

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.04.001

巢湖流域土地利用碳排放时空变化及影响因素研究

赵萍, 孙雨, 赵思逸, 阮旭东, 常杰, 周俊

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章基于夜间灯光数据估测巢湖流域土地利用碳排放量,从县域尺度上分析土地利用碳排放时空分布特征及空间相关性,探究其影响因素作用机理。结果表明:2012—2018年,巢湖流域土地利用特征较为显著,主要以耕地为主,建设用地和林地次之,水域、草地和未利用地较少;2012—2018年,巢湖流域碳源主要集中于合肥市区、肥东县和肥西县,碳汇主要集中于舒城县、巢湖市和庐江县,土地利用净碳排放总体呈增长趋势,且存在着显著的空间正相关关系;区域投资、经济发展、人口规模和土地利用结构对巢湖流域土地利用碳排放都有较大影响,且双因子交互作用均超过单个指标影响。研究结果可为制定合理的区域碳排放优化方案提供参考。

关键词:土地利用碳排放;夜间灯光遥感;时空变化;影响因素;巢湖流域

中图分类号:X321 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)04-0433-09

Spatio-temporal changes and influencing factors of land use carbon emissions in Chaohu Lake Basin

ZHAO Ping, SUN Yu, ZHAO Siyi, RUAN Xudong, CHANG Jie, ZHOU Jun

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper was based on nighttime light data to estimate carbon emissions from land use in the Chaohu Lake Basin. It analyzed the spatio-temporal distribution characteristics and spatial correlations of land use carbon emissions at the county level, investigating the mechanisms of influencing factors. The results indicated that from 2012 to 2018, land use features in Chaohu Lake Basin were significant, primarily dominated by cultivated land, followed by construction land and forest land, with limited water bodies, grassland, and unused land. During the same period, carbon sources in Chaohu Lake Basin were mainly concentrated in the urban area of Hefei City, Feidong County, and Feixi County, while carbon sinks were mainly concentrated in Shucheng County, Chaohu City, and Lujiang County. Overall, net carbon emissions from land use showed an increasing trend, and there was a significant positive spatial correlation. Regional investments, economic development, population size, and land use structure had a substantial impact on land use carbon emissions in Chaohu Lake Basin, with the interactive effects of paired factors exceeding those of individual indicators. The research findings can provide references for formulating rational regional carbon emission optimization strategies.

Key words: land use carbon emissions; nighttime light remote sensing; spatio-temporal changes; influencing factors; Chaohu Lake Basin

气候变化是当今世界所面临的重大全球性问题之一,日益严峻的气候变化形势正影响着人类

正常的生产生活,越来越多的研究表明,碳排放是导致全球气候变暖的重要因素^[1]。为应对此情

收稿日期:2023-12-14;修回日期:2024-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42271417)

作者简介:赵萍(1975—),女,安徽芜湖人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

况,我国提出“双碳”目标,即二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。土地是碳排放的重要载体,土地利用变化对于区域二氧化碳增加有着重要的影响,深入探究土地利用碳排放相关机理,有利于为宏观决策部门实行低碳理念下的土地利用规划提供重要的理论基础。

近年来,土地利用碳排放受到国内外学者们的广泛关注。作为土地利用碳排放研究的基石,国内外学者们对于碳排放核算方法做了大量研究^[2-3],目前主要包括碳排放系数法在内的自上而下和遥感估算法在内的自下而上两类核算方法^[4]。其中由联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)制定的基于统计数据的碳排放系数法应用广泛,但受到统计数据的限制,研究尺度多为国家或省级层面^[5-7],难以实现小尺度的碳排放测算。夜间灯光数据具有容易获取、处理方便、与人类活动具有高拟合度等优点,近年来被广泛用于开展碳排放量的估算研究^[8-10],可有效弥补能源消耗等相关统计数据缺失的问题,便于开展中小尺度碳排放时空分布特征及变化规律研究^[11-12]。此外,土地利用碳排放影响机理也成为国内外学者研究的焦点^[13-15],对数均值分解指数(logarithmic mean division index, LMDI)分解法^[16]、Kaya 恒等式^[17]、可拓展的随机性环境影响评估模型(stochastic impacts by regression on population, affluence and technology, STIRPAT)模型^[18]和面板数据模型^[19]等方法常被用于探究土地利用碳排放影响机理,但这些方法多侧重于碳排放影响因素分解后的机理分析,缺乏空间异质性研究。地理探测器考虑了空间效应,并可以探究两两影响因素对土地利用碳排放的交互作用,对探究土地利用碳排放影响机理有重要作用^[20]。

巢湖流域作为长江中下游的重要组成部分,在地区经济、农业和生态系统中扮演着关键角色,也是安徽省生态保护的重点区域。近些年,该流域社会经济的迅速发展导致土地利用变化显著,碳排放压力不断增大,目前针对该区域土地利用碳排放相关研究较少。本文基于夜间灯光数据和能源统计数据,估算巢湖流域土地利用碳排放量,从县域尺度上探究土地利用碳排放时空分布特征,并利用探索性空间数据分析(exploratory spatial data analysis, ESDA)方法和地理探测器揭示巢湖流域土地利用碳排放空间相关性和影响因素

作用机理,旨在为巢湖流域土地结构优化提供参考依据,以期为制定巢湖流域碳减排政策提供决策支持,推动“碳达峰、碳中和”目标早日实现。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

