上,确定农业生产、作物排放、畜牧养殖和农村居民生活能源的具体碳源因子及其所对应的碳排放系数。其中,畜牧业碳排放测算需要按照“1 t $\text{CH}_4 = 6.82 \text{ t C}$, 1 t $\text{N}_2\text{O} = 81.27 \text{ t C}$ ”的折算系数将

CH₄ 和 N₂O 换算为 C 当量,农村居民生活能源碳排放测算将能源单位折算为标准煤再计算 C 当量。

1.1.1 种植业碳排放系数 种植业碳排放包含化肥、农膜、农药、柴油以及翻耕和灌溉下的直接排放和

水稻、玉米、棉花、冬小麦、春小麦、大豆和蔬菜产生的间接排放。本研究将农作物排放产生的 N₂O 排放换算成 C 当量计算,农业生产碳排放系数参考美国橡树林实验室、IPCC 等,农作物碳排放系数见表 1。

表 1 种植业碳排放测算系数

Table 1 Calculation coefficient of planting carbon emission

农业生产排放碳源	排放系数	资料来源	农作物 排放碳源	排放系数(以 N ₂ O 计)/ (kg · hm ⁻²)	资料来源
化肥/(kg · kg ⁻¹)(以 C 计)	0.895 6	美国橡树岭实验室 ^[19]	水稻	0.24	
农膜/(kg · kg ⁻¹)(以 C 计)	5.18	IREEA	玉米	2.532	
农药/(kg · kg ⁻¹)(以 C 计)	4.934 1	美国橡树岭实验室 ^[19]	棉花	0.48	
农用柴油/(kg · kg ⁻¹)(以 C 计)	0.592 7	IPCC	冬小麦	2.05	冉锦成等 ^[22]
农业翻耕/(kg · hm ⁻²)(以 C 计)	312.60	中国农业大学生物技术学院 ^[20]	春小麦	0.40	
农业灌溉/(kg · hm ⁻²)(以 C 计)	266.48	段华平等 ^[21]	大豆	0.77	
			蔬菜	4.21	

注:IREEA 为南京农业大学农业资源与生态环境研究所;IPCC 为联合国气候变化政府间专家委员会。

1.1.2 畜牧业碳排放系数 畜牧业碳排放主要来自反刍动物肠道发酵、粪便排放所产生的 CH₄ 和 N₂O

排放,选取牛、绵羊、山羊、马、骡、驴、猪和骆驼作为畜牧业排放碳源,具体碳排放测算系数见表 2。

表 2 畜牧业碳排放测算系数

Table 2 Carbon emission calculation coefficient of animal husbandry

畜牧业 排放碳源	排放系数(以 CH ₄ 计)/[kg/(头 · 年)]		排放系数(以 N ₂ O 计)/[kg/(头 · 年)]	资料来源
	肠道发酵	粪便排放	粪便排放	
牛	47.00	1.00	1.39	N ₂ O 来自胡向东等 ^[23] ; CH ₄ 来自 IPCC
绵羊	5.00	0.15	0.33	
山羊	5.00	0.17	0.33	
马	18.00	1.64	1.39	
骡	10.00	0.90	1.39	
驴	10.00	0.90	1.39	
猪	1.00	4.00	0.53	
骆驼	46.00	1.39	1.39	

1.1.3 生活碳源排放系数 农村生活碳排放主要指农村居民生活能源直接碳排放。参考《中国能源统计年鉴 2021》附录 4 折标准煤参考系数及 2006 年《IPCC 国家温室气体清单指南》碳排放系数(表 3)。

1.1.4 渔业碳排放测算及系数 渔业碳排放主要测算海洋捕捞业机动渔船的碳排放。海洋捕捞业分布地区为北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、广西、海南,本研究对上述 12 个地区的渔业碳排放进行测算。海洋捕捞机动渔船主要使用柴油,采用美国橡树岭国家实验室提出的化石燃料燃烧的测算方法,选用柴油碳排放系数^[24]。不同作业方式的机动渔船用油系数如表 4 所示。渔业碳排放测算公式参考邵桂兰等^[14]可变形为:

表 3 农村居民生活能源碳排放测算系数
Table 3 Calculation coefficient of carbon emission from rural household energy

农村居民生活 能源排放碳源	标准煤折算系数 ^①	碳排放系数 C ^② / 标准煤
原煤	0.714 3/(kg · kg ⁻¹)	0.755 9/(kg · kg ⁻¹)
焦炭	0.971 4/(kg · kg ⁻¹)	0.971 4/(kg · kg ⁻¹)
汽油	1.471 4/(kg · kg ⁻¹)	0.553 8/(kg · kg ⁻¹)
液化石油气	1.714 3/(kg · kg ⁻¹)	0.003 0/(kg · kg ⁻¹)
煤油	1.471 4/(kg · kg ⁻¹)	0.571 4/(kg · kg ⁻¹)
柴油	1.457 1/(kg · kg ⁻¹)	0.592 1/(kg · kg ⁻¹)
燃料油	1.428 6/(kg · kg ⁻¹)	0.618 5/(kg · kg ⁻¹)
原油	1.428 6/(kg · kg ⁻¹)	0.585 7/(kg · kg ⁻¹)
天然气	1.33/(kg · m ⁻³)	0.448 3/(kg · kg ⁻¹)
电力	0.122 9/[kg · (kWh) ⁻¹]	0.251 3/[t · (10 ⁶ Wh) ⁻¹]

注:资料来源^①为《中国能源统计年鉴 2021》;^②为 IPCC。

$$P_{\text{燃油}} = \sum_{i=1}^n (G_i \times Q_i) \quad (2)$$

$$E_{\text{渔业}} = P_{\text{燃油}} \times n \times m \quad (3)$$

式中: $E_{\text{渔业}}$ 为渔业碳排放(t); $P_{\text{燃油}}$ 为指机动渔船燃油消耗(t); G_i 为作业类型功率(kW); Q_i 为不同作业类型的用油系数(t/kW); n 为燃油折标准煤系数 1.457 1(kg/kg); m 为燃油标准煤含碳系数 0.592 1(kg/kg)。

