

# 湖南省县域农业碳收支时空差异及碳补偿潜力

韩超跃, 赵先超, 胡艺觉, 张潇湘

(湖南工业大学 城市与环境学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** [目的] 基于碳排放和碳吸收双重视角来探究农业碳收支时空差异和碳补偿潜力, 为湖南省农业全面绿色转型和协调发展提供理论参考。[方法] 采用探索性空间数据分析、绝对  $\beta$  收敛、参数对比法和 GIS 空间分析方法, 对湖南省县域农业碳收支时空差异、碳补偿率空间相关性及收敛性特征、农业碳补偿潜力区域差异进行实证分析。[结果] 湖南省县域农业碳排量整体呈“以高值区为中心, 向外围逐渐降低”的结构且农田土壤碳排量是其主要来源, 县域农业碳排强度呈“西南高, 东北低”且逐年显著降低; 县域农业碳汇量整体呈“东中北部高, 西南部低”的空间格局且其农业碳汇能力渐趋增强。稻谷对农业碳汇量贡献最大, 农业碳吸收强度显著提升且其空间格局发生明显转变。县域农业碳补偿率表现为净碳源, 存在显著的空间正相关性和收敛性且其空间集聚特征和关联特征均较为明显。县域农业碳补偿潜力在空间上呈现显著不平衡特征, 中、高碳补偿县域比例达 60.66%, 表明湖南省县域农业碳补偿率偏低, 仍具有很大碳补偿空间。[结论] 应深入强化区域合作, 多方共促绿色转型, 充分发挥农业碳补偿率热点区辐射带动效应, 维持好农业碳补偿能力较强区域优良低碳农业发展情势, 重点关注中、高碳补偿潜力区域绿色农业发展趋势, 缩减湖南省各县域低碳农业发展差距。

**关键词:** 农业碳收支; 碳补偿潜力; 时空差异; 绝对  $\beta$  收敛性; 湖南省

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)05-0343-12

**中图分类号:** F323

**文献参数:** 韩超跃, 赵先超, 胡艺觉, 等. 湖南省县域农业碳收支时空差异及碳补偿潜力[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 343-354. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.040; Han Chaoyue, Zhao Xianchao, Hu Yijue, et al. Spatiotemporal differences of agricultural carbon income and expenditure, and carbon compensation potential of counties in Hunan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 343-354.

## Spatiotemporal Differences of Agricultural Carbon Income and Expenditure, and Carbon Compensation Potential of Counties in Hunan Province

Han Chaoyue, Zhao Xianchao, Hu Yijue, Zhang Xiaoxiang

(College of Urban and Environmental Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412007, China)

**Abstract:** [Objective] The temporal and spatial differences of agricultural carbon budget and carbon compensation potential were analyzed based on the dual perspectives of carbon emission and carbon absorption in order to provide a theoretical reference for the comprehensive green transformation and coordinated development of agriculture in Hunan Province. [Methods] Exploratory spatial data analysis, absolute  $\beta$  convergence, parameter comparison, and GIS spatial analysis were used to empirically analyze the spatial and temporal differences of the agricultural carbon budget, spatial correlation and convergence characteristics of the carbon compensation rate, and regional differences in agricultural carbon compensation potential of counties in Hunan Province. [Results] The overall agricultural carbon emissions of counties in Hunan Province exhibited a structural form of “higher value areas in the center, and gradually decreased outwards”. Farmland soil was the main source of carbon emissions. The agricultural carbon emission intensity of counties exhibited a pattern of “higher in the southwest, lower in the northeast” and significantly decreased year by year. The

收稿日期: 2023-01-12

修回日期: 2023-03-11

**资助项目:** 湖南省社科评审委重大项目“经济平稳增长与碳减排双重约束下长株潭城市群碳排放动态模拟及路径选择”(XSP22ZDA008); 湖南省教育厅科研重点项目(22A0419); 湖南省社科资助项目(20JD026); 湖南工业大学研究生科研创新项目(CX2208); 湖南省教育厅课题(21C0407); 国家级大学生创新训练计划项目(202111535013)

**第一作者:** 韩超跃(1994—), 女(汉族), 河北省衡水市人, 硕士研究生, 研究方向为城乡发展与区域规划。Email: hcyjysa@163.com。

**通信作者:** 赵先超(1983—), 男(汉族), 山东省郓城县人, 教授, 博士, 主要从事城乡发展与区域规划、城乡环境与低碳发展研究。Email: zhaoxianchao1983@163.com。

overall agricultural carbon sequestration in the counties exhibited a spatial pattern of “higher in the east, central, and north regions, lower in the southwest”. Agricultural carbon sequestration capacity gradually increased across the region. Rice contributed the most to agricultural carbon sequestration, and agricultural carbon absorption intensity significantly increased and its spatial pattern significantly changed. The agricultural carbon compensation rate in the counties was a net carbon source, with significant positive spatial correlation and convergence, and the spatial clustering and correlation characteristics were obvious. The potential of agricultural carbon compensation in the counties showed a significant imbalance in space, with the proportion of medium and higher carbon compensation counties reaching 60.66%, indicating that the agricultural carbon compensation rates of counties in Hunan Province were lower, thus there was still a large potential for increasing carbon compensation. [Conclusion] Regional cooperation should be further strengthened, and green transformation should be jointly promoted by interested parties who should give full attention to the radiation driving effect of agricultural carbon compensation rate hot spots in order to maintain the development of excellent low-carbon agriculture in regions with higher agricultural carbon compensation capacity. The future work should focus on the development of green agriculture in regions with medium and high carbon compensation potential, and on narrowing the development gap of low-carbon agriculture in all Hunan Province.

**Keywords: agricultural carbon budget; carbon compensation potential; temporal and spatial differences; absolute convergence; Hunan Province**

伴随着人类过度开发和使用自然资源所导致的全球气候变暖威胁人类正常生产生活,有效控制温室气体排放、构建绿色低碳发展模式已成为全球共识。作为全球最大温室气体排放国,中国高度重视节能减排降碳,2020 年中国提出要加快形成绿色发展方式,力争在 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,2060 年前实现碳中和<sup>[1]</sup>。实现“双碳”目标,除主要调控工业碳源外,农业碳源也不可忽视。研究表明,农业生产释放的温室气体占人为温室气体排放总量比例已近 30%<sup>[2]</sup>,且中国农业排放的甲烷和二氧化氮占全国总量比例高达 50% 和 92%<sup>[3]</sup>,农业碳源已成为温室气体排放的第二大重要来源。由此,在稳步推进农业发展过程中,既重视农业碳减排促使其全面绿色转型又保障农业提质增效维持国家粮食安全刻不容缓,调控农业碳排碳汇水平对中国实现“双碳”目标、应对气候变化以及推动社会可持续发展具有重要意义。

农业既是温室气体排放源,又是巨大的碳汇系统,定量分析区域农业碳收支空间格局是探究碳补偿潜力的关键。近年来,国内外诸多学者聚焦于农业碳排放和碳吸收相关研究,农业碳排放方面,主要集中在指标选取及效率测算<sup>[4-5]</sup>、空间格局及动态演变<sup>[6]</sup>、影响因素及减排路径<sup>[7-8]</sup>等方面,也有部分学者对农业碳排放与经济增长关系<sup>[9-10]</sup>,与农业政策和技术进步关系<sup>[11]</sup>等展开研究;农业碳吸收方面,主要集中在碳汇测算及现状评估<sup>[12]</sup>、区域差异及动态演进<sup>[13]</sup>和影响机理<sup>[14]</sup>等内容的研究。碳收支是全球气候变化

研究的焦点问题,也是各国绿色低碳发展的重要内容<sup>[15]</sup>。相关学者对碳收支的研究主要侧重于城市<sup>[16]</sup>、特定区域<sup>[17-18]</sup>和生态系统<sup>[19]</sup>等方面,关于农业碳收支的研究相对较少并主要集中于碳收支总量和强度比较<sup>[20]</sup>方面,且其研究尺度也多以省域和市域<sup>[21]</sup>为主,具体到小尺度县域层面的研究相对薄弱。碳补偿可约束碳排放,实现区域可持续发展。目前碳补偿相关研究主要集中于空间效应<sup>[22]</sup>、影响因素<sup>[23]</sup>、碳补偿意愿<sup>[24]</sup>和碳补偿分区<sup>[25]</sup>等内容且研究尺度主要涉及国家和省域等宏观和中观层面,微观层面研究相对薄弱,而农业碳补偿潜力相关研究相对缺乏。

综上所述,相关学者对农业碳排放和碳吸收进行了大量研究,但多以单一视角进行,而对农业碳收支和农业碳补偿潜力等鲜有研究。湖南省作为中国农业大省,是全国“米袋子”“菜篮子”和“油罐子”的重要阵地,其粮食产量常年位居全国前列,是重要的粮食生产基地。研究湖南省农业绿色发展状况对清晰中国农业低碳发展进展及更好实现“双碳”目标具有代表意义,同时研究具有碳排放和碳吸收双重视角的农业碳收支空间效应和农业碳补偿潜力,能够在一定程度上弥补农业碳减排分析不足及丰富农业低碳发展模式,具有一定的理论和现实意义。鉴于此,本文基于湖南省农业碳排实际情况,结合农业绿色发展背景及数据易获取性原则,选取 2010—2020 年为研究期,来测算湖南省县域农业碳收支和农业碳补偿率,采用探索性空间数据分析和绝对  $\beta$  收敛等方法探究湖南省县域农业碳收支时空差异和农业碳补偿率是否存