巢湖流域位于安徽省中部,包括合肥市区、巢湖市、肥东县、肥西县、庐江县、无为市、含山县、和县和舒城县在内的 9 个区县市,如图 1 所示(基于安徽省自然资源厅监制、安徽省第四测绘院编制,审图号为皖 S(2022)11 的标准地图绘制,底图边界无修改)。巢湖流域地势西高东低,中部较为平坦低洼;气候适宜,降雨充沛,河流水系较为发达,其中巢湖作为中国淡水湖泊中的重要一员,是巢湖流域的核心;土地资源较为丰富,是中国重要的农业区之一。作为长江下游的重要城市群和皖江城市带的中心地带,巢湖流域不仅是重点开发区域,同时也是我国典型的生态脆弱性区域。近年来,随着城市化和工业化进程的加速,巢湖流域土地利用结构在不断变化,给土地资源利用和生态环境保护带来了巨大的挑战。

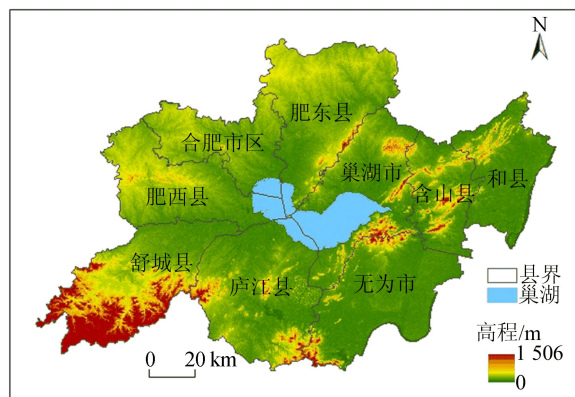


图 1 研究区地理位置和范围示意图

1.2 数据来源

本文使用的数据主要包括夜间灯光数据集、Landsat 系列影像数据和能源消费与社会经济数据等。

1) 夜间灯光数据集是由文献^[21]通过相互定标方法精校正 DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 传感器遥感影像,得到的中国区域 1992—2018 年连续夜间灯光影像数据,具有很好的连续性与一致性。由于同一年份不同传感器获取的数据不一致,为了充分利用各传感器数据,本文在此基础上进行年内融合处理后再统计得到相关夜间灯光亮

度值。

2) Landsat 系列影像数据来源于地理空间数据云平台,并按照耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六大类进行分类,分类标准参照《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)^[22],通过精度检验后得到巢湖流域 2012 年、2014 年、2016 年、2018 年 4 期土地利用数据。

3) 能源消费与社会经济数据来源于安徽省及巢湖流域各区县所在四市统计局公开发布的统计年鉴与各市、县政府每年公开发布的国民经济和社会发展统计公报。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用碳排放估算方法

根据《IPCC 温室气体清单指南》,将土地利用产生的碳排放分为直接碳排放和间接碳排放两大类^[23]。本文采用直接碳排放算法与间接碳排放算法相结合对研究区土地利用碳排放量进行计算。

1.3.1.1 直接碳排放计算方法

直接碳排放是指耕地、林地、草地、水域及未利用地 5 种地类中自然产生的、没有受到人类社会活动干扰的碳排放。采用直接碳排放系数法进行测算,计算公式^[24]如下:

$$E_d = \sum E_i = \sum S_i \delta_i \quad (1)$$

其中: E_d 为直接碳排放总量; E_i 为第 i 类土地利用类型的碳排放量; S_i 为第 i 类土地利用类型的面积; δ_i 为第 i 类土地利用类型的碳排放系数。参考文献^[25-28],耕地、林地、草地、水域、未利用地的碳排放系数分别为 0.422、-0.644、-0.021、-0.253、-0.005 t/hm²。其中:正值表示碳排放,为碳源效应;负值表示碳吸收,为碳汇效应。

1.3.1.2 间接碳排放计算方法

间接碳排放涉及的土地利用类型是建设用地,主要来源是人类日常生活中各种化石能源的燃烧,采用间接碳排放系数法进行测算。通过基于 IPCC 的能源消耗碳排放估算与夜间灯光数据进行能源碳排放模型构建得到间接碳排放量。

1) 基于 IPCC 的能源消耗碳排放估算。本文根据现有数据可获取性,选取原煤、洗精煤、焦炭、原油、汽油、煤油和柴油共 7 种能源作为建设用地碳排放测算的基础数据,计算公式^[29]如下:

$$E_c = \sum E_j \theta_j f_j \frac{M_{CO_2}}{M_C} \quad (2)$$

其中: E_c 为能源消耗碳排放总量; E_j 为第 j 类能源的消耗量; θ_j 为第 j 类能源的折算标准煤系数;

f_j 为第 j 类能源的碳排放系数,相关参数见表 1 所列; M_{CO_2} 和 M_C 分别为一个 CO₂ 分子和一个 C 原子的质量。

表 1 能源标准煤换算系数及碳排放系数

能源类型	标准煤换算系数	碳排放系数
原煤	0.714 3	0.755 9
洗精煤	0.900 0	0.622 5
焦炭	0.971 4	0.855 0
原油	1.428 6	0.585 7
汽油	1.471 4	0.553 8
煤油	1.471 4	0.571 4
柴油	1.457 1	0.592 1