1.2 碳汇测算方法及系数

1.2.1 种植业碳汇测算及系数 种植业碳汇的测算主要指农作物碳汇。种植业需要考虑农作物固碳的能力,即作物进行光合作用后形成的生物产量,测算系数见表 5。参考王修兰^[25]、韩召迎等^[26],测算公式为:

$$C_{\text{种植业}} = \sum_{i=1}^e C_{\text{农作物}} = \sum_{i=1}^e [c_i \times U_i \times (1-r)] / H_i \quad (4)$$

式中: $C_{\text{种植业}}$ 为种植业碳汇(t); $C_{\text{农作物}}$ 为农作物的

固碳量(t); e 为农作物种类数; c_i 为农作物的碳吸收率(%); U_i 为农作物的经济产量(t); r 为农作物经济产品的含水量(%); H_i 为农作物经济系数(kg/kg)。

表 4 渔船不同作业类型用油系数

Table 4 Oil consumption coefficient of different types of fishing vessels

渔船作业类型	用油系数/[t·(kW) ⁻¹]
拖网	0.480
围网	0.492
刺网	0.451
张网	0.328
钓具	0.328
其他方式	0.312

注:资料来源为《国内机动渔船油价补助用油测算参考标准》。

表 5 种植业碳汇测算系数

Table 5 Calculation coefficient of planting carbon sink

作物碳汇品种	经济系数/(kg·kg ⁻¹)	含水量/%	碳吸收率/%	作物碳汇品种	经济系数/(kg·kg ⁻¹)	含水量/%	碳吸收率/%	资料来源
水稻	0.45	12.00	41.40	薯类	0.70	70.00	42.30	王修兰 ^[25] , 韩召迎等 ^[26]
小麦	0.40	12.00	48.50	甘蔗	0.50	50.00	45.00	
玉米	0.40	13.00	47.10	甜菜	0.70	75.00	40.70	
豆类	0.34	13.00	45.00	蔬菜	0.60	90.00	45.00	
油菜籽	0.25	10.00	45.00	瓜类	0.70	90.00	45.00	
花生	0.43	10.00	45.00	烟草	0.55	85.00	45.00	
向日葵	0.30	10.00	45.00	其他作物	0.40	12.00	45.00	
棉花	0.18	8.00	45.00					

1.2.2 畜牧业碳汇测算 畜牧业碳汇主要指草地碳汇,碳汇系数参考孙贤斌^[27],采用 0.022 t/hm²。测算公式为:

$$C_{\text{畜牧业}} = A_{\text{草地}} \times \gamma \quad (5)$$

式中: $C_{\text{畜牧业}}$ 为畜牧业碳汇(t); $A_{\text{草地}}$ 为草地面积(hm²); γ 为草地碳汇系数(t/hm²)。

1.2.3 渔业碳汇测算及系数 渔业碳汇测算主要根据海水养殖中贝类和藻类的产量进行测算,测算地区与渔业碳排放测算地区保持一致。渔业碳汇测算系数如表 6 和表 7 所示,构建测算公式为:

$$C_{\text{渔业}} = C_{\text{贝类}} + C_{\text{藻类}} \quad (6)$$

$$C_{\text{贝类}} = \sum_{i=1}^n (R_i \times \theta_i + K_i \times \beta_i) \quad (7)$$

$$R_i = P_{\text{贝类}} \times \alpha_i \times \mu_i \quad (8)$$

$$K_i = P_{\text{贝类}} \times \alpha_i \times \delta_i \quad (9)$$

$$C_{\text{藻类}} = \sum_{i=1}^n (P_{\text{藻类}} \times \omega_i) \quad (10)$$

式中: $C_{\text{渔业}}$ 为渔业碳汇(t); $C_{\text{贝类}}$ 为贝类固碳量(t);

$C_{\text{藻类}}$ 为藻类固碳量(t); R_i 为贝类软组织产量(t); θ_i 为贝类软组织碳含量系数(%); K_i 为贝类壳的质量(t); β_i 为贝类壳的碳含量系数(%); $P_{\text{贝类}}$ 为贝类产量(t); α_i 为贝类干湿转化系数(%); μ_i 为贝类软组织的质量转换系数(%); δ_i 为贝类壳的质量转换系数(%); $P_{\text{藻类}}$ 为藻类产量(t); ω_i 为藻类碳含量系数(%)。

1.2.4 林业碳汇测算 林业碳汇主要指林地碳汇,碳汇系数参考冯杰^[33],采用 0.581 t/hm²,测算公式为:

$$C_{\text{林业}} = A_{\text{林地}} \times \sigma \quad (11)$$

式中: $C_{\text{林业}}$ 为林业碳汇(t); $A_{\text{林地}}$ 为林地面积(hm²); σ 为林地碳汇系数(t/hm²)。

1.3 中国农业农村碳中和效应

农业农村碳中和效应是指抵消农业农村碳排放后的固碳能力,即碳排放与碳汇的净值,测算公式为:

$$C_{\text{碳中和效应}} = C - E \quad (12)$$

$$C = C_{\text{种植业}} + C_{\text{畜牧业}} + C_{\text{渔业}} + C_{\text{林业}} \quad (13)$$

$$E = E_{\text{总}} + E_{\text{渔业}} \quad (14)$$

式中： $C_{\text{碳中和效应}}$ 为中国农业农村碳中和效应量(t)； $C_{\text{种植业}}$ 、 $C_{\text{畜牧业}}$ 、 $C_{\text{渔业}}$ 、 $C_{\text{林业}}$ 分别为种植业、畜牧业、渔业、林业的碳汇总量(t)；

业、林业的碳汇量(t)； E 为碳排放总量(t)； $E_{\text{总}}$ 为种植业、畜牧业、农村居民生活能源碳排放总量； $E_{\text{渔业}}$ 为渔业碳排放量(t)。