在空间相关性及收敛性,并在此基础上研究湖南省县域农业碳补偿潜力区域差异,以期为湖南省各县域因地制宜制定和实施低碳农业相关政策,为湖南省农业全面绿色转型和协调发展提供理论参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

湖南省位于中国中部,界于北纬 24°38′—30°08′,东经 108°47′—114°15′之间,地势呈三面环山、朝北开口的马蹄形地貌,水土资源总量丰富,热量充足、雨量集中、气候湿润,适宜农作物生长。湖南省依据地理位置划分为 5 大分区(图 1),即湘东(长沙市、株洲市、湘潭市)、湘中(娄底市、邵阳市、益阳市)、湘北(常德市、岳阳市)、湘南(衡阳市、郴州市、永州市)、湘西(张家界市、湘西州、怀化市),其下辖 13 个地级市和 1 个自治州,包括 36 个市辖区、18 个县级市、68 个县(其中 7 个自治县)共 122 个县级行政区划。作为中国农业大省,湖南省农业发展状况良好,2020 年其农林牧渔业总产值达 7 511.96 亿元,增加值达 4 461.66 亿元,同比增长率分别为 17.28%和 15.87%。本文选取湖南省 122 个县级行政区划作为研究区域来探究各县域农业碳补偿潜力。

1.2 农业碳排放、碳吸收及碳补偿率测算

农业碳排放主要指农业生产过程中直接或间接的温室气体排放。本文根据指标选择应当遵循的系统性、实用性、科学性和综合性等原则,参考相关研究成果[26]并结合湖南省实际情况,从农用物资投入(化肥、农药、柴油、农膜、灌溉)、水稻种植和农田土壤利用等碳源出发来构建农业碳排放源指标体系(表 1)。

其中,由于水稻生长周期内 CH<sub>4</sub> 排放率不同,因此水稻种植测算以水稻生长周期视角将其划分为早稻、中稻和晚稻来进行;而决定水稻 N<sub>2</sub>O 排放的主要因素是田间水分状况,并不需要进行划分[27]。借鉴李波等[3]和田云等[28]的测算方法对湖南省县域农业碳排放总量进行测算,再结合区域农作物播种面积得到农业碳排放强度。具体公式如下:

C=∑C<sub>i</sub>=∑T<sub>i</sub>×δ<sub>i</sub> (1)

I<sub>AC</sub>=C/E (2)

式中:C 为农业碳排放总量;C<sub>i</sub> 为各种碳源的碳排放量;T<sub>i</sub> 为各碳源消耗量;δ<sub>i</sub> 为各碳源的排放系数;I<sub>AC</sub>为农业碳排放强度;E 为农作物播种面积。

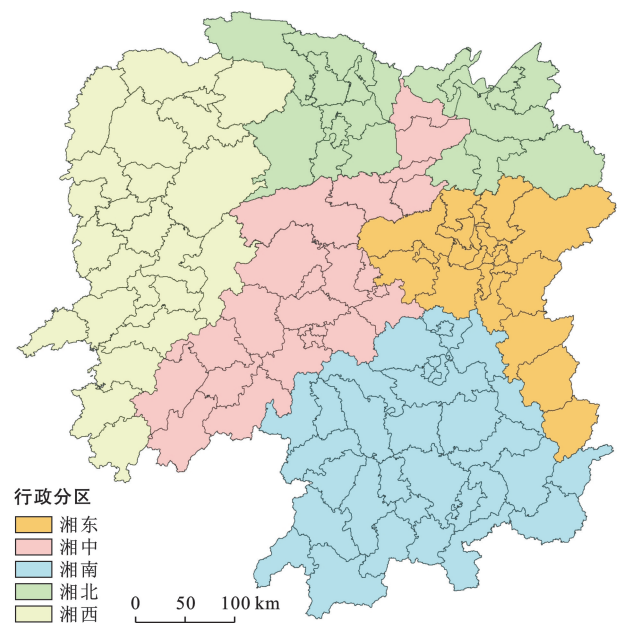


图 1 湖南省行政分区图  
Fig.1 Administrative division map of Hunan Province

表 1 农业碳排放源及对应的排放系数

Table 1 Coefficients of agricultural carbon emission sources and corresponding emission				
农业碳源类别	碳源因子	排放系数	指标含义	参考来源
农用物资投入	化肥	0.895 6 kg/kg	以化肥施用量、农药使用量、农用柴油使用量、农用塑料薄膜使用量和农田灌溉面积各年使用量为准	李波等[3],伍国勇等[29]
	农药	4.934 1 kg/kg		
	柴油	0.592 7 kg/kg		
	农膜	5.180 0 kg/kg		
	灌溉	20.476 0 kg/hm <sup>2</sup>		
水稻种植	早稻	14.710 0 g/m <sup>2</sup> (以 CH <sub>4</sub> 计)	以各年水稻种植面积为 准,其生长周期分别为 85,105,100 d; 1 t CH <sub>4</sub> =6.818 2 t C	闵继胜等[27],Cao 等[30]
	中稻	56.280 0 g/m <sup>2</sup> (以 CH <sub>4</sub> 计)		
	晚稻	34.100 0 g/m <sup>2</sup> (以 CH <sub>4</sub> 计)		
农田土壤利用	水稻	19.504 8 kg/hm <sup>2</sup> (以 N <sub>2</sub> O 计)	以各年各作物种植面积为 准;	王明星等[31] 庞军柱等[32] 邱炜红等[33]
	小麦	99.555 8 kg/hm <sup>2</sup> (以 N <sub>2</sub> O 计)		
	玉米	205.775 6 kg/hm <sup>2</sup> (以 N <sub>2</sub> O 计)		
	豆类	62.577 9 kg/hm <sup>2</sup> (以 N <sub>2</sub> O 计)		
	薯类	77.206 5 kg/hm <sup>2</sup> (以 N <sub>2</sub> O 计)		
	油料	77.206 5 kg/hm <sup>2</sup> (以 N <sub>2</sub> O 计)		
	蔬菜	342.146 7 kg/hm <sup>2</sup> (以 N <sub>2</sub> O 计)		



农业碳吸收量主要考虑湖南省县域水稻、玉米、小麦、豆类、薯类、花生、油菜籽、棉花、麻类、甘蔗、烟草、蔬菜和瓜类等农作物全生长周期的碳吸收,具体公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \delta_i \times R_i \times (1 - y_i) \times (1 + r) / \partial_i \quad (3)$$

$$L = P / E \quad (4)$$

式中:  $P$  为农业碳吸收总量;  $P_i$  为不同类别作物  $i$  的碳吸收量;  $\delta_i$  为作物  $i$  的平均含碳率;  $R_i$  为作物  $i$  的经济产量;  $y_i$  为作物  $i$  经济产品的水分系数;  $r$  为各作物根冠比;  $\partial_i$  为作物  $i$  的经济系数;  $L$  为农作物碳吸收强度。其中,各作物的平均含碳率、水分系数和经济系数取值参考罗怀良<sup>[34]</sup>、韩召迎等<sup>[35]</sup>研究成果。

农业碳补偿率为农业碳吸收量与农业碳排放量比值,具体公式如下:

$$F = P / C \quad (5)$$

式中:  $F$  为农业碳补偿率。若  $F > 1$ , 表明农业碳吸收量大于农业碳排放量, 净碳汇为正值;  $F = 1$ , 表明实现碳中和。

### 1.3 探索性空间数据分析

全局莫兰指数基于全局视角衡量湖南省县域农业碳补偿率空间分布的集聚特征; 局部 Getis-Ord  $G_i^*$  指数用以揭示局部要素空间分布特征, 其可识别冷点区和热点区, 即农业碳补偿率低值与低值集聚区域和高值与高值集聚区域。具体计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (\sum_{j=1}^n w_{ij})} \quad (6)$$

$$G = (\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i) / \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

式中:  $I$  为 Global Moran's  $I$  指数;  $G$  为 Getis-Ord  $G_i^*$  指数;  $n$  为研究区样本数;  $w_{ij}$  为要素  $i$  和  $j$  的空间权重矩阵;  $x_i$  为第  $i$  年湖南省县域农业碳补偿率;  $\bar{x}$  为研究区农业碳补偿率均值。

### 1.4 农业碳补偿率收敛性分析

绝对  $\beta$  收敛主要用以检验湖南省各县域农业碳补偿率增长速度是否趋同, 即伴随时间推移, 碳补偿率相对较低的县域是否存在追赶碳补偿率较高县域以使二者差距逐步缩小的态势, 公式为:

$$\ln\left(\frac{W_{i,t+1}}{w_{i,t}}\right) = \partial + \beta \ln(W_{i,t}) + \epsilon_{i,t} \quad (8)$$