2) 能源碳排放模型构建。由于同一区域的夜间灯光总值与 CO₂ 排放总量具有相关性^[30],对 2000—2018 年安徽省夜间灯光数据总亮度值与相应年份能源消耗碳排放统计量进行拟合,相关结果见表 2 所列。其中线性回归模型使用不含截距形式以便保证降尺度反演的精度。由表 2 可知,两者具有较高的拟合度,且线性回归模型拟合度最高,故本文采用此模型进行间接碳排放估算。

表 2 巢湖流域能源消耗碳排放相关拟合方程

数学模型	拟合方程	R ²
线性回归模型	$y=0.0419x$	0.979 4
对数模型	$y=298.43 \ln x - 370.274$	0.909 1
乘幂函数模型	$y=0.0017x^{1.2338}$	0.855 4

3) 碳排放量修正。为减小回归函数带来的估算误差,参考文献^[31]的研究对碳排放量进行误差修正,具体由能源消耗碳排放量的线性模型估算初始碳排放量,并计算各年份的碳排放模型修正系数,随后将第 n 年初始碳排放量乘以相应修正系数,得到修正后的碳排放量,公式如下:

$$k_n = T_n / S_n \quad (3)$$

$$S_{nk} = T_{nk} k_n \quad (4)$$

其中: k_n 为第 n 年碳排放模型修正系数; T_n 为第 n 年能源消耗碳排放量的核算值; S_n 为第 n 年能源消耗碳排放量的拟合值; S_{nk} 为第 n 年中第 k 个栅格单元上分布的碳排放量的修正模拟值; T_{nk} 为第 n 年第 k 个栅格上分布的碳排放量。

1.3.2 探索性空间数据分析

ESDA 以空间关联度为核心,是空间分析方法的集合,主要包括全局空间自相关和局部空间自相关 2 种^[31]。

全局空间自相关分析探索空间邻近单元属性

值的相似程度,主要用于揭示某一现象在区域整体上是否存在相关性和依赖性;局部空间自相关是全局空间自相关在各个研究单元上的分解,反映空间内部的特征差异。本文利用全局莫兰指数(Moran's I)和局部莫兰指数分别探究巢湖流域土地利用碳排放整体和局部的空间相关性和异质性。

1.3.3 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动因子的一种统计学方法,既可以探测数值型数据,也可以探测定性数据^[32],共有 4 个探测器,本文使用分异及因子探测和交互作用探测进行研究。

分异及因子探测器用于探测某属性的空间分异性,某影响因子程度大小解释了该属性的空间分异性,使用解释力 q 值进行度量, q 值越大表明该影响因子对属性的解释力越强。交互作用探测器用于识别不同影响因子之间的交互作用。本文重点研究相关影响因素对土地利用碳排放的影响程度,探索土地利用碳排放的空间分异性,得出各因子之间的交互解释力并与单因子相比较。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征

根据土地利用分类,合肥市区的建设用地面积相比其他县区占比最大,无为市、肥东县次之,

舒城县最小;草地和林地主要集中于舒城县,合肥市区分布最少;巢湖市的水域面积最大。2012—2018 年巢湖流域各土地利用类型面积和 2018 年相对于 2012 年各土地利用类型面积变化量见表 3 所列。

从表 3 可以看出,2012—2018 年巢湖流域面积最大的地类为耕地。整体上,2012—2018 年巢湖流域土地利用变化特征表现为建设用地迅速增加,耕地显著减少,6 年间建设用地共增加 717.46 km²,耕地减少 621.47 km²,建设用地主要由耕地转变而来;草地面积增加;林地、水域和未利用地面积小幅度减少。

表 3 2012—2018 年巢湖流域土地利用面积 单位:km²

年份	林地	草地	耕地	水域	建设用地	未利用地
2012	2 189.90	563.72	10 651.63	1 134.93	1 508.53	16.61
2014	2 074.34	594.92	10 403.96	1 222.81	1 734.21	25.08
2016	2 137.76	604.11	10 182.37	1 173.83	1 938.51	28.75
2018	2 112.63	573.90	10 030.17	1 102.85	2 225.99	19.77