表 6 渔业碳汇测算系数

Table 6 Calculation coefficient of fishery carbon sink

贝类	碳含量/%		资料来源	藻类	碳含量/%	资料来源	
	软组织	壳					
牡蛎	45.98	12.68	张继红等 ^[28]	海带	31.20	周毅等 ^[29]	
贻贝	44.4	11.76		江蓠	20.60		
扇贝	42.84	11.4		羊栖草	36.70		
蛤	44.90	11.52		石花菜	41.75		
其他	43.87	11.44		紫菜	38.19		林贞贤等 ^[30]
				裙带菜	26.40		纪建悦等 ^[31]

表 7 贝类质量转换系数

Table 7 Conversion coefficient of shellfish quality

种类	牡蛎	贻贝	扇贝	蛤	其他	资料来源
干湿转化系数/%	65.1	75.28	63.89	52.55	64.21	岳冬冬等 ^[32]
质比重/%	软组织	6.14	8.47	14.35	1.98	
	壳	93.86	91.53	85.65	98.02	

1.4 中国农业农村碳中和效应水平

为了不受总量基数影响,便于区域间进行横向比较,参考田云等^[15]的研究成果,采用农业农村碳排放量与碳汇量比值的百分比来衡量中国农业农村碳中和效应水平,测算公示为:

$$C_{\text{碳中和效应水平}} = (E/C) \times 100\% \quad (15)$$

式中： $C_{\text{碳中和效应水平}}$ 为中国农业农村碳中和效应水平(%)； C 为碳汇总量(t)； E 为碳排放总量(t)。

1.5 Kernel-Density 密度估计方法

Kernel-Density 密度估计方法是对概率密度进行非参数估计,一般用于衡量随机变量的分布形态。其方法的优点在于对数据样本分布不附加假定,能够从样本本身出发研究数据分布特征,一定程度上避免了人为主观造成的误差。设 x 为一个随机变, x_1, x_2, \dots, x_i 代表独立分布的 n 个区域的观测值,则密度函数的固定带宽 Kernel-Density 为:

$$f(x) = \frac{1}{ih} \sum_{j=1}^i N\left(\frac{x-x_j}{h}\right) \quad (16)$$

式中： $N\left(\frac{x-x_j}{h}\right)$ 为核密度函数； i 为样本观测数, h 为带宽,选取数据的自动带宽。核密度函数具体形式有 Uniform 核、Triangular 核、Epanechnikov 核、Quartic 核、Gaussian 核和 Cosine 核,参考文献^[34]的研究基础上,本研究选取 Epanechnikov 核密度函数形式进行相关分析。

结合核密度函数图的分布形式,可有效判断农业农村碳中和效应在不同观测期间地区差距的变化,进而获得其动态演进特征。若核密度曲线图中,波形向右(左)移动,则农业农村碳中和效应增加(减少);右拖尾逐渐拉长(缩短)、峰值降低(上升)、波峰数为多峰(单峰),说明农业农村碳中和效应地区差异程度变大(缩小),较高碳中和效应呈集聚(扩散)现象,存在多级分化(无分化)特征。

1.6 数据来源

林地、草地面积来自 2001—2021 年《中国统计年鉴》;化肥、农膜和农药消耗、农作物播种面积、农作物产量、牛、绵羊、山羊、马、骡、驴、猪、骆驼数量等来自 2001—2021 年《中国农村统计年鉴》;水产品产量、海洋捕捞业不同作业类型功率来自 2001—2021 年《中国渔业统计年鉴》;原煤、焦炭、汽油、液化石油气、煤油、柴油、燃料油、原油、天然气、电力使用量等来自 2001—2021 年《中国能源统计年鉴》。由于数据的可得性和资料的有限性,本研究不包括西藏、台湾、香港和澳门,部分缺失数据采用平滑法插值补充。

2 结果与分析

2.1 中国农业农村碳中和效应的时序特征

由表 8 可知,中国农业农村碳中和效应呈平稳上升趋势,由 2000 年的 4.12×10^8 t 增至 2020 年的 6.94×10^8 t,增长了 68.53%,年均递增 2.79%,环比

增速总体处于波动上升态势。其中,农业农村碳排放由2000年的 2.55×10^8 t增至2020年的 2.84×10^8 t,增长了11.14%,年均递增0.56%;碳汇由2000年的 6.67×10^8 t增至2020年的 9.78×10^8 t,增长了46.58%,年均递增2.03%。值得注意的是,从近5年来看,农业农村碳排放从2016—2019年环比增速均呈负数,2020年虽呈正数,但明显慢于碳汇环比增

速,说明中国碳抵消潜力巨大。究其原因,农业农村碳中和发展的相关政策对减排增汇起到了明显的推动作用。

2015年中国提出农业绿色转型发展战略,后续提出“双碳”目标以及农业强国背景下一系列碳相关文件出台,低碳农业举措的施行以及经济累积效应的不断凸显,中国低碳发展成效显著。

表8 2000—2020年中国农业农村碳排放、碳汇及碳中和效应

Table 8 Carbon emissions, carbon sinks and net carbon effect in agricultural and rural areas in China from 2000 to 2020