式中:  $W_{i,t}$  和  $W_{i,t+1}$  分别表示第  $i$  县域在  $t$  时期和  $t+1$  时期的农业碳补偿率;  $\partial$  和  $\epsilon_{i,t}$  分别为常数项、误差项;  $\beta$  为收敛系数, 若  $\beta < 0$  且通过 10% 的显著性水平检验, 则表明湖南省各县域农业碳补偿率具有收敛趋势, 即农业碳补偿率较低的县域存在追赶农业碳补偿率较高县域的态势。

### 1.5 农业碳补偿潜力测算

基于研究对象及数据可得性, 参考王腊芳等<sup>[36]</sup>的研究采用参数对比法分析农业碳补偿潜力。参数对比法采用趋同理论测算碳补偿潜力, 先检验湖南省县域农业碳补偿率是否存在空间相关性和收敛性, 再采用绝对趋同法测算 122 个县域农业碳补偿潜力(假设各县域农业碳补偿率向最高值收敛)。判别湖南省县域农业碳补偿潜力时, 需预先选定 1 个比较标准(农业碳补偿率最高值), 将各区域农业碳补偿率与该标准对比并将二者差距作为衡量标准。公式为:

$$Y_i = 1 - \frac{F_i}{F_{\max}} \quad (9)$$

式中:  $Y_i$  为  $i$  县农业碳补偿潜力;  $F_i$  为  $i$  县农业碳补偿率;  $F_{\max}$  为所有县中最大农业碳补偿率。

### 1.6 数据来源

该研究相关数据均来源于《湖南统计年鉴》和《湖南农村统计年鉴》。其中, 农用物资投入数据以各碳源年使用量为准; 水稻种植和农田土壤利用数据则用各作物种植面积与排放系数计算求得, 所求得的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  导致的温室效应均转化为标准 C 所产生的温室效应。其中少量缺失数据采用插值法补齐。

## 2 结果与分析

### 2.1 湖南省县域农业碳收支分布特征

2.1.1 湖南省农业碳排放及其强度分析 基于湖南省县域 2010—2020 年农用物资投入、水稻种植和农田土壤利用等碳排放源数据测算得到湖南省县域农业碳排放总量, 再根据农业总产值计算得出农业碳排放强度。从分区特征看(图 2), 2010—2020 年湖南省各分区农业碳排放量总体呈先升后降的趋势且各分区均于 2015—2016 年达到峰值后降低, 但其总量整体增加。具体来看, 湘南、湘中和湘北地区的农业碳排放量较高, 分别由 2010 年的  $1.93 \times 10^7$ ,  $1.43 \times 10^7$ ,  $1.25 \times 10^7$  t 增长为 2020 年的  $2.09 \times 10^7$ ,  $1.84 \times 10^7$ ,  $1.53 \times 10^7$  t; 而湘东和湘西地区农业碳排放量较低, 分别由 2010 年的  $1.20 \times 10^7$ ,  $1.01 \times 10^7$  t 增长为 2020 年的  $1.33 \times 10^7$ ,  $1.15 \times 10^7$  t。结合平均农业碳排放量看, 湘北和湘南地区较高, 2020 年分别为  $7.63 \times 10^6$ ,  $6.97 \times 10^6$  t; 湘西和湘东地区较低, 2020 年分别为  $3.84 \times 10^6$ ,  $4.43 \times 10^6$  t。上述结果主要缘于湘南、湘北和湘中地区农业资源较为丰富且农业优势明显, 常德、岳阳、衡阳、郴州、永州、邵阳和益阳等地农业发展较好且耕地面积占全省耕地 70% 以上, 已成为湖南省粮食生产主力军; 湘东以长株潭城市群协同发展为依托重点发展二三产业, 湘西聚焦优美自然风光重点发展旅游业等。

从农业碳排放强度看, 2010—2020 年湖南省各分



区农业碳排放强度演变趋势基本一致,呈渐趋降低趋势,表明湖南省农业低碳及可持续发展成效显著。湘东地区单位产值所消耗碳源量最低,由 2010 年的 3.81 t/万元降低为 2020 年的 1.85 t/万元;湘南、湘中和湘北单位产值所消耗碳源量均与湖南省较为接近;湘西单位产值所消耗碳源量最高,由 2010 年的 6.07

t/万元降低为 2020 年的 2.81 t/万元。

由上述分析结果可知,湘西地区虽有高碳排强度,但其碳排量较低且碳排强度降幅最大,表明其低碳农业仍有很好的发展潜力;湘北和湘南地区具有高碳排量和较高碳排强度特征,是今后“双碳”目标重点关注区域。

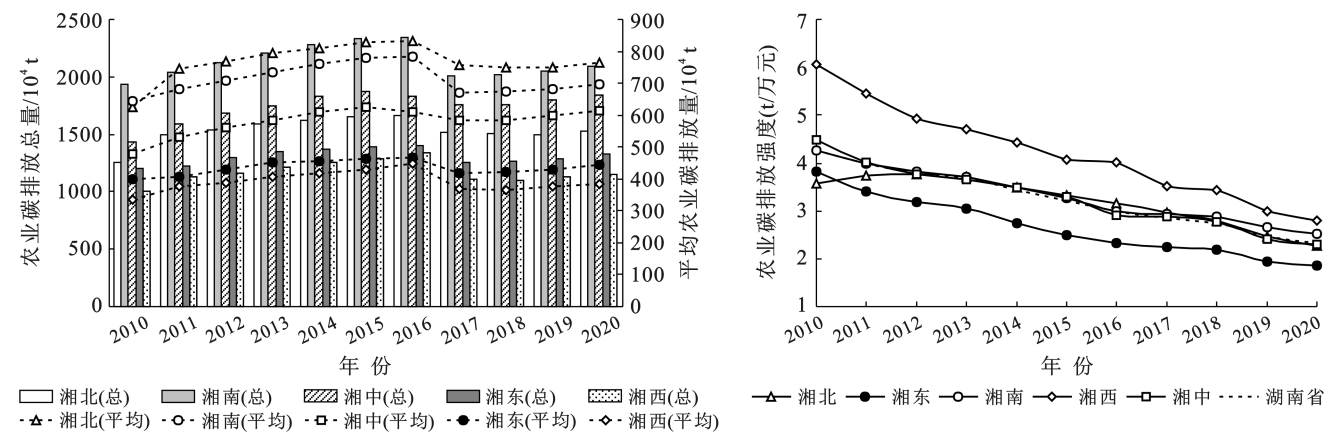


图 2 2010—2020 年湖南省农业碳排放总量和农业碳排放强度变化趋势

Fig.2 Change trends of total agricultural carbon emissions and agricultural carbon emission intensity in Hunan Province from 2010 to 2020

从市州特征(图 3)看,2010—2020 年湖南省各市州平均农业碳排总量和农业碳排强度差异均较大,农业碳排量高值区主要集中在常德、永州、邵阳、衡阳、长沙、岳阳市和益阳市,而张家界、湘潭、娄底、株洲市和湘西州等地农业碳排总量较低;农业碳排强度较高的地区主要集中于张家界、湘西州、永州、常德等地,而长沙、株洲、娄底市等地农业碳排强度较低。上述结果表明农业高碳消耗并非体现农业经济高速发展,像常德市和永州市具有高碳排量和较高碳排强度的地

区应成为低碳农业发展重点监测区域。从碳排结构看,农业碳源比例变化不大,农田土壤碳排放量是其主要来源,各市州平均比例为 77.54%;第二来源为水稻种植碳排放量,对农业碳排总量的平均贡献率为 11.77%;由农用物资投入引起的碳排量最少,各市州平均比例为 10.70%。因此要注重保护耕地质量、提升地力及土壤活力,重视化肥减量增效并加快创新农业科技等,提高土壤及农用物资利用效率,促进低碳农业发展。

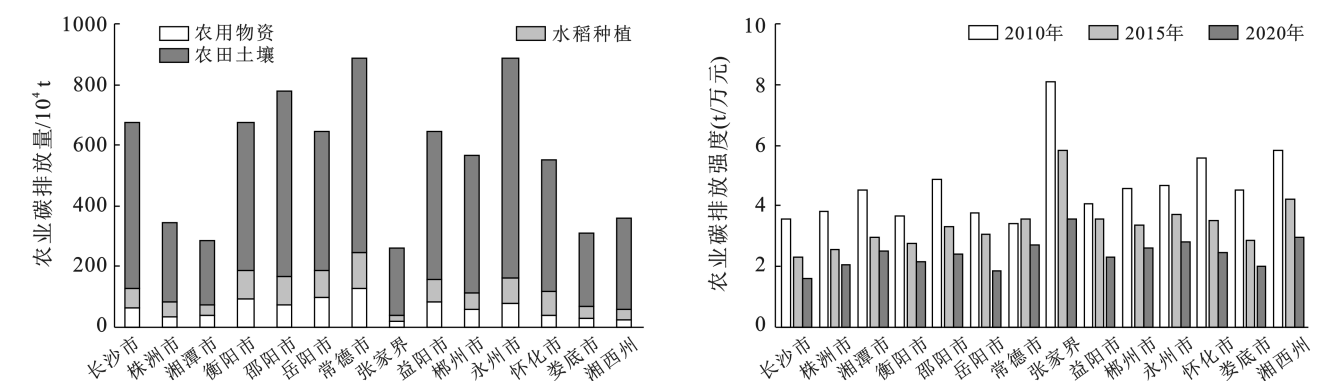


图 3 2010—2020 年湖南省各市州平均农业碳排放总量和农业碳排放强度变化趋势

Fig.3 Change trend of average total agricultural carbon emissions and agricultural carbon emission intensity by city and state in Hunan Province from 2010 to 2020