2.2 土地利用碳排放时空演变特征

2.2.1 碳源与碳汇效应分析

对估算的 2012—2018 年巢湖流域各县区碳排放量和碳吸收量结果进行统计,得到巢湖流域碳源和碳汇效应情况,结果如图 2 所示。

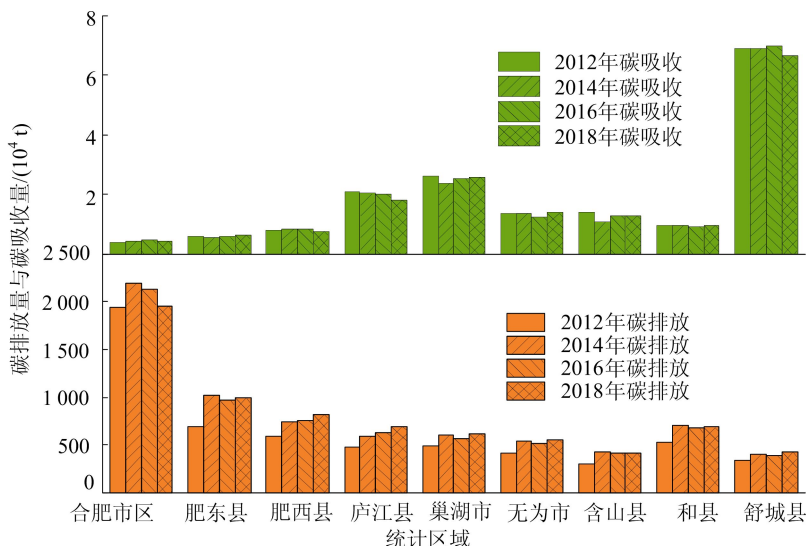


图 2 2012—2018 年巢湖流域碳排放量与碳吸收量

从图 2 可以看出,巢湖流域碳源主要集中于合肥市区、肥东县和肥西县,和县、庐江县、巢湖市和无为市次之,含山县和舒城县碳源效应最弱。2012—2018 年间,碳排放总量在时间上呈现波动

上升趋势,由 2012 年的 $5\,787.19 \times 10^4$ t 增加到 2018 年的 $7\,182.02 \times 10^4$ t,增加了 24.10%。其中 2012—2014 年碳排放总量变化较大,增加了 $1\,472.17 \times 10^4$ t,2014—2018 年碳源效应相对平

稳。合肥市区碳源效应最强,2012 年的碳排放量为 $1\,936.37 \times 10^4 \text{ t}$,到 2018 年增加为 $1\,954.94 \times 10^4 \text{ t}$,但占巢湖流域碳排放总量比重呈下降趋势,由 2012 年的 33.46% 下降到 2018 年的 27.22%; 含山县和舒城县碳源效应较弱,各年占碳排放总量比重都在 5%~6% 之间,变化相对稳定。

巢湖流域碳汇主要集中于舒城县、巢湖市和庐江县,无为市、含山县、和县和肥西县次之,合肥市区和肥东县碳汇效应最弱。碳吸收总量总体上呈下降趋势,由 2012 年的 $17.09 \times 10^4 \text{ t}$ 下降到 2018 年的 $16.52 \times 10^4 \text{ t}$,减少了 3.34%。舒城县

碳汇效应最强,各年占巢湖流域碳吸收总量比重平均为 40.87%,但碳吸收量总体上从 2012 年的 $6.88 \times 10^4 \text{ t}$ 下降为 2018 年的 $6.66 \times 10^4 \text{ t}$;合肥市区碳汇效应最低,各年占碳吸收总量比重平均为 2.60%,但碳吸收量总体上呈缓慢上升趋势,由 2012 年的 $0.38 \times 10^4 \text{ t}$ 增加为 2018 年的 $0.43 \times 10^4 \text{ t}$,碳汇效应增强;其他区域碳汇效应相对稳定。

2.2.2 净碳排放特征分析

对估算的 2012—2018 年巢湖流域整体土地利用净碳排放结果进行统计,见表 4 所列。

表 4 2012—2018 年巢湖流域土地利用碳排放量 单位: 10^4 t

年份	林地	草地	耕地	水域	建设用地	未利用地	总计
2012	-14.10	-0.12	44.95	-2.87	5 742.24	-0.01	5 770.08
2014	-13.36	-0.12	43.90	-3.09	7 215.45	-0.01	7 242.76
2016	-13.77	-0.13	42.97	-2.97	7 030.04	-0.01	7 056.14
2018	-13.61	-0.12	42.33	-2.79	7 139.69	-0.01	7 165.49

由表 4 可知,巢湖流域土地利用净碳排放量总体呈上升趋势,由 2012 年的 $5\,770.09 \times 10^4 \text{ t}$ 增加为 $7\,165.50 \times 10^4 \text{ t}$,其中 2012—2014 年碳净排放量变化较大,由 $5\,770.08 \times 10^4 \text{ t}$ 增长为 $7\,242.76 \times 10^4 \text{ t}$,增速为 25.52%,2014—2018 年净碳排放量变化相对平稳;建设用地碳排放变化

是净碳排放量变化的主要来源。

对估算的 2012—2018 年巢湖流域各县区净碳排放量结果进行统计,并采用自然断点分级法将研究区净碳排放量由低到高分为低度、次低度、次高度和高度 4 个等级,结果如图 3 所示。