年份	碳排放/ 10^8 t	环比增速/%	碳汇/ 10^8 t	环比增速/%	碳中和效应/ 10^8 t	环比增速/%
2000	2.55	—	6.67	—	4.12	—
2001	2.58	0.96	6.72	0.67	4.14	0.49
2002	2.59	0.58	6.84	1.88	4.25	2.69
2003	2.66	2.58	6.61	-3.37	3.95	-6.99
2004	2.74	3.18	7.15	8.19	4.41	11.56
2005	2.81	2.35	7.30	2.00	4.49	1.79
2006	2.65	-5.58	7.53	3.15	4.88	8.60
2007	2.64	-0.36	7.69	2.16	5.05	3.53
2008	2.64	0.05	8.06	4.83	5.42	7.33
2009	2.71	2.49	8.18	1.51	5.47	1.03
2010	2.76	1.80	8.32	1.67	5.56	1.61
2011	2.81	1.97	8.66	4.09	5.85	5.14
2012	2.86	1.92	8.95	3.40	6.09	4.11
2013	2.93	2.32	9.20	2.77	6.27	2.99
2014	2.98	1.82	9.29	1.01	6.31	0.63
2015	3.05	2.16	9.48	2.00	6.43	1.92
2016	3.03	-0.74	9.46	-0.23	6.43	0.01
2017	2.93	-3.12	9.57	1.19	6.64	3.23
2018	2.86	-2.47	9.56	-0.14	6.70	0.88
2019	2.82	-1.39	9.70	1.50	6.88	2.74
2020	2.84	0.57	9.78	0.80	6.94	0.89
年均增长率/%	0.56	—	2.03	—	2.79	—

2.2 中国农业农村碳中和效应的空间特征

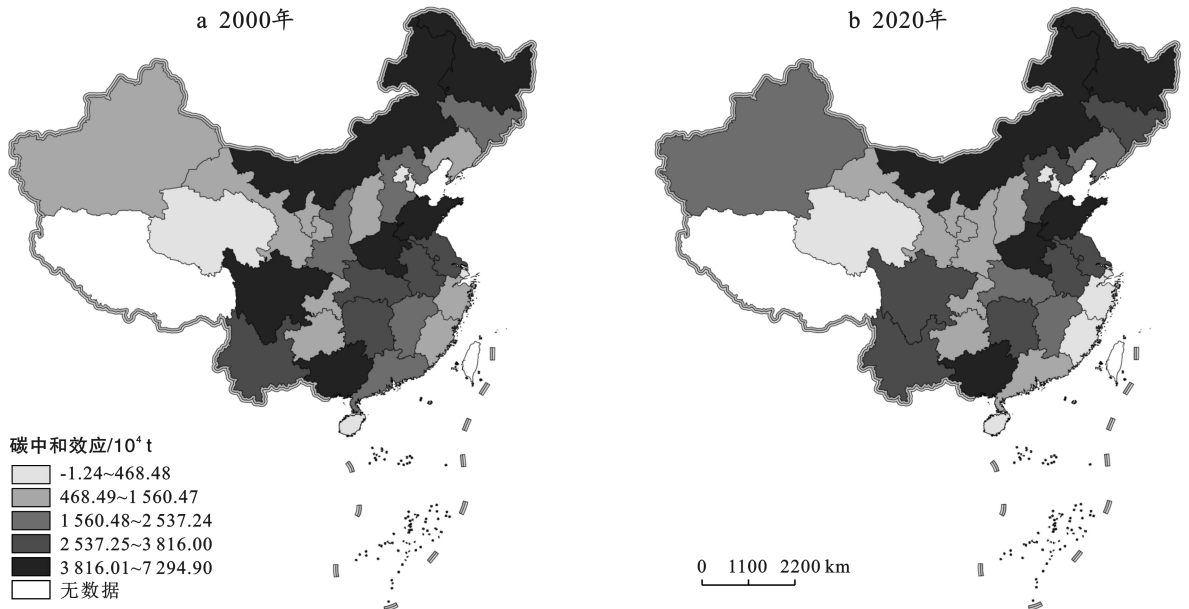
由图1可知,2000年到2020年中国农业农村碳中和效应空间分布不均衡程度明显增强,多地色块明显加深,总体呈“中间低,四周高”的分布格局。由表9可知,除上海外,中国其他省(市)农业农村碳中和效应均为正值,表明这些地区在一定程度上可净化第二、三产业所导致的部分温室气体。黑龙江占据榜首,其农业农村碳中和效应高达 7.29×10^7 t,河南紧随其后,为 6.63×10^7 t,高位排在3—10位的省(市)依次是内蒙古(5.27×10^7 t)、广西(4.97×10^7 t)、山东(4.89×10^7 t)、四川(3.82×10^7 t)、吉林(3.55×10^7 t)、安徽(3.52×10^7 t)、江苏(3.13×10^7 t)、河北(3.04×10^7 t),10个省(市)碳中和效应占全国总碳中和效

应的比例达66.42%;上海的碳中和效应最低,为 -1.24×10^4 t,海南、北京、天津、浙江紧随其后,分别为 1.59×10^5 t, 7.20×10^5 t, 1.60×10^6 t, 1.65×10^6 t,低位排到第6—10位的省(市)依次是青海(2.41×10^6 t)、宁夏(2.59×10^6 t)、福建(4.68×10^6 t)、重庆(9.04×10^6 t)、贵州(9.96×10^6 t),10个省(市)碳中和效应仅占全国的4.72%。

综上分析可知,各省(市)的碳中和效应差距较大,两极分化现象较为突出。

2.3 中国农业农村碳中和效应水平的比较

考虑到中国各省份经济水平和地理条件,采用东、中、西部三大经济分区对中国农业农村碳中和效应水平进行分析,比值越低,效应水平越高,反之亦然。



注:图1基于自然资源部标准地图服务网站,审图号GS(2020)4619号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1 2000年及2020年中国农业农村碳中和效应

Fig.1 Carbon neutrality in agriculture and rural China in 2000 and 2020

表9 2020年中国各省(市/区)农业农村碳排放、碳汇及碳中和效应

Table 9 Carbon emissions, carbon sinks and carbon neutral effect in agricultural and rural areas of China's provinces (municipalities and regions) in 2020