从县域空间(图 4—5)看,湖南省县域农业碳排放量整体呈现“以高值区为中心,向外围逐渐降低”的结构。其中,2010 年湖南省县域农业碳排放量呈现“东北高,西南低”的特征,其东北部的宁乡县、浏阳

市、长沙县、湘潭县、鼎城区和桃源县为高值中心,均高于  $1.20 \times 10^6$  t,而该区域工业较为发达的天心、芙蓉、雨花、芦淞、荷塘区及韶山市等地农业碳排量较低;西南部的通道侗族自治县、古丈、桂东、炎陵县等

地为低值区,均低于  $2.00 \times 10^5$  t,且该区域绝大部分县区农业碳排放量低于  $5.00 \times 10^5$  t。“十二五”时期,由于化肥、农药、农膜等农用物资使用量增多,同时该时期农业基础设施并不完善且农业科技水平较低,由此 2015 年湖南省各县域农业碳排放量均显著增高,碳排高值区增加了南县、祁阳、隆回、华容、道县、祁东县及沅江市、澧县、汉寿、洞口县及耒阳、湘乡市和望城区。自 2015 年以来,湖南省广泛实施化肥零增长行动,积极推动调优结构、节本增效,同时注重农业科技

研发及成果转化,由此 2020 年湖南省各县域农业碳排放量均明显降低。其中,农业碳排高值区排放量比例由 2015 年的 33.23% 降低为 27.95%,而农业碳排低值区碳排放量比例由 2015 年的 2.86% 增加为 3.03%。可见,湖南省县域低碳农业发展仍有较大潜力,仍需进一步强化农业科技支撑,持续壮大清洁能源发展及应用。从农业碳排强度看,湖南省县域农业碳排强度整体呈“西南高,东北低”的特征且逐年显著降低。

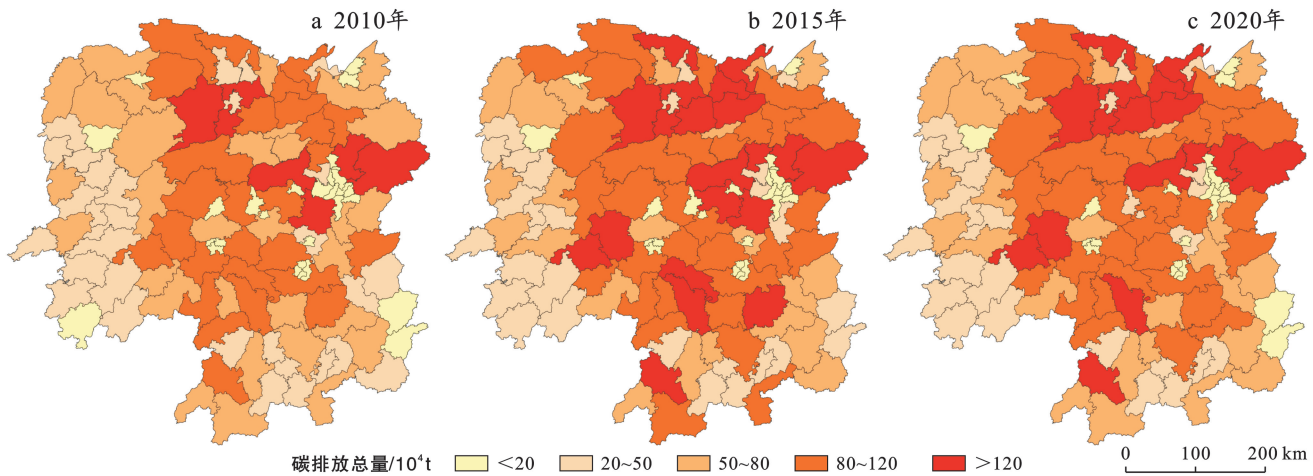


图 4 湖南省县域农业碳排放量空间分布

Fig.4 Spatial distribution of agricultural carbon emissions in counties of Hunan Province

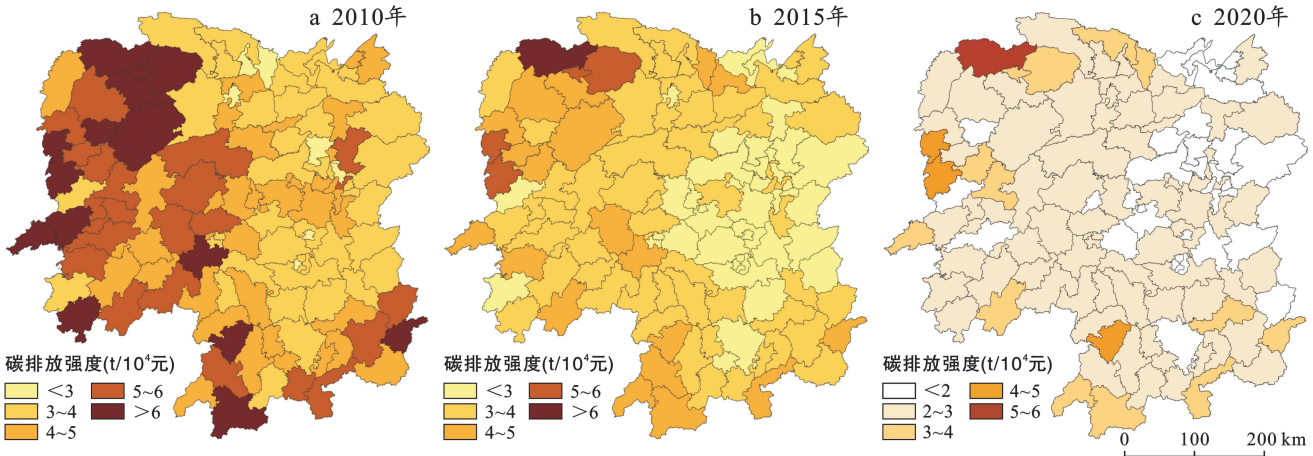


图 5 湖南省县域农业碳排放强度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of agricultural carbon emissions intensity in counties of Hunan Province

具体来看,2010 年,碳排强度高值区分布在桑植、慈利县及永定、武陵源区、沅陵、古丈、花垣、凤凰、芷江、新晃、邵阳、通道、双牌、江华、桂东县,均大于 6 t/万元,且碳排强度处于 3~5 t/万元之间的县区比例最大,为 63.12%;2015 年,各地区农业碳排强度显著降低,高值区仅桑植县,比例 80.33% 的县区碳排强度均低于 4 t/万元;2020 年,除了桑植县农业碳排强度高于 5 t/万元,86.07% 的县区农业碳排强度均低于 3 t/万元。可知,湖南省县域农业绿色化、低碳化、

可持续化发展取得明显成效,低碳农业仍有很大发展空间。

2.1.2 湖南省农业碳吸收及其强度分析 从分区特征(图 6)看,2010—2020 年湖南省各分区农业碳汇量及其变动趋势均存在显著差异,湘南、湘北、湘中和湘西地区农业碳汇量呈增长趋势,而湘东地区农业碳汇量呈降低趋势。具体来看,湘南、湘北和湘中地区农业碳汇量较高,分别由 2010 年的  $9.24 \times 10^6$ ,  $7.90 \times 10^6$ ,  $7.57 \times 10^6$  t 增加为 2020 年的  $9.58 \times 10^6$ ,  $8.58 \times$

$10^6, 8.30 \times 10^6$  t; 而湘西地区农业碳汇量最低, 由 2010 年的  $3.23 \times 10^6$  t 增加为 2020 年的  $4.13 \times 10^6$  t; 湘东地区农业碳汇量则由 2010 年的  $6.23 \times 10^6$  t 降低为 2020 年的  $5.81 \times 10^6$  t。结合农业碳吸收强度看, 除湘东地区呈降低趋势外, 其余地区农业碳吸收强度均呈上升趋势。其中, 湘东、湘北和湘中地区农业碳吸收强度较高, 由 2010 年的 4.70, 3.80, 4.03 t/hm<sup>2</sup> 转变为 2020 年的 4.64, 4.63, 4.27 t/hm<sup>2</sup>; 湘西地区农业碳吸收强度虽较低, 但其变动幅度较大, 年均增长率达 3.32%; 而湘东地区农业碳吸收强度年均降低率