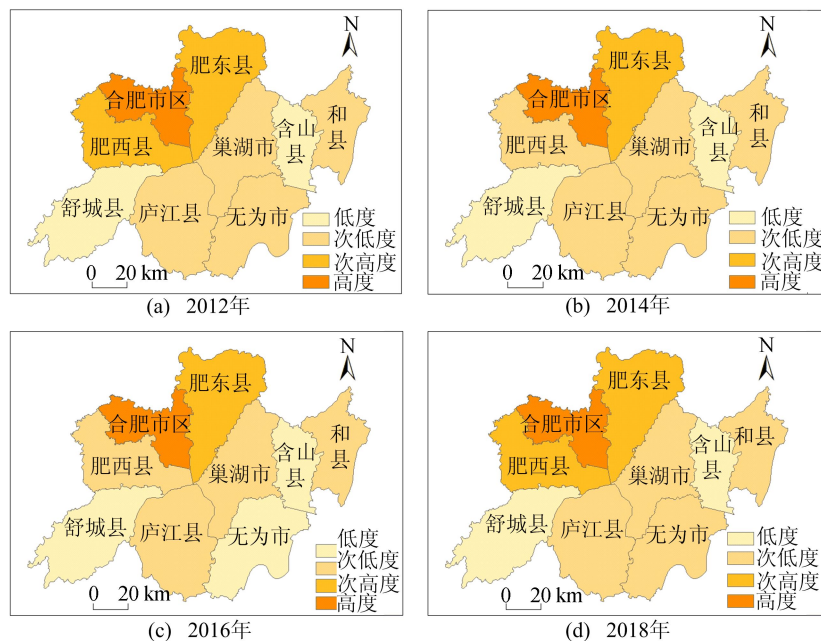


图 3 2012—2018 年巢湖流域土地利用净碳排放空间格局

由图 3 可知,土地利用碳排放量较大的区域主要集中于合肥市区、肥西县和肥东县,合肥市区 2012—2018 年均属于高度净碳排放区域,各年占

碳源总量比重平均为 30.33%,土地利用碳排放量从 2012 年的 $1\,935.99 \times 10^4 \text{ t}$ 增加为 2018 年的 $1\,954.51 \times 10^4 \text{ t}$;肥东县和肥西县净碳排放量次之;

舒城县与含山县在 2012—2018 年一直为低度净碳排放区域,2012 年碳排放量分别为 332.04×10^4 t 和 298.37×10^4 t,2018 年持续保持低碳排,分别为 421.44×10^4 t 和 414.05×10^4 t;其余县区净碳排放量均有不同程度增加。

总体来看,巢湖流域土地利用碳排放量呈上升趋势,同时具有阶段性特征,可分为 2 个阶段。第 1 阶段为 2012—2014 年,此阶段内巢湖流域 9 个县区土地利用碳排放急剧增加;第 2 阶段为 2014—2018 年,该阶段土地利用碳排放量呈现波动变化,变化率相对较小,其中:2014—2016 年 9 个县区的土地利用碳排放都出现了不同程度的下降。原因是安徽省为响应国家低碳发展号召,于 2014 年提出《安徽省 2014—2015 年节能减排低碳发展行动方案》^[33],大力推进结构调整,实施节能降排工程,对于巢湖流域碳排放起到了较强的抑制作用;2016—2018 年,巢湖流域能源消耗量增加,碳排放量增长幅度较小。

2.3 土地利用碳排放空间相关性

本研究使用 GeoDa 软件中的空间自相关分析工具对巢湖流域土地利用碳排放进行全局空间自相关性分析,结果见表 5 所列。

从表 5 可以看出,巢湖流域这 4 年土地利用碳排放的全局莫兰指数均为正值,且数值不断增加,由 2012 年的 0.113 8 增长为 2018 年的 0.214 8,并通过了置信度为 95% 的显著性检验。结果表明,巢湖流域土地利用碳排放具有显著的空间正相关性。

表 5 巢湖流域土地利用碳排放莫兰指数

年份	莫兰指数	Z 值	P 值	标准差
2012	0.113 8	2.168 3	0.026 0	0.108 1
2014	0.180 0	2.188 6	0.034 0	0.136 9
2016	0.178 2	2.218 7	0.280 0	0.134 1
2018	0.214 8	2.405 3	0.240 0	0.142 4

为了进一步探究巢湖流域土地利用碳排放与其相邻区域的空间相关程度,并分析局部特征差异,使用局部莫兰指数对其进行局部空间自相关性分析。结果表明,2012—2018 年,巢湖流域县域土地利用碳排放的内部空间关系基本保持稳定,大部分地区在空间上表现为非显著型,高-高聚集型区主要为合肥市区和肥东县,无低-低聚集型地区。其中,2012 年、2016 年、2018 年合肥市区、肥东县属于高-高聚集型地区;2014 年仅有合

肥市区属于高-高聚集型地区。原因是 2014 年合肥市区、肥西县、庐江县碳排放增长显著,肥东县相较于周围市区碳排放增长较小。结果符合客观事实,省会市辖区会带动周边市县更快、更高质量的发展,同时会造成能源消耗增多,进而使得碳排放量增加。

2.4 土地利用碳排放影响因素分析

上文研究结果表明,巢湖流域县级尺度土地利用碳排放存在显著的空间分异性,为了更加全面、准确地了解巢湖流域土地利用碳排放时空演变规律及其内在机理,深入探究相关影响因素的作用效果及相互作用情况,本文利用地理探测器,从空间层次分异性的角度,将巢湖流域土地利用碳排放相关影响因素加入其中进行解释。参考已有的研究成果,并结合数据的可获得性,选取产业结构、区域投资、经济发展、人口规模和土地利用结构 5 个方面与土地利用碳排放相关指标作为解释变量,见表 6 所列。

表 6 土地利用碳排放影响因素指标选取

要素	指标
产业结构	第二产业占比 X_1
区域投资	固定资产投资 X_2
经济发展	人均国内生产总值 X_3
人口规模	人口数量 X_4
土地利用结构	建设用地面积占比 X_5