省份	碳排放/ 10^4 t	碳汇/ 10^4 t	碳中和效应/ 10^4 t	碳中和效应 水平/%
北京	33.47	105.46	71.99	31.74
天津	101.33	261.30	159.97	38.78
河北	1 830.12	4 874.20	3 044.08	37.55
辽宁	914.66	2 999.22	2 084.56	30.50
上海	104.21	102.97	-1.24	101.21
江苏	1 018.53	4 148.30	3 129.77	24.55
浙江	966.40	1 131.07	164.67	85.44
福建	660.30	1 128.79	468.49	58.50
山东	1 964.30	6 858.04	4 893.74	28.64
广东	1 082.20	2 642.67	1 560.47	40.95
广西	863.47	5 834.29	4 970.82	14.80
海南	327.27	343.18	15.91	95.36
山西	650.50	1 964.73	1 314.23	33.11
内蒙古	1 631.07	6 898.84	5 267.77	23.64
吉林	854.00	4 400.06	3 546.06	19.41
黑龙江	1 413.74	8 708.64	7 294.90	16.23
安徽	1 011.27	4 533.02	3 521.75	22.31
江西	637.08	2 705.69	2 068.61	23.55
河南	1 976.77	8 603.66	6 626.89	22.98
湖北	1 154.83	3 692.06	2 537.23	31.28
湖南	1 223.16	3 957.48	2 734.32	30.91
重庆	374.67	1 278.70	904.03	29.30
四川	1 485.94	5 301.94	3 816.00	28.03
贵州	678.76	1 674.27	995.51	40.54
云南	1 295.25	4 252.52	2 957.27	30.46
陕西	963.43	2 201.56	1 238.13	43.76
甘肃	890.54	1 925.05	1 034.51	46.26
青海	459.74	700.68	240.94	65.61
宁夏	255.06	514.02	258.96	49.62
新疆	1 528.90	4 033.71	2 504.81	37.90

由表10可知,中国农业农村碳中和效应水平呈“中部地区>东部地区>西部地区”的态势,分别为23.21%,32.42%,36.24%,说明中国农业农村碳中和效应各地区存在较大差异。从碳排放结构来看,种植业中部地区碳排放最高,畜牧业碳排放西部地区最高,渔业碳排放东部地区最高,农村居民生活能源碳排放东部地区最高,分别为 6.95×10^7 , 2.80×10^7 , 1.83×10^7 , 1.67×10^7 t;从碳汇结构来看,种植业中部地区碳汇最高,畜牧业碳汇西部地区最高,渔业碳汇东部地区最高,林业碳汇中部地区最高,分别为 3.77×10^8 , 3.56×10^6 , 1.98×10^6 , 7.45×10^7 t。同时可以看出,种植业是减排增汇的最大源头。因此,产生这种态势的原因是中部地区农作物种植面积大,林地覆盖率高,碳汇种类多,吸收能力较强;东部地区居民生活能源消耗和渔业排放过高,林地、草地覆盖率较低,碳吸收率不高,渔业碳汇吸收能力不强,没有足量的碳汇抵消碳排放;西部地区碳排放虽不及其他地区,也主要依赖林地、草地碳汇,但其种植业碳汇过低,农作物吸收能力弱,碳汇能力相加也远远不及其他地区,无法抵消其他产业碳排放。

2.4 中国农业农村碳中和效应的动态演进特征

通过分析 Kernel-Density 密度曲线的分布区位、样态及峰度延展等可以反映农业农村碳中和效应分布态势及演进趋势。本研究选取2000,2005,2010,2015,2020年绘制中国及三大经济区的核密度分布曲线(图2)进行趋势判断。

表 10 2020 年中国分区农业农村碳中和效应水平

Table 10 Carbon neutral effect level in agriculture and rural areas of China's regional in 2020

地区	碳排放/ 10^5 t				碳汇/ 10^5 t				碳中和效应/ 10^5 t (总碳汇-总碳排放)	碳中和效应水平/% (总碳排放/总碳汇)
	种植业	畜牧业	渔业	农村居民生活能源	种植业	畜牧业	渔业	林业		
东部	537.24	99.13	182.92	167.33	2 628.42	6.36	19.77	388.40	2 056.32	32.42
中部	694.56	214.37	0.00	146.32	3 774.68	26.40	0.00	745.34	3 491.18	23.21
西部	394.61	279.85	0.00	118.77	1 510.24	35.62	0.00	642.40	1 395.02	36.24

图 2a 整体上描绘了中国农业农村碳中和效应的演变情况。密度函数曲线中心向右偏移,形态上右拖尾存在逐年拉长现象,表明中国农业农村碳中和效应呈平稳上升趋势,各省(市)空间差距逐步扩大。由双峰形态转向单峰形态过渡,表明较高碳中和效应呈集聚和扩散相结合的态势,存在两极分化特征。

图 2b—2d 描绘了中国东中西部地区碳中和效应的演变情况。由图 2b 可知,东部地区碳中和效应函数曲线中心向右偏移,右拖尾逐年拉长,存在双峰格局,表明东部地区碳中和效应呈上升趋势,区内差距逐步扩大,较高碳中和效应呈集聚现象,存在两极分化特征。由图 2c 可知,中部地区碳中和效应核密度

函数整体向右移动,右拖尾先短后长,表明区内碳中和效应呈上升趋势,并且 2000—2005 年区内差距有所缩小,但 2005 年以后差距均逐步扩大。波峰陡峭到平缓,到 2020 年已无明显波峰,表明中部地区碳中和效应在高值区分布较为均匀。由图 2d 可知,西部地区碳中和效应函数曲线先右后左移动,表明西部地区碳中和效应在 2000—2015 年呈上升趋势,但在 2015—2020 年呈下降趋势。右拖尾先短后长,表明区内差距在 2000—2005 年有所缩小,2005—2020 年逐步扩大。波峰存在双峰格局,并且峰值先降后升,表明西部地区在碳中和效应高值区呈集中态势,存在两极分化特征。