仅为 0.12%。

综上分析可知, 湖南省整体农业碳汇量及碳吸收强度均呈上升趋势, 这与湖南省注重防治农业污染、科学合理规划 and 利用农业资源、持续推动农业绿色可持续发展密切相关; 湘东地区的长株潭城市群发展重心并非农业, 农作物种植面积缩减, 由此农业碳汇量降低, 但其农业碳汇能力较高; 湘西地区农业碳汇量及碳吸收强度均为最低, 但其碳汇能力逐年提升且提幅较高, 因此可继续挖掘其农业碳汇潜力, 助力湖南省低碳农业发展。

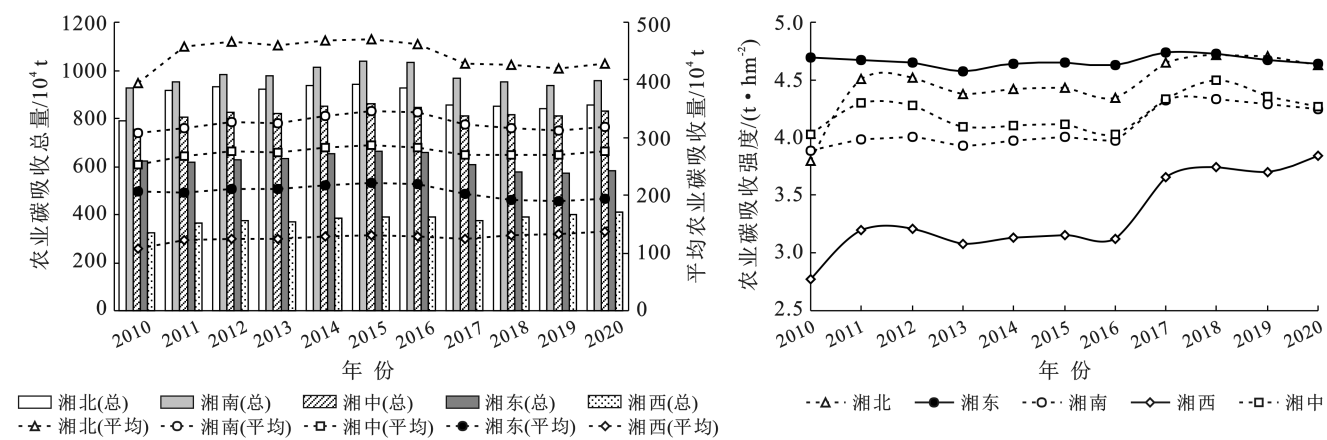


图 6 2010—2020 年湖南省农业碳吸收总量和农业碳吸收强度变化趋势  
Fig.6 Change trend of total agricultural carbon absorption and agricultural carbon absorption intensity in Hunan Province from 2010 to 2020

从市州特征(图 7)看, 2010—2020 年湖南省各市州平均农业碳汇量和农业碳吸收强度差异均较为显著。从农业碳汇量看, 高值区为常德、衡阳、永州、岳阳、邵阳市和益阳市, 均高于  $3.00 \times 10^6$  t; 而张家界市和湘西州农业碳汇量较低, 均低于  $1.00 \times 10^6$  t。其中, 稻谷碳汇量最高, 各市区平均比例为 66.69%; 蔬菜、油菜籽和玉米的碳汇量平均比例较为接近, 分别为 8.85%, 8.84% 和 8.80%。从农业碳吸收强度看, 高值区为长沙、株洲、湘潭、衡阳市和娄底市; 而湘西州和张

家界农业碳吸收强度较低。此外, 除株洲市和湘潭市外, 其余市区农业碳吸收强度均在研究期内呈增强趋势。其中湘西州和怀化市农业碳吸收强度年均增速较高, 分别为 3.81% 和 3.04%; 而株洲市和湘潭市农业碳吸收强度年均降低率分别为 0.63% 和 0.38%。综上可知, 湖南省作为国内水稻生产大省, 其稻谷碳汇量对农业碳汇量的贡献率最大, 要注重稻谷提质增效及稳产保收; 农业碳吸收强度较低的张家界和湘西州要持续激发耕地资源活力, 切实提高耕地质量及效率。

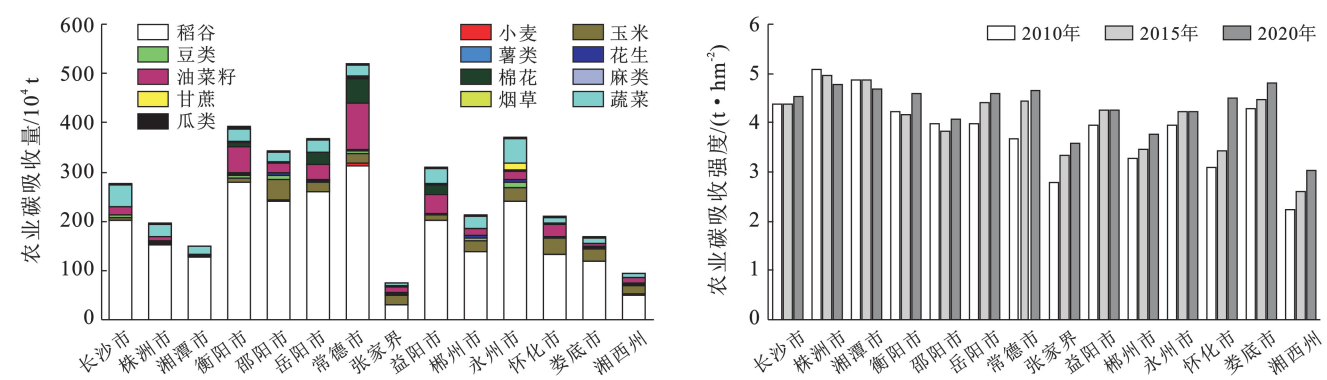


图 7 2010—2020 年湖南省各市州平均农业碳吸收总量和农业碳吸收强度变化趋势  
Fig.7 Change trend of average total agricultural carbon absorption and agricultural carbon absorption intensity by city and state in Hunan Province from 2010 to 2020



从县域空间(图 8)看,湖南省县域农业碳汇量整体呈“东中北部高,西南部低”的空间格局。2010 年,农业碳汇量高值区主要分布在湖南省东中北部的宁乡、桃源、南县、鼎城区及湘潭、衡阳、衡南、汉寿、华容县及浏阳市、祁阳县、澧县、沅江市和长沙县,均高于  $6.00 \times 10^5$  t;农业碳汇量较高值区沿高值区周边分布,包括耒阳、湘乡市及湘阴、祁东、攸县及汨罗市、

双峰县和醴陵市等 24 个县域。这两类县域是保障湖南省农业低耗高效发展的重要区域,对湖南省农业碳汇量的贡献率为 64.08%;湖南省西南部的武陵源区、古丈、保靖、花垣、泸溪县、鹤城区、双牌县、北湖区、新晃、城步县和通道县等地为农业碳汇量低值区,均低于  $1.00 \times 10^5$  t,承载了湖南省 5.29%的农业碳汇量。