以各县区的土地利用碳排放量为因变量,使用分异及因子探测器与影响因素交互作用探测器进行分析研究。

2.4.1 影响因素的显著性分析

利用分异及因子探测器进行分析,可以了解不同影响因素对巢湖流域土地利用碳排放的影响力大小,结果见表 7 所列。根据表 7 可得,巢湖流域土地利用碳排放各因子的平均解释力从大到小依次为 X_2 、 X_3 、 X_5 、 X_4 、 X_1 。其中 X_2 、 X_3 、 X_4 和 X_5 这 4 项指标在研究期间的解释程度相对较为稳定,且对于巢湖流域土地利用碳排放的影响力较大,4 年的 q 值都在 0.93 以上;而 X_1 影响力相对较小,且呈波动下降趋势, q 值由 2012 年的 0.501 8 下降到 2018 年的 0.323 5。

总体来看,5 个影响因子对巢湖流域碳排放均有不同程度的影响, X_1 对巢湖流域碳排放的影响程度相对较小, X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 对巢湖流域土地利用碳排放的解释程度得分较高,影响程度较大。

表7 影响因素对巢湖流域县域土地利用碳排放的解释力

指标	2012年	2014年	2016年	2018年	平均值
X ₁	0.501 8	0.525 3	0.403 2	0.323 5	0.438 5
X ₂	0.981 7	0.980 5	0.984 5	0.963 8	0.977 6
X ₃	0.978 8	0.975 0	0.970 9	0.896 0	0.955 2
X ₄	0.967 1	0.958 2	0.951 2	0.933 4	0.952 5
X ₅	0.982 4	0.941 3	0.962 8	0.930 7	0.954 3

从产业结构角度分析,2012—2018年,X₁对巢湖流域县域土地利用碳排放的影响程度呈先增后降趋势。原因是2014年之前巢湖流域注重经济发展,而第二产业是区域经济增长的重要动力者,以工业为主的产业占比不断增加。自2014年开始,安徽省积极响应节能减排号召,在行动方案中明确提出,推进传统产业结构调整,大力优化能源消费结构,推进清洁能源使用,严格控制煤炭消费,并在实际中取得较大进展。今后可继续推动巢湖流域产业结构优化,朝绿色环保方向发展,兼顾区域发展与节能减排。

从区域投资角度分析,2012—2018年,X₂对巢湖流域碳排放的影响力呈波降低趋势;4年的q值平均值为0.977 6,表明固定资产投资对巢湖流域土地利用碳排放具有较强的影响。投资是中国经济增长的重要拉动力,区域固定资产投资总额在不断增加,但q值呈现下降趋势,可能是传统高耗能行业固定投资占比逐年降低,同时能源使用效率的提高在一定程度上减小了巢湖流域对碳排放的影响。投资重心的偏移会导致各部门产能的改变,技术是实现减排的重要手段,今后可增加高新技术研发投资占比,优化投资结构,从而实现区域碳减排。

从经济发展角度分析,X₃的因子影响力逐渐减弱,由2012年的0.978 8减小为2018年的0.896 0。经济发展直接与能源消耗挂钩,化石燃料消耗是碳排放重要的来源,对碳排放具有重要的影响,相关政策的干预可以在一定程度上降低经济发展对碳排放的影响。在今后的经济发展进程中,政府可积极引导,鼓励高新产业发展,大力推进清洁能源使用,在经济健康发展的前提下践行低碳理念

从人口规模角度分析,2012—2018年,X₄对碳排放影响力呈下降趋势,由2012年的0.967 4减少为2018年的0.933 4,且数值整体较高,表明常住人口对碳排放具有显著的促进作用。常住人口的增多不仅直接增加生活能源消耗,且生活习惯的改变也会带来新的需求,从而产生更多的碳

排放。因此,合理引导人员流动与分布,充分利用、优化生活能源使用能够一定程度上降低人口对于碳排放的影响,优化人类生产和生活方式成为今后碳减排工作至关重要的环节。

从土地利用结构情况分析,2012—2018年,X₅对巢湖流域土地利用碳排放影响程度呈波动下降趋势,q值从2012年的0.982 4波动变化为2018年的0.930 7。土地利用结构是影响土地利用碳排放的重要因素。通过对巢湖流域土地利用变化分析可得,2012—2018年建设用地不断增加,建设用地是碳排放的重要来源。城镇的发展离不开能源的消耗,建设用地不断增加会引起碳排放的不断增多,但其q值出现下降。这说明政府干预起到了较为明显的效果。在今后的工作中,要关注城镇发展水平状况,合理优化区域用地类型,提高土地利用程度,采用针对性的手段保证巢湖流域可持续发展。

2.4.2 影响因素交互作用分析

利用交互探测器探究巢湖流域土地利用碳排放各个影响因素两两交互的影响情况,探测结果见表8所列。

表8 影响因素交互探测结果

年份	影响因素	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
2012	X ₁	0.501 8				
	X ₂	0.998 2	0.981 7			
	X ₃	0.994 0	0.987 7	0.978 8		
	X ₄	1.000 0	0.987 7	0.987 7	0.967 1	
	X ₅	0.996 8	0.998 2	0.998 7	0.994 5	0.982 4
2014	X ₁	0.525 3				
	X ₂	0.985 6	0.980 5			
	X ₃	0.992 4	0.998 1	0.975 0		
	X ₄	1.000 0	1.000 0	0.985 4	0.958 2	
	X ₅	0.999 4	0.998 1	0.995 1	0.992 2	0.941 3
2016	X ₁	0.403 2				
	X ₂	0.991 4	0.984 5			
	X ₃	0.983 6	0.997 6	0.970 9		
	X ₄	1.000 0	0.997 4	0.986 7	0.951 2	
	X ₅	1.000 0	1.000 0	0.999 4	0.993 2	0.962 8
2018	X ₁	0.323 5				
	X ₂	0.991 3	0.963 8			
	X ₃	0.993 4	0.979 9	0.896 0		
	X ₄	0.992 6	0.969 2	0.945 5	0.933 4	
	X ₅	1.000 0	1.000 0	0.944 1	0.964 2	0.930 7