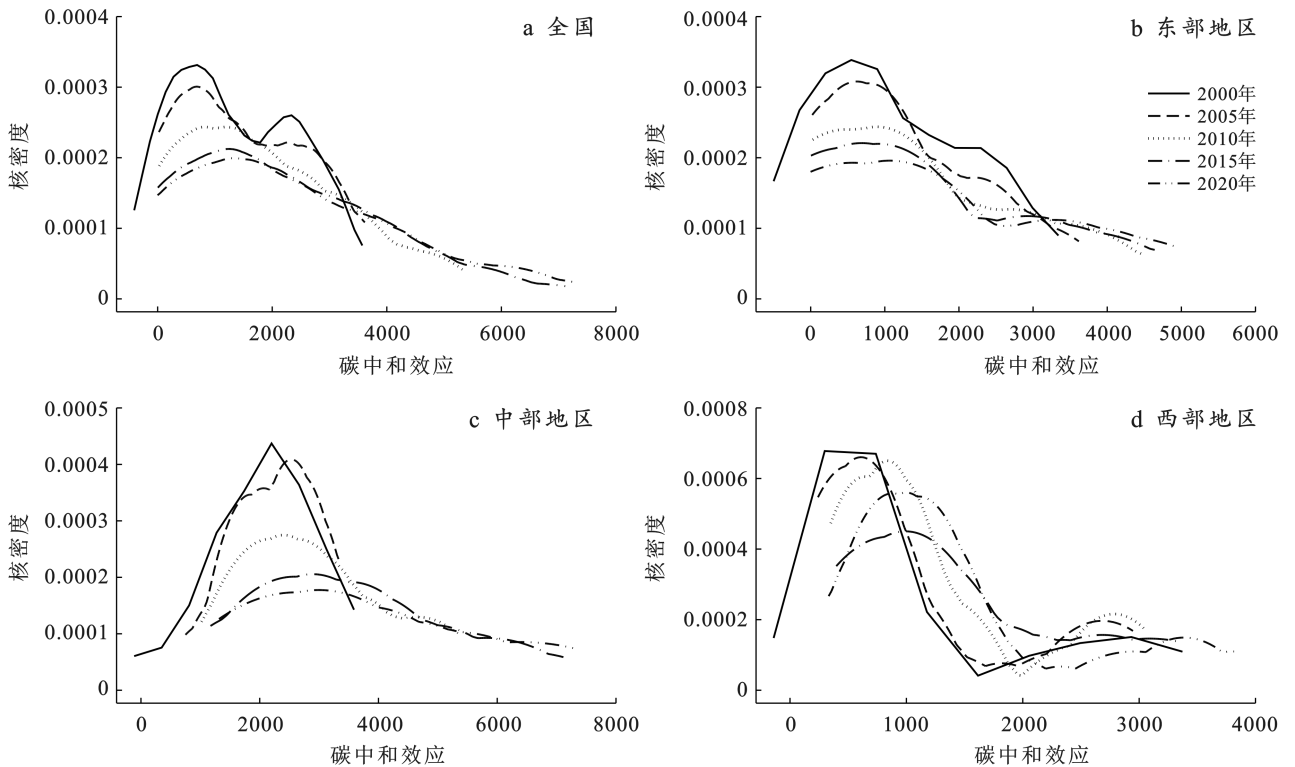


图 2 2000—2020 年中国农业农村碳中和效应动态演进

Fig.2 Dynamic evolution of carbon neutrality in agriculture and rural areas of China from 2000 to 2020

3 讨论

本研究基于种植业、畜牧业、渔业、农村居民生活能源 4 个方面 37 类主要碳源和种植业、林业、畜牧业、

渔业四个方面 28 类主要碳汇种类,测算了中国农业农村碳排放量、碳汇量和碳中和效应。随后分析了中国农业农村碳中和效应时空特征和动态演进趋势,所取得的结论丰富了中国农业农村碳中和问题的研究。

(1) 2000—2020 年中国农业农村碳中和效应逐年增加,并增速平稳,由此可见未来伴随着“双碳”目标下的减排增汇政策实施力度的增强,农业农村碳中和效应必将长势可观。其中本研究所得的碳中和效应体量与张坤等^[1]、王垚等^[4]、董文军等^[5]所测算的碳中和效应存在一定差异,主要由于本研究中对测算地区以及指标的选取都更为广泛和完整。碳源考虑了种植业、畜牧业、渔业和农村居民生活能源消费碳排放;碳汇将种植业、林业、畜牧业、渔业综合测算碳汇量。与仅测算种植业、畜牧业的碳中和效应相比出现升高的情况,但这无疑更加贴合现实农业发展情况,也从侧面印证了本研究碳中和效应指标测算体系的合理性和可行性。

(2) 中国农业农村碳中和效应空间特征和动态演进特征均显示区域发展不均衡,这与田云等^[11]、郭海红等^[34]的研究结果部分一致。未来发展农业农村碳中和的首要目标是实现区域低碳协同发展,结合各区域农业产业发展基础和潜力,系统规划各区域间低碳转型进程,构建空间关联网络,制定区域协同机制。其次由于各地区经济发展、农业现代化水平、农业基础条件等方面具有差异,应在国家农业低碳发展政策的总体指导原则下,各地区还应当因地制宜地制定适合本地区特点的农业农村碳中和发展规划。同时,种植业是减排增汇的最大源头,未来要充分发挥种植业的减排潜力,构建低碳、高效、绿色的农业生产模式。一方面,可以扩大种植碳吸收能力强的作物的规模,增加农作物光合作用的碳吸收。另一方面,可以科学配比农业化学品的投入,建立低碳高效的农业化学品投入体系。

(3) 本研究采用的碳排放及碳汇系数主要来源于 IPCC 以及相关文献资料等,但与实际勘测数据相比仍存在相对误差,未来研究可以运用遥感数据对核算系数进行修正,提高测算精度。其次,农村生活碳排放可以进一步细化为直接与间接碳排放,本研究仅考虑了直接碳排放,未来研究可以加入农村居民间接碳排放核算,完善农业农村碳中和效应核算体系。此外,限于篇幅的影响,未能将农业农村碳中和效应与农业经济、技术进步、能源结构等因素结合展开更深层的关联分析,未来研究可以进一步探索农业农村碳中和效应的影响因素,为制定更具针对性的低碳发展政策提供参考依据。