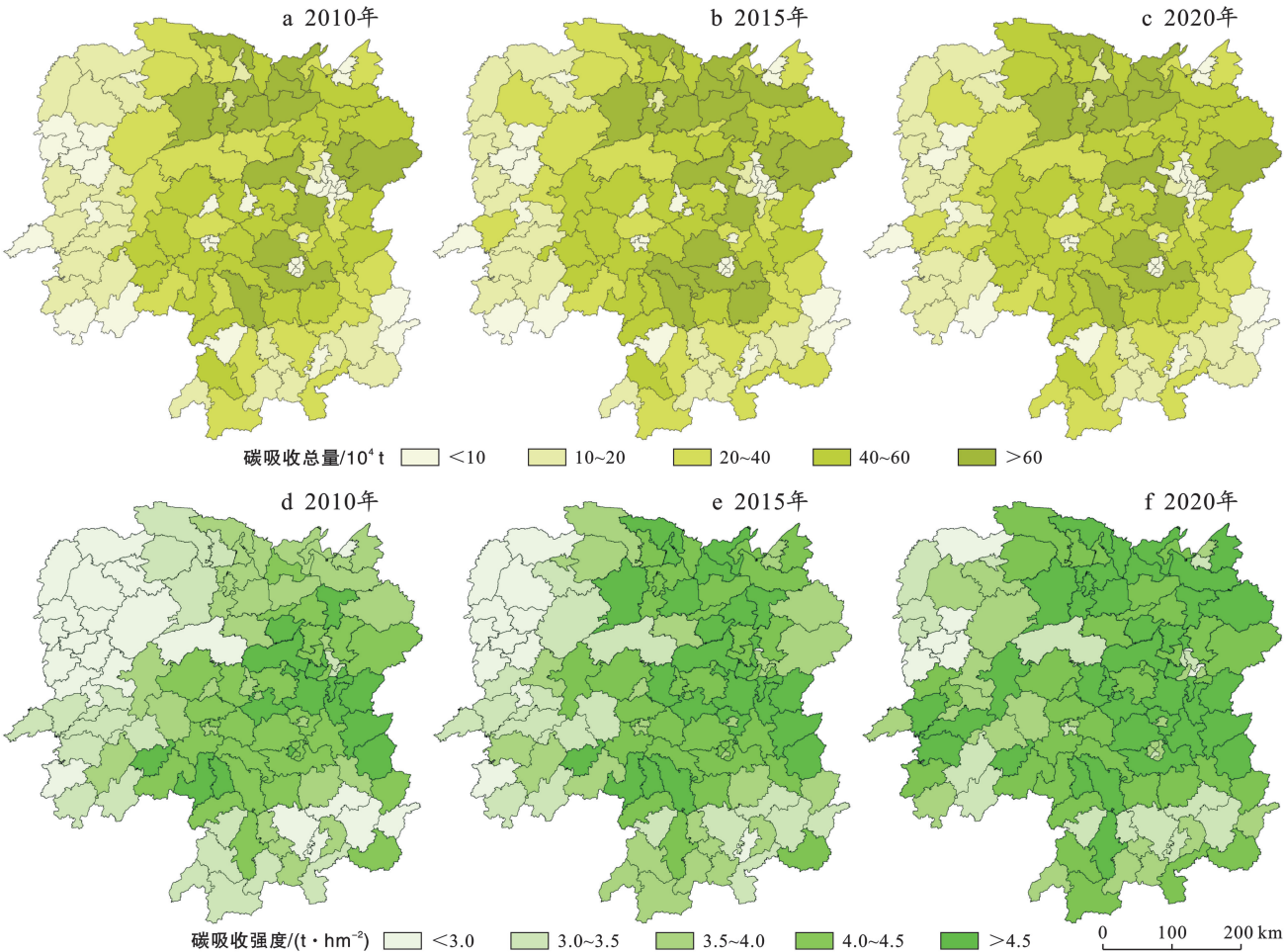


图 8 湖南省县域农业碳吸收总量和碳吸收强度空间分布

Fig.8 Spatial distribution of total agricultural carbon absorption and carbon absorption intensity in counties of Hunan Province

2015 年,农业碳汇量高值区增加了祁阳、湘阴、祁东县、耒阳市和岳阳县,较高值区增加为 25 个县域,对湖南省农业碳汇量的贡献率增长为 68.90%;低值区由 2010 年的 37 个县域减少为 33 个,承载的农业固碳比例降低为 4.45%。2020 年,农业碳汇量高值区和较高值区对湖南省农业固碳的贡献率提升为 69.91%,且农业碳汇量低值区所承载的农业固碳比重降低为 3.56%,表明湖南省县域农业碳汇能力随时间推移渐趋增强。从农业碳吸收强度看,湖南省县域农业碳吸收强度空间格局发生显著转变,由 2010 年“东中部高,西西北部低”转变为 2020 年“全域范围提

高,仅西北角偏低”,县域农业碳吸收强度整体显著提升。具体来看,2010 年,碳吸收强度高值区分布于湘潭县、渌口区、醴陵市、雨湖区、赫山区、芦淞区、汨罗市、东安县等东中部地区,均高于 4.5 t/hm<sup>2</sup>;而西北部的古丈、泸溪、凤凰、保靖、永顺县和南部的贵阳、永兴、桂东县等地的农业碳吸收强度较低,均低于 3 t/hm<sup>2</sup>。2015 年,湖南省县域农业碳吸收强度显著提升,碳吸收强度高于 4 t/hm<sup>2</sup> 的县域由 2010 年的 50 个增加为 62 个,北部的澧县、湘阴、汉寿、华容、南县和津市市等地转变为高值区;低值区相较于 2010 年减少了 10 个县域。2020 年,可清晰看出湖南省县

域农业碳吸收强度高值区范围显著扩大,碳吸收强度高于  $4\text{ t/hm}^2$  的县域已增加至 74 个,西部的洪江市、溆浦、会同、芷江县以及南部的宁远、祁阳县等地也转变为高值区;低值区仅芙蓉区、古丈、凤凰县、石峰区、吉首市、泸溪县和桑植县 7 个县域。可见,湖南省县域农业碳承载能力显著增强且耕地质量及其单位固碳能力显著提升。

2.2 湖南省县域农业碳补偿及其潜力分析

2.2.1 湖南省县域农业碳补偿率分析 农业碳补偿率反映农业净碳效应,体现出农业自身对环境负外部效应进行补偿的能力<sup>[37]</sup>,碳补偿率越高,表明区域农业碳汇能力越强。由上述结果可知,湖南省县域农业碳收支存在明显差异且并不协调,导致其农业碳补偿

率也存在显著的空间差异(图 9)。

整体看来,湖南省县域农业碳补偿率均低于 1,表明湖南省县域农业碳吸收不足以补偿农业碳排放,表现为净碳源,这与吴昊玥等<sup>[37]</sup>的研究结果相似。具体来看,2010 年,农业碳补偿率高值区主要分布在东中北部地区的临澧、茶陵、安乡县、韶山市、安仁、南县、汉寿县和桃源县等 27 个县域,比例 60.66% 的县域农业碳补偿率处于 20%~50% 之间;2015 年,可清晰看出农业碳补偿率高值区明显减少,这与该阶段湖南省各分区碳排放陆续达到峰值,农业碳排量持续增长有关;2020 年,湖南省县域农业碳补偿率有所回升,表明农业碳汇能力及自身对环境外部效应补偿能力增强。

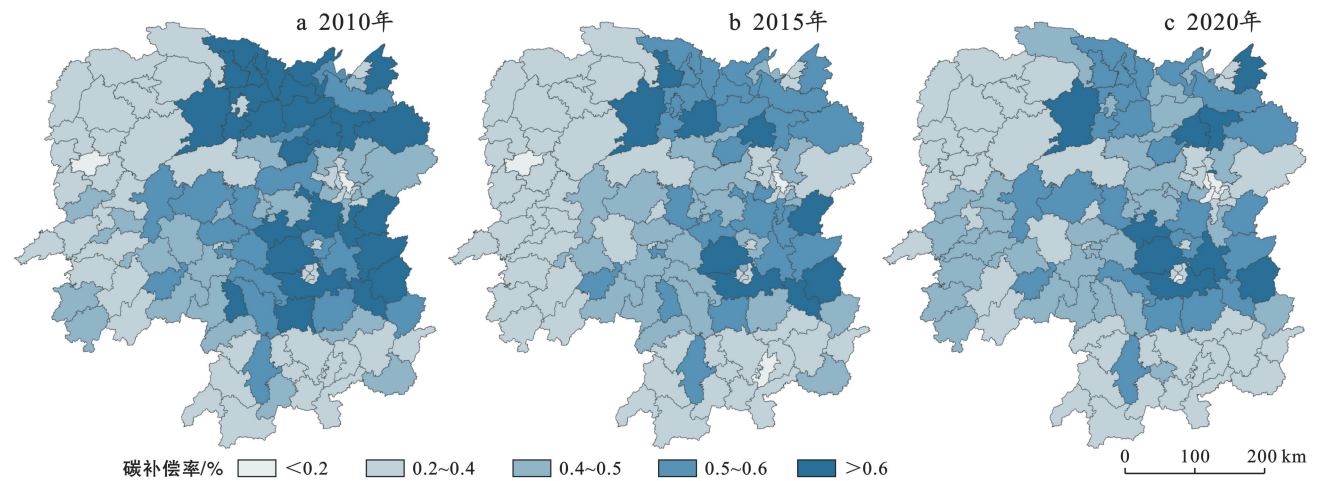


图 9 湖南省县域农业碳补偿率空间分布  
Fig.9 Spatial distribution of agricultural carbon compensation rate in counties of Hunan Province

从各县域农业碳补偿率变化趋势看,湖南省仅永顺县、吉首市、龙山县、武陵区、衡东县等 43 个县域农业碳补偿率呈增长趋势,占比仅 35.25%,这些区域农业碳吸收量增长幅度高于农业碳排量,农业生态管控及低碳化发展较好;而天心区、雁峰区、南县、安乡县、汝城县等 79 个县域农业碳补偿率呈降低趋势,表明这些地区农业碳排量增长幅度要高于农业碳吸收量,农业质效发展及耕地质量方面有所欠缺。

2.2.2 空间相关性检验 为分析湖南省县域农业碳补偿率是否存在空间相关性,采用全局 Moran's  $I$  指数探究其空间集聚特征。由图 10 可知,2010—2020 年,湖南省县域农业碳补偿率 Moran's  $I$  值总体呈降低趋势,但其均为正值,且均通过  $p$  值小于 0.01 且  $Z$  绝对值大于 2.58 的显著性水平检验,表明湖南省县域农业碳补偿率在空间上存在显著的正相关性,且其空间集聚特征较为明显。

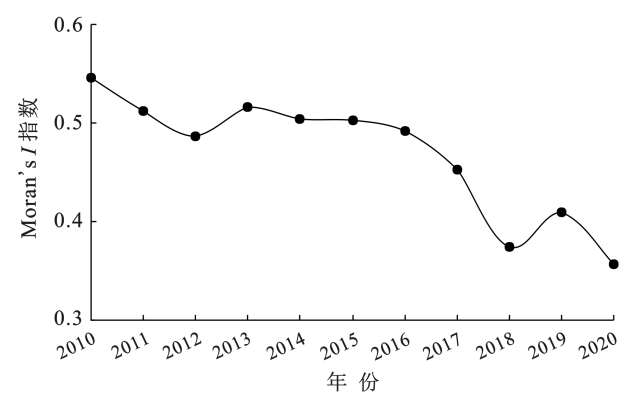


图 10 湖南省县域农业碳补偿率 Moran's  $I$  指数  
Fig.10 Moran's  $I$  index of agricultural carbon compensation rate in counties of Hunan Province