由表8可知,2012—2018年巢湖流域土地利用碳排放影响因子的影响力全部表现为双因子增强交互作用,各指标两两交互的影响力均要比单个指标影响力更强。从各年分析可知,2012年和

2014 年 $X_4 \cap X_1$, 2016 年 $X_4 \cap X_1$ 、 $X_5 \cap X_1$ 、 $X_5 \cap X_2$, 2018 年 $X_5 \cap X_1$ 、 $X_5 \cap X_2$, 均达到 1.000。整体来看, $X_5 \cap X_2$ 、 $X_5 \cap X_1$ 和 $X_4 \cap X_1$ 在研究期间其交互作用 q 值平均值位于前三位, 且 X_1 在与其他 5 个影响因子进行交互作用后的 q 值与单因子作用时相比大幅度提升。由此可见, 这些影响因子的相互影响力不可忽视, 在制定相关措施时也应当综合考虑其相互影响情况。

3 结 论

本文基于夜间灯光数据和能源统计数据, 对巢湖流域土地利用碳排放量进行估测, 从县级尺度上对巢湖流域土地利用碳排放时空分布特征及其影响因素进行分析, 得出以下结论。

1) 2012—2018 年, 巢湖流域土地利用特征较为显著。巢湖流域主要以耕地为主, 建设用地和林地次之, 水域、草地和未利用地较少。从总体上看, 在碳汇地类中, 林地、水域和未利用地面积减少, 草地面积增加; 碳源地类中, 建设用地面积迅速扩大, 耕地呈减少趋势。

2) 2012—2018 年, 巢湖流域整体土地利用碳排放量呈上升趋势。碳源主要集中于合肥市、肥东县和肥西县, 碳排放呈上升趋势; 碳汇主要集中于舒城县、巢湖市和庐江县, 碳吸收为下降趋势; 高度净碳排放量区域为合肥市、舒城县与含山县一直为低度净碳排放区域。

3) 2012—2018 年, 巢湖流域县域土地利用碳排放存在着显著的空间正相关关系, 且内部空间关系基本保持稳定。巢湖流域 4 个时期县域土地利用碳排放的莫兰指数均为正值, 且数值不断增加, 均未出现高低、低低集聚型区域, 且合肥市市辖区固定为高高集聚型区。

4) 产业结构、区域投资、经济发展、人口规模和土地利用结构 5 个方面影响因子都对巢湖流域土地利用碳排放具有影响效果。其中, 4 年固定资产投资、人口数量和建设用地面积占比的 q 值均大于 0.93, 第二产业占比的 q 值最小, 且呈下降趋势。另外, 任意两影响因素交互作用后对巢湖流域土地利用碳排放的影响力均要比单个指标影响力更大。

本文通过分析巢湖流域土地利用碳排放时空分布特征, 并探究影响因子作用情况, 得出巢湖流域土地利用碳排放效应是多因素综合作用的结果。减排工作要结合多角度进行, 大力优化能源消费结构, 优化投资结构, 优化人类生产和生活方

式, 坚持用地结构优化, 在合理保护林地、草地区域的同时提高建设用地的土地利用效率, 在经济健康发展的前提下践行低碳目标。

将夜间灯光数据加入建设用地碳排放估算, 在一定程度上弥补了传统能源统计数据的不足, 提高了碳排放估算的准确性, 为研究巢湖流域县域尺度碳排放效应提供便利, 但由于区域差异性导致灯光数据的处理工作也存在一定的局限性。此外, 考虑到数据的可获得性, 本文仅选取部分土地利用碳排放影响因子进行机理探究, 后续研究可进一步探索数据获取与优化方法, 提高研究结果的精确性。

[参 考 文 献]

- [1] 刘雪莲, 晏娇. 中国参与全球气候治理面临的挑战及应对[J]. 社会科学战线, 2016(9): 171-177.
- [2] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
- [3] 卢露. 碳中和背景下完善我国碳排放核算体系的思考[J]. 西南金融, 2021(12): 15-27.
- [4] 易丹, 欧名豪, 郭杰, 等. 土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1545-1559.
- [5] 程豪. 碳排放怎么算:《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》[J]. 中国统计, 2014(11): 28-30.
- [6] 刘竹, 关大博, 魏伟. 中国二氧化碳碳排放数据核算[J]. 中国科学(地球科学), 2018, 48(7): 878-887.
- [7] ZHAO C, LIU Y, YAN Z. Effects of land-use change on carbon emission and its driving factors in Shanxi Province from 2000 to 2020[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023(30): 68313-68326.
- [8] 马忠玉, 肖宏伟. 基于卫星夜间灯光数据的中国分省碳排放时空模拟[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(9): 143-150.
- [9] 武娜, 沈镭, 钟帅. 基于夜间灯光数据的晋陕蒙能源消费碳排放时空格局[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(7): 1040-1050.
- [10] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3847-3856.
- [11] 吕倩, 刘海滨. 基于夜间灯光数据的黄河流域能源消费碳排放时空演变多尺度分析[J]. 经济地理, 2020, 40(12): 12-21.
- [12] 崔艺凡. 长三角城市群土地利用碳排放特征及其影响因素研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [13] WANG K, LI X, LYU X, et al. Optimizing the land use and land cover pattern to increase its contribution to carbon neutrality[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4751.
- [14] 李云燕, 张硕. 中国城市碳排放强度时空演变与影响因素的时空异质性[J]. 中国环境科学, 2023, 43(6): 3244-3254.