4 结论

(1) 中国农业农村碳中和效应呈平稳上升趋势,由 2000 年的 4.12×10^8 t 增至 2020 年的 6.94×10^8 t,

增长了 68.53%,年均递增 2.79%,环比增速总体处于波动上升态势,其中碳汇增速明显快于碳排放增速。由此可见,中国在减排增汇方面取得了一定成效;

(2) 2000—2020 年,中国农业农村碳中和效应空间分布不均衡程度明显增加,呈“中间低四周高”的分布格局,省域差异明显;排在前 10 位的省(市、区)占全国碳中和效应的 66.42%,而排在后 10 位的省(市、区)仅占全国的 4.72%;

(3) 碳中和效应水平呈:中部地区 > 东部地区 > 西部地区的态势,分别为 23.21%,32.42%,36.24%,各地区间存在较大差异。从碳排碳汇内部结构来看,种植业是减排增汇的最大源头;

(4) 中国农业农村碳中和效应密度函数曲线中心整体向右偏移,各省(市、区)空间差距逐步扩大,存在区域发展不均衡的现象。东、西部地区在观测期呈现出向碳中和效应高值区的集聚效应,中部地区则呈现出扩散效应。

[参 考 文 献]

- [1] 张坤,陈梦玫,蒋尉,等.民族地区碳达峰碳中和的潜力、挑战及建议[J].阅江学刊,2023,15(2):70-81,172-173. Zhang Kun, Chen Mengmei, Jiang Wei, et al. Potential, challenges and suggestions for peaking carbon neutrality in ethnic areas [J]. Yuejiang Journal, 2023, 15(2): 70-81, 172-173.
- [2] 罗浩轩.中国农业农村碳排放趋势测算及实现碳中和政策路线图研究[J].广西社会科学,2023(2):121-131. Luo Haoxuan. Estimation of agricultural and rural carbon emission trend and research on policy roadmap to achieve carbon neutrality in China [J]. Social Sciences of Guangxi, 2023(2):121-131.
- [3] 喻智健,龚亚珍,郑适.中国农业农村碳中和:理论逻辑、实践路径与政策取向[J].经济体制改革,2022(6):74-81. Yu Zhijian, Gong Yazhen, Zheng Shi. Carbon neutrality in China's agriculture and rural areas: Theoretical logic, practical path and policy orientation [J]. Reform of Economic System, 2022(6):74-81.
- [4] 王垚,朱美琳,王勇,等.长三角城市群碳中和潜力评价与实现策略研究[J].规划师,2022,38(3):61-67. Wang Yao, Zhu Meilin, Wang Yong, et al. Evaluation and realization strategy of carbon neutrality potential in Yangtze River delta urban agglomerations [J]. Planners, 2022, 38(3):61-67.
- [5] 董文军,孟英,张俊,等.黑龙江省农业实现碳中和的主要途径及建议[J].黑龙江农业科学,2021(11):79-84. Dong Wenjun, Meng Ying, Zhang Jun, et al. Main approaches and suggestions for realizing carbon neutrality in agriculture in Heilongjiang Province [J]. Heilongjiang