为进一步探索湖南省县域农业碳补偿率空间关联特征,采用 Getis-Ord  $G_i^*$  指数来探究 2010,2015,2020 这 3 个年份农业碳补偿率局部空间相关性。由

图11 可知,湖南省县域农业碳补偿率呈现显著的地理集聚特征,热点区高度集中在湘东的衡东、攸县、茶陵县和湘北的澧县、临澧、安乡、岳阳、汉寿县等地,农业碳补偿率处于 69.52%~78.63%;冷点区主要集中于湘东的芙蓉、雨花区和湘南的宜章县以及湘西的桑

植、永顺、花垣、凤凰、泸溪县等地,农业碳补偿率处于 12.09%~22.19%。伴随时间推移,湖南省县域农业碳补偿率集聚程度降低,但其集聚特征仍较为显著,整体呈现“热点集中集聚于湘北湘东,冷点分散分布于湘西湘东湘南”的空间格局,空间关联特征明显。

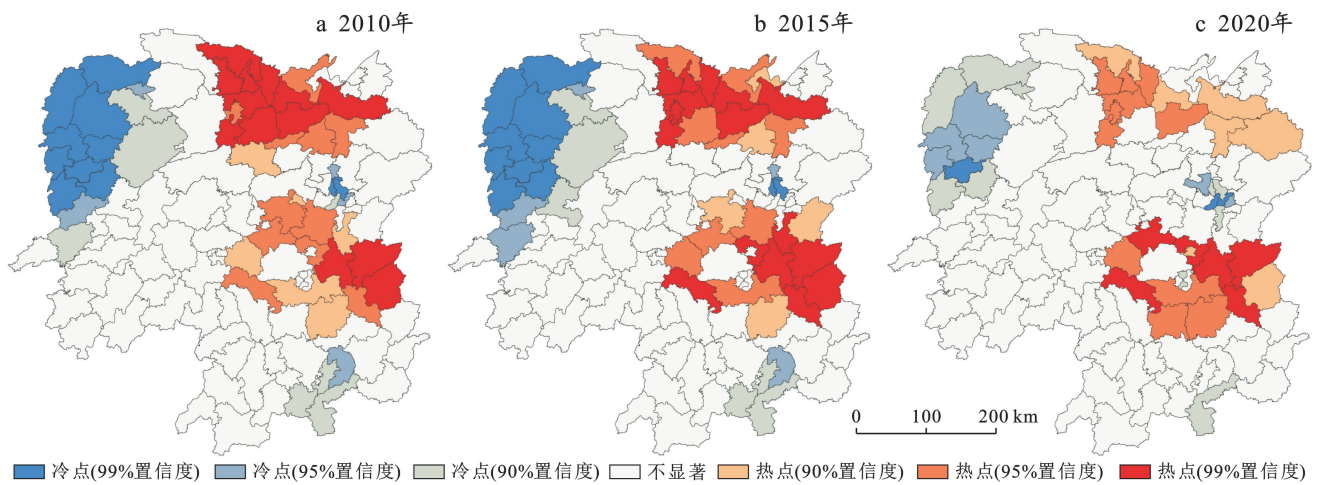


图 11 湖南省县域农业碳补偿率局部空间特征

Fig.11 Local spatial characteristics of agricultural carbon compensation rate in counties of Hunan Province

2.2.3 绝对 $\beta$ 收敛性检验 从全省层面对湖南省县域农业碳补偿率进行绝对 $\beta$ 收敛性检验,结果显示湖南省县域农业碳补偿率的绝对 $\beta$ 收敛系数为-0.432 8,且通过 1%的显著性水平检验,表明湖南省各县域农业碳补偿率具有收敛趋势,存在农业碳补偿率较低县域追赶农业碳补偿率最高值县域的趋势。

2.2.4 农业碳补偿潜力区域差异分析 基于湖南省县域农业碳补偿率存在空间相关性及收敛性特征,以湖南省县域中农业碳补偿率最高的衡阳县为基准,测算出各县域农业碳补偿平均潜力并将全省 122 个县域分为低、中、高碳补偿潜力 3 个类别详细分类依据及结果见表 2。

表 2 2010—2020 年湖南省县域农业碳补偿平均潜力			
Table 2 Average potential of agricultural carbon compensation in counties of Hunan Province from 2010 to 2020			
分类	范围	各地区农业碳补偿平均潜力/(% (括号内为其数值))	数量/个
低碳补偿潜力	$\leq 35\%$	衡阳县(0)、茶陵县(0.65)、衡南县(4.75)、桃源县(6.54)、临澧县(9.25)、醴陵市(9.27)、衡东县(10.89)、汉寿县(11.04)、津门市(11.82)、安仁县(12.80)、湘阴县(13.04)、汨罗市(13.21)、澧县(13.74)、双峰县(14.64)、岳阳县(15.04)、常宁市(15.80)、赫山区(16.14)、华容县(16.50)、湘潭县(16.84)、临湘市(17.88)、鼎城区(17.95)、安乡县(18.86)、韶山市(22.39)、平江县(22.40)、南县(22.80)、攸县(23.03)、武冈市(24.53)、衡山县(24.72)、涟源市(24.81)、冷水滩区(24.96)、溆口区(25.06)、耒阳市(26.49)、宁远县(26.65)、沅江市(26.65)、新化县(26.98)、祁东县(28.31)、雨湖区(28.32)、祁阳县(28.77)、邵东市(30.38)、大祥区(30.83)、淑浦县(31.39)、新邵县(31.82)、武陵区(31.91)、君山区(32.62)、新宁县(32.80)、湘乡市(32.99)、炎陵县(33.23)、邵阳县(33.98)	48
中碳补偿潜力	$35\% \sim 70\%$	娄星区(35.22)、天元区(35.31)、宁乡县(35.53)、双清区(36.30)、东安县(36.36)、长沙县(36.52)、资阳区(38.23)、零陵区(38.57)、靖州苗族侗族自治县(38.76)、洞口县(38.93)、通道侗族自治县(39.01)、桃江县(40.21)、荷塘区(41.63)、蓝山县(41.96)、麻阳苗族自治县(41.98)、冷水江市(42.51)、会同县(43.06)、辰溪县(43.54)、嘉禾县(43.64)、汝城县(44.37)、永兴县(44.38)、石门县(45.14)、中方县(45.74)、浏阳市(46.14)、苏仙区(46.65)、芦淞区(47.23)、慈利县(47.26)、桂阳县(47.76)、南岳区(48.32)、岳阳楼区(48.42)、石鼓区(48.55)、望城区(48.62)、蒸湘区(48.85)、北塔区(49.43)、江华瑶族自治县(49.61)、洪江市(49.78)、芷江侗族自治县(50.23)、临武县(50.26)、绥宁县(51.10)、桂东县(51.36)、宜章县(51.62)、隆回县(51.64)、道县(52.81)、新田县(52.83)、云溪区(53.46)、双牌县(53.54)、沅陵县(53.75)、岳麓区(53.96)、安化县(55.01)、城步苗族自治县(55.06)、新晃侗族自治县(55.82)、永顺县(57.10)、花垣县(60.45)、开福区(60.70)、江永县(60.94)、珠晖区(61.20)、雁峰区(61.42)、龙山县(61.75)、资兴市(62.20)、泸溪县(62.27)、保靖县(62.63)、岳塘区(62.70)、天心区(62.71)、武陵源区(62.93)、永定区(63.41)、石峰区(63.48)、鹤城区(66.20)、凤凰县(67.73)、桑植县(68.54)、古丈县(69.05)	70
高碳补偿潜力	$\geq 70\%$	吉首市(70.72)、北湖区(71.25)、芙蓉区(81.40)、雨花区(83.63)	4

结果表明,湖南省县域农业碳补偿潜力存在较为显著的空间差异,其中共有 74 个县域处于中、高碳补偿区域,达 60.66%,表明湖南省大部分县域农业碳补偿率偏低,仍具有一定的碳补偿空间。具体来看,湖



南省农业碳补偿潜力较低的区域有衡阳县、茶陵县、衡南县、桃源县、临澧县、醴陵市等48个县域,低碳补偿区域主要“连片”分布在湘北、湘中、湘南和湘东等地区且绝大部分县域为湖南省粮食主产区,表明这些地区农业碳补偿率较高,对农业自身所产生的碳排量中和贡献较大。针对上述区域,应进一步强化农田耕地质量与利用效率、农业科技服务与设施完善、农民技术培训与推广转化等。湖南省中碳补偿潜力县域娄星、天元区、宁乡县、双清区、东安县、长沙县等70个县域主要“连片”分布在湘南、湘西、湘东和湘中等地区;高碳补偿潜力县域“零星”分布于吉首市、北湖区、芙蓉区、雨花区4地。