(下转第 457 页)

介质定位的综合性能,本文提出一种基于双线性插值亚像素坐标结合改进 RANSAC 算法的定位算法。首先,经过一系列预处理操作准确提取出绝缘介质区域;然后,用 Canny 算子提取边缘后选用最小外接矩形分离直线轮廓,以双线性插值提取高精度的亚像素坐标,并采用改进的 RANSAC 算法分别拟合直线;最后,根据 4 条直线方程计算出绝缘介质的中心点坐标和角度的偏移量,以实现精确定位。实验结果表明,本文算法兼具有一定的精度和时效性,满足实际工业生产的要求。

[参 考 文 献]

- [1] 丁凌,黄家才,陈田,等. 基于机器视觉的软包电池尺寸测量方法[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2021, 19(1): 1-6.
- [2] 寸毛毛,卢军. 基于改进 Hu 矩和矩形拟合的芯片识别定位算法[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 151-156.
- [3] 韩进宇. 基于视觉的卡钳毛刺检测和定位方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [4] 齐敏,牛贝乐. 三角环工业标志符快速高精度定位算法[J]. 数据采集与处理, 2021, 36(4): 789-798.
- [5] 黄超,茅健,徐斌,等. 基于最小外接矩形和 Hough 变换的定位算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(8): 66-71.
- [6] 吴云飞. 基于机器视觉的工件识别与定位方法研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2022.
- [7] 张伟. 基于机器视觉的大尺寸电视机背板的定位算法研究及应用[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [8] 李执,闫坤,傅琪,等. 基于机器视觉的金属工件尺寸测量[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 92-97.
- [9] 任永强,涂德,江韩暑. 基于机器视觉的柴油机缸套尺寸测量[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(9): 151-153.
- [10] SHO N G, ICHIRO Y, KAITO O, et al. Acceleration of surface roughness evaluation using RANSAC and least squares method for running-in wear process analysis of plateau surface[J]. Measurement, 2022, 203: 1-10.
- [11] 张丹,李长安,逯海滨,等. 基于轴线局部搜索的曲轴轴径视觉测量方法[J]. 机电工程, 2022(12): 1-8.
- [12] 刘阳,刘超,许宝卉. 视觉技术在圆孔识别定位中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2021(7): 108-111, 116.
- [13] 黄菁菁. 基于机器视觉的小型零件轮廓尺寸测量算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [14] 李建豹,黄贤金,揣小伟,等. 长三角地区碳排放效率时空特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1486-1496.
- [15] YAN H M, GUO X, ZHAO S Q, et al. Variation of net carbon emissions from land use change in the Beijing-Tianjin-Hebei region during 1990—2020[J]. Land, 2022, 11(7): 997.
- [16] ZHANG H, SUN X, WANG W. Study on the spatial and temporal differentiation and influencing factors of carbon emissions in Shandong province[J]. Nat Hazards, 2017, 87: 973-988.
- [17] 关敏捷,袁艳红,冉木希,等. 基于 STIRPAT 模型的山西省能源碳排放影响因素及峰值预测[J]. 中国煤炭, 2021, 47(9): 48-55.
- [18] 杨皓然,吴群. 基于系统 GMM 面板模型的土地利用碳排放效应研究: 以中国省际面板数据为例[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 541-549.
- [19] 胡孟然. 中国县域碳排放空间格局及影响因素研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [20] MA J J, GUO J Y, AHMAD S, et al. Constructing a new inter-calibration method for DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light[J]. Remote Sensing, 2020, 12(6): 937.
- [21] 全国国土资源标准化技术委员会. 土地利用现状分类: GB/T 21010—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 2-6.
- [22] 袁壮壮. 南昌市土地利用碳排放变化特征及低碳优化研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2021.
- [23] 苏雅丽,张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 152-156.
- [24] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804-812.
- [25] 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.
- [26] 石洪昕,穆兴民,张应龙,等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 101-106.
- [27] 孙赫,梁红梅,常学礼,等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. 经济地理, 2015, 35(3): 154-162.
- [28] 王雅晴,谭德明,张佳田,等. 我国城市发展与能源碳排放关系的面板数据分析[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7897-7907.
- [29] 苏泳娴,陈修治,叶玉瑶,等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1513-1526.
- [30] 施开放. 多尺度视角下的中国碳排放时空格局动态及影响因素研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [31] 王劲峰,徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [32] 安徽省人民政府. 安徽省人民政府办公厅关于印发安徽省 2014—2015 年节能减排低碳发展行动方案的通知[EB/OL]. (2014-12-09)[2023-12-03]. <https://www.ah.gov.cn/szf/zfgb/8128171.html>.

(责任编辑 胡亚敏)

(责任编辑 吴亮)

(上接第 440 页)