- Agricultural Sciences, 2021(11):79-84.
- [6] 孟庆香,刘祺,李保路,等.2000—2020 年河南省土地利用强度与碳排放脱钩关系[J].水土保持通报,2023,43(3):421-429.
- Meng Qingxiang, Liu Qi, Li Baolu, et al. Decoupling relationship between land use intensity and carbon emissions in Henan Province from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(3):421-429.
- [7] 韦玉琼,龙飞,岳欣冉.乡村振兴背景下农村碳排放变动及减排策略[J].农业经济问题,2022(9):62-73.
- Wei Yuqiong, Long Fei, Yue Xinran. Changes and emission reduction strategies of rural carbon emissions under the background of rural revitalization [J]. Issues of Agricultural Economics, 2022(9):62-73.
- [8] 万文玉,赵雪雁,王伟军,等.我国农村居民生活能源碳排放的时空特征分析[J].生态学报,2017,37(19):6390-6401.
- Wan Wenyu, Zhao Xueyan, Wang Weijun, et al. Spatial and temporal characteristics of domestic energy carbon emissions of rural residents in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(19):6390-6401.
- [9] 汝醒君,汪臻.中国农村居民生活用能碳排放影响因素研究[J].生态经济,2017,33(1):73-76.
- Ru Xingjun, Wang Zhen. Study on influencing factors of carbon emission from domestic energy use of rural residents in China [J]. Ecological Economy, 2017,33(1):73-76.
- [10] 李国志,李宗植.中国农业能源消费碳排放因素分解实证分析:基于 LMDI 模型[J].农业技术经济,2010,(10):66-72.
- Li Guozhi, Li Zongzhi. An empirical analysis of factorization of carbon emissions from agricultural energy consumption in China: Based on LMDI model [J]. Agricultural Technical Economics, 2010,(10):66-72.
- [11] 田云,张俊彪,李波.中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J].资源科学,2012,34(11):2097-2105.
- Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Research on agricultural carbon emissions in China: Estimation, spatial-temporal comparison and decoupling effect [J]. Resources Science, 2012,34(11):2097-2105.
- [12] 韩召迎,孟亚利,徐娇,等.区域农田生态系统碳足迹时空差异分析:以江苏省为案例[J].农业环境科学学报,2012,31(5):1034-1041.
- Han Zhaoying, Meng Yali, Xu Jiao, et al. Spatial and temporal differences of carbon footprint of regional farmland ecosystems: A case study of Jiangsu Province. Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2012,31(5):1034-1041.
- [13] 伍国勇,刘金丹,陈莹.中国农业碳排放强度空间特征及溢出效应分析[J].环境科学与技术,2021,44(11):211-219.
- Wu Guoyong, Liu Jindan, Chen Ying. Spatial characteristics and spillover effects of agricultural carbon emission intensity in China [J]. Environmental Science and Technology, 2019,44(11):211-219.
- [14] 邵桂兰,褚蕊,李晨.基于碳排放和碳汇核算的海洋渔业碳平衡研究:以山东省为例[J].中国渔业经济,2018,36(4):4-13.
- Shao Guilan, Chu Rui, Li Chen. Study on carbon balance of Marine fisheries based on carbon emission and carbon sink accounting: A case study of Shandong Province [J]. Chinese Fishery Economy, 2018,36(4):4-13.
- [15] 田云,张俊彪.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 Yun, Zhang Junbiao. Study on the differentiation of net carbon effect of agricultural production in China [J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(8):1298-1309.
- [16] Torres C M M E, Kohmann M M, Fraisse C W. Quantification of greenhouse gas emissions for carbon neutral farming in the Southeastern USA [J]. Agricultural Systems, 2015,137:64-75.
- [17] Kingwell R. Making agriculture carbon neutral amid a changing climate: The case of South-Western Australia [J]. Land, 2021,10(11):1259.
- [18] 赵敏娟,石锐,姚柳杨.中国农业碳中和目标分析与实现路径[J].农业经济问题,2022(9):24-34.
- Zhao Minjuan, Shi Rui, Yao Liuyang. Analysis and realization path of agricultural carbon neutrality in China [J]. Issues of Agricultural Economics, 2022(9):24-34.
- [19] 智静,高吉喜.中国城乡居民食品消费碳排放对比分析[J].地理科学进展,2009,28(3):429-434.
- Zhi Jing, Gao Jixi. Comparative analysis of carbon emissions from food consumption in urban and rural China [J]. Progress in Geography, 2009, 28(3):429-434.
- [20] 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,(12):2035-2039.
- Wu Fenlin, Li Lin, Zhang Hailin, et al. Effects of conservation tillage on net carbon release from farmland ecosystems [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,(12):2035-2039.
- [21] 段华平,张悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析[J].水土保持学报,2011,25(5):203-208.
- Duan Huaping, Zhang Yue, Zhao Jianbo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystems in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(5):203-208.
- [22] 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 Jincheng, Ma Huilan, Su Yang. Estimation of agricultural carbon emissions and study on carbon reduction potential in five provinces in Northwest China [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2017, 39(3):623-632.
- [23] 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 Xiangdong, Wang Jimin. Estimation of greenhouse gas emissions from livestock and poultry in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10):247-252.
- [24] 张波, 唐启升. 中国近海渔业生物捕捞群体碳汇评估[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(5):126-131.
- Zhang Bo, Tang Qisheng. Assessment of carbon sink of biological capture populations in China's coastal fisheries [J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(5):126-131.
- [25] 王修兰. 全球农作物对大气 CO₂ 及其倍增的吸收量估算[J]. 气象学报, 1996(4):466-473.
- Wang Xiulan. Estimation of global crop uptake of atmospheric CO₂ and its multiplication [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1996(4):466-473.
- [26] 韩召迎, 孟亚利, 徐娇, 等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析: 以江苏省为案例[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):1034-1041.
- Han Zhaoying, Meng Yali, Xu Jiao, et al. Spatial and temporal differences of carbon footprint of regional farmland ecosystems: A case study of Jiangsu Province [J]. Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2012, 31(5):1034-1041.
- [27] 孙贤斌. 安徽省会经济圈土地利用变化的碳排放效益[J]. 自然资源学报, 2012, 27(3):394-401.
- Sun Xianbin. Carbon emission benefits of land use change in the economic circle of Anhui Province [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(3):394-401.
- [28] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3):359-365.
- Zhang Jihong, Fang Jianguang, Tang Qisheng. Contribution of shellfish culture to Marine carbon cycle in China [J]. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(3):359-365.
- [29] 周毅, 杨红生, 刘石林, 等. 烟台四十里湾浅海养殖生物及附着生物的化学组成、有机净生产量及其生态效应[J]. 水产学报, 2002, 26(1):21-27.
- Zhou Yi, Yang Hongsheng, Liu Shilin, et al. Chemical composition, net organic production and ecological effects of cultured organisms and attached organisms in Shiliwan, Yantai [J]. Journal of Fisheries, 2002, 26(1):21-27.
- [30] 林贞贤, 汝少国, 杨宇峰. 大型海藻对富营养化海湾生物修复的研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2006(4):128-134.
- Lin Zhenxian, Ru Shaoguo, Yang Yufeng. Research progress of macroalga bioremediation in eutrophication bay [J]. Bulletin of Oceanology and Limnology, 2006(4):128-134.
- [31] 纪建悦, 王萍萍. 我国海水养殖藻类碳汇能力及影响因素研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2014(4):17-20.
- Ji Jianyue, Wang Pingping. Carbon sequestration capacity and influencing factors of algae in mariculture in China [J]. Journal of Ocean University of China (Social Science Edition), 2014(4):17-20.
- [32] 岳冬冬, 王鲁民. 中国海水贝类养殖碳汇核算体系初探[J]. 湖南农业科学, 2012(15):120-122, 130.
- Yue Dongdong, Wang Lumin. Preliminary study on carbon sink accounting system of Marine shellfish aquaculture in China [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2012(15):120-122, 130.
- [33] 冯杰, 张胜, 王涛. 中国省际土地利用碳排放及其影响因素分析[J]. 统计与决策, 2019, 35(5):141-145.
- Feng Jie, Zhang Sheng, Wang Tao. Analysis of inter-provincial land use carbon emission and its influencing factors in China [J]. Statistics and Decision, 2019, 35(5):141-145.
- [34] 郭海红, 盖凌云. 中国农业碳效应时空分异及驱动机理研究[J]. 宁夏社会科学, 2021(5):74-84.
- Guo Haihong, Gai Lingyun. Spatiotemporal differentiation and driving mechanism of agricultural carbon effect in China [J]. Ningxia Social Sciences, 2021(5):74-84.