上述地区农业碳补偿率相对较低,存在较大碳补偿空间。对此,一方面可从农业供给端降低农业碳排放量以提高农业碳补偿率,诸如科学调控化肥、农药等农用物资投入用量,降低无效投入,切实提高其利用效率;合理规划完善基建配置,结合农业科技研发和农业绿色发展,提升农业基建抗险抗灾能力;另一方面可从产值端增强农业碳汇量以提高农业碳补偿率,如紧扣农业现代化发展,着力提升单位面积耕地农作物生产力水平,提高农作物固碳能力;注重农业集约化、规模化生产,优化种植结构并有效扩大固碳能力较强农作物种植面积,发挥生产要素最大效益等。综合来看,中、高农业碳补偿潜力区域主要分布在湘西、湘南等地区,因此要因地制宜制定相应碳减排策略,推动实施农业绿色低碳发展,充分挖掘该区域农业碳补偿潜力。

### 3 结论

(1) 2010—2020年,湖南省各分区农业碳排放量总体呈先升后降的趋势,且均于2015—2016年达到峰值后降低;农业碳排放强度演变趋势基本一致,均呈渐趋降低趋势。其中,湘西地区虽有高碳排强度,但其碳排量较低且碳排强度降幅最大,表明其低碳农业仍有很好的发展潜力;湘北和湘南地区具有高碳排量和较高碳排强度特征,是今后“双碳”目标重点关注区域。此外,湖南省县域农业碳排放量整体呈“以高值区为中心,向外围逐渐降低”的结构,且农田土壤碳排放量是其主要来源;县域农业碳排强度整体呈“西南高,东北低”的空间格局且逐年显著降低。可知,湖南省县域农业绿色化、低碳化、可持续化发展取得明显成效,低碳农业仍有很大发展空间。

(2) 研究期内,湖南省各分区农业碳汇量及其变动趋势、农业碳吸收强度均存在显著差异,除湘东地区呈降低趋势外,其余地区均呈增长趋势。其中,湘

西地区农业碳吸收强度虽较低但其变动幅度较大,年均增长率达3.32%;而湘东地区农业碳吸收强度虽降低但年均降低率仅为0.12%,由此需进一步挖掘两区农业碳汇潜力,助力湖南省低碳农业发展。此外,湖南省县域农业碳汇量整体呈“东中北部高,西南部低”的空间格局,其农业碳汇能力随时间推移渐趋增强,稻谷对农业碳汇量贡献最大;县域农业碳吸收强度空间格局发生显著转变,由2010年“东中部高,西西北部低”转变为2020年“全域范围提高,仅西北角偏低”,农业碳吸收强度整体明显增强。

(3) 整体看来,湖南省县域农业碳补偿率均低于1,表明湖南省县域农业碳吸收不足以补偿农业碳排放,表现为净碳源;且湖南省仅比例为35.25%的县域农业碳补偿率呈增长趋势,整体看来湖南省县域农业质效发展及耕地质量方面有所欠缺。研究区农业碳补偿率存在显著的空间正相关性,且其集聚特征和空间关联特征均较为显著。此外,研究区农业碳补偿率绝对 $\beta$ 收敛系数为负,且通过1%显著性检验,表明湖南省各县域农业碳补偿率具有收敛趋势。

(4) 湖南省县域农业碳补偿潜力在空间上呈现显著不平衡特征,中、高碳补偿县域主要分布在湘北、湘南地区,且其比例为60.66%,表明湖南省县域农业碳补偿率偏低,仍具有很大的碳补偿空间。其中,低碳补偿潜力县域主要连片分布在湘北、湘中、湘南和湘东等地区;中碳补偿潜力县域主要连片分布在湘南、湘西、湘东和湘中等地区;高碳补偿潜力县域零星分布于吉首市、北湖区、芙蓉区、雨花区4地。因此,要深入强化区域合作,多方共促绿色转型,充分发挥农业碳补偿率热点区辐射带动效应,维持好农业碳补偿能力较高区域优良低碳农业发展情势,重点关注中、高碳补偿潜力区域绿色农业发展趋势,缩减湖南省各县域低碳农业发展差距。

#### [参考文献]

- [1] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N].人民日报,2020-09-23(3).
- [2] Wang Xiuhong. Changes in CO<sub>2</sub> emissions induced by agricultural inputs in China over 1991—2014 [J]. Sustainability, 2016,8(5):414.
- [3] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
- [4] 尧波,郑艳明,胡丹,等.江西省县域农业碳排放的时空动态及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(3):311-318.
- [5] 高鸣,宋洪远.中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异:基于Malmquist-luenberger指数与空间计量的实证分析[J].经济地理,2015,35(4):142-148.

- [6] 范大莎,杨旭,吴相利,等.东北三省农田生态系统碳排放时空分异特征及驱动因素研究[J].环境科学学报,2017,37(7):2797-2804.
- [7] 吴贤荣,张俊飏.中国省域农业碳排放:增长主导效应与减排退耦效应[J].农业技术经济,2017(5):27-36.
- [8] Burney J A, Davis S J, Lobell D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010,107(26):12052-12057.
- [9] 李波,杜建国,刘雪琪.湖北省农业碳排放的时空特征及经济关联性[J].中国农业科学,2019,52(23):4309-4319.
- [10] 陈炜,殷田园,李红兵.1997—2015 年中国种植业碳排放时空特征及与农业发展的关系[J].干旱区资源与环境,2019,33(2):37-44.
- [11] 胡中应.技术进步、技术效率与中国农业碳排放[J].华东经济管理,2018,32(6):100-105.
- [12] 张大东,张社梅,黄伟.浙江省农业系统碳源、碳汇现状评估分析[J].中国农业资源与区划,2012,33(5):12-19.
- [13] 曹志宏,秦帅,郝晋珉.河南省农业生产碳汇的演变趋势及其集聚特征分析[J].中国生态农业学报,2018,26(9):1283-1290.
- [14] 于伟咏,漆雁斌,明辉,等.中国农业系统碳汇和碳源的省域差异及影响因素[J].西部林业科学,2016,45(5):1-7.
- [15] Allen M R, Frame D J, Huntingford C, et al. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne [J]. Nature, 2009,458(7242):1163-1166.
- [16] 夏四友,杨宇.基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J].地理学报,2022,77(3):679-696.
- [17] 蒋烨林,王让会,彭擎,等.干旱区景观格局演变及碳收支状况研究:以塔里木盆地为例[J].生态与农村环境学报,2019,35(7):875-884.
- [18] 李翠华,蔡榕硕,颜秀花.2010—2018 年海南东寨港红树林湿地碳收支的变化分析[J].海洋通报,2020,39(4):488-497.
- [19] 于贵瑞,王秋凤,朱先进.区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性[J].地理科学进展,2011,30(1):103-113.
- [20] 王兴,薛建福,王钰乔,等.我国西部地区种植业碳收支分析[J].中国农业科技导报,2016,18(3):104-111.
- [21] 康霞.甘肃省农田生态系统碳收支动态[J].中国沙漠,2018,38(6):1237-1242.
- [22] 伍国勇,陈莹,孙小钧.中国种植业碳补偿率区域差异、动态演进及收敛性分析[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(10):1774-1785.
- [23] 吴昊玥,何艳秋,陈文宽,等.中国农业碳补偿率空间效应及影响因素研究:基于空间 Durbin 模型[J].农业技术经济,2020(3):110-123.
- [24] Denstadli J M, Veisten K. The flight is valuable regardless of the carbon tax scheme: a case study of Norwegian leisure air travelers [J]. Tourism Management, 2020,81:104150.
- [25] 李璐,董捷,徐磊,等.功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区:以武汉城市圈为例[J].自然资源学报,2019,34(5):1003-1015.
- [26] 夏四友,赵媛,许昕,等.近 20 年来中国农业碳排放强度区域差异、时空格局及动态演化[J].长江流域资源与环境,2020,29(3):596-608.
- [27] 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.
- [28] 田云,张俊飏,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.
- [29] 伍国勇,孙小钧,于福波,等.中国种植业碳生产率空间关联格局及影响因素分析[J].中国人口·资源与环境,2020,30(5):46-57.
- [30] Cao M. Methane emissions from China's paddyland [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1995, 55(2):129-137.
- [31] 王明星,李晶,郑循华.稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J].大气科学,1998,22(4):600-612.
- [32] 庞军柱,王效科,牟玉静,等.黄土高原冬小麦地  $N_2O$  排放[J].生态学报,2011,31(7):1896-1903.
- [33] 邱炜红,刘金山,胡承孝,等.种植蔬菜地与裸地氧化亚氮排放差异比较研究[J].生态环境学报,2010,19(12):2982-2985.
- [34] 罗怀良.中国农田作物植被碳储量研究进展[J].生态环境学报,2014,23(4):692-697.
- [35] 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.
- [36] 王腊芳,段文静,赖明勇,等.中国制造业节能潜力的区域及行业差异[J].地理研究,2015,34(1):109-121.
- [37] 吴昊玥,何宇,黄瀚蛟,等.中国种植业碳补偿率测算及空间收敛性[J].中国人口·资源与环境,2021,31(6):113-123.