

DOI: 10.20103/j.stxb.202410092442

刘欣怡, 张正勇, 刘琳, 张明羽, 高煜, 曹宇, 张雪莹, 陈泓瑾, 余凤臣, 马柔. 成渝城市群县域碳平衡与人类活动强度的关联性. 生态学报, 2025, 45(11): 5246-5262.

Liu X Y, Zhang Z Y, Liu L, Zhang M Y, Gao Y, Cao Y, Zhang X Y, Chen H J, Yu F C, Ma R. County-based study on the correlation between carbon balance and human activity intensity in the Chengdu-Chongqing City Cluster. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5246-5262.

成渝城市群县域碳平衡与人类活动强度的关联性

刘欣怡¹, 张正勇^{1,*}, 刘琳¹, 张明羽², 高煜¹, 曹宇¹, 张雪莹³, 陈泓瑾⁴, 余凤臣¹, 马柔¹

1 石河子大学理学院, 石河子 832003

2 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510006

3 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

4 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299

摘要: 碳平衡可表征区域碳排放/碳吸收在数量或质量的匹配或协调状态, 人类活动以不同的方式和强度干预区域碳循环过程, 二者的关联性研究对于应对全球气候变化、践行区域“双碳”目标达成和制定区域生态补偿制度等均具有重要意义。研究在县域尺度下以成渝城市群为研究对象, 基于多源遥感数据和统计数据进行碳平衡与人类活动强度时空格局演变分析, 并借助双变量空间自相关以及地理探测器 (Geodetector) 探析研究区碳平衡与人类活动强度的关联性。结果表明: ①研究期内, 碳平衡压力指数 (CBPI) 高值区呈现“双 C”环抱式分布, 以成都和重庆为两极分别向东北-西南呈弧形延伸并逐渐衰减, 四川盆地西南缘为 CBPI 低值区; CBPI 具有明显空间异质性和聚集性, 各区县以碳盈余为主且 CBPI 多呈下降态势。②研究期内, 成渝城市群人类活动强度 (HAI) 显著增高 (21.2%/a), 由“双核心轴线圈层”城市群逐渐向“互联互通网络型”城市群演进。③成渝城市群 CBPI 与 HAI 存在着强空间正相关性, 并呈现较强的相似聚集特点。研究区空间平均相关系数约为 0.94, 其中乐至县 (0.98) 和大渡口区 (0.98) 最为显著, 双变量相关性系数为 0.675, 聚集类型主要以“低-低”聚集、“高-高”聚集为主。④成渝城市群碳平衡主导因子以人类活动类因子为主, 其中经济水平和人口密度是主导影响因素, NDVI 为自然类因子中的主要贡献因子。研究结果有助于成渝城市群实现“双碳”目标, 并对相关城市规划与发展提供理论借鉴和实践参考。

关键词: 碳平衡; 人类活动强度; 关联性; 地理探测器; 成渝城市群

County-based study on the correlation between carbon balance and human activity intensity in the Chengdu-Chongqing City Cluster

LIU Xinyi¹, ZHANG Zhengyong^{1,*}, LIU Lin¹, ZHANG Mingyu², GAO Yu¹, CAO Yu¹, ZHANG Xueying³, CHEN Hongjin⁴, YU Fengchen¹, MA Rou¹

1 College of Science, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2 School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

3 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

4 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China

Abstract: Carbon balance can signify the alignment or harmonization of regional carbon emissions and carbon absorption, both quantitatively and qualitatively. Human activities exert varying influences and varying degrees of impact on the regional carbon cycle. Investigating the correlation between these factors is crucial for addressing global climate change, realizing

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41781108)

收稿日期: 2024-10-09; 网络出版日期: 2025-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyz0815@163.com

regional ‘double carbon’ objectives, and devising regional ecological compensation mechanisms. This study takes the Chengdu-Chongqing city cluster as the research object at the county scale. Utilizing multi-source remote sensing and statistical data, this study analyzes the spatiotemporal evolution of carbon balance and the intensity of human activities, and examines the correlation between carbon balance and human activity intensity within the study area using bivariate spatial autocorrelation and the Geodetector method. The findings indicated that: ① Throughout the study period, regions with high carbon balance pressure index (CBPI) values displayed a ‘double C’ shaped distribution, centered around Chengdu and Chongqing, extending in a northeast-southwest direction and diminishing gradually, while the southwestern edge of the Sichuan Basin represented a low CBPI value area. CBPI has obvious spatial heterogeneity and aggregation, and each district and county is dominated by carbon surplus and CBPI is mostly declining. ② During the study period, the human activity intensity (HAI) of Chengdu-Chongqing city cluster increased significantly (21.2%/a), and gradually evolved from the “dual-core axis circle” city cluster to the “interconnected network” city cluster. ③ A robust positive spatial correlation exists between CBPI and HAI within the Chengdu-Chongqing city cluster. The bivariate correlation coefficient, at 0.675, suggests that both exhibit pronounced similar clustering patterns, predominantly ‘low-low’ and ‘high-high’ clusters. ④ The dominant factors of carbon balance in Chengdu-Chongqing city cluster are mainly human activities, among which economic level and population density are the dominant factors, and NDVI is the main contribution factor of natural factors. The research results are helpful for Chengdu-Chongqing city cluster to achieve the goal of “double carbon,” and provide theoretical reference and practical reference for relevant urban planning and development.

Key Words: carbon balance; human activity intensity; correlation; Geodetector; Chengdu-Chongqing City Cluster

碳平衡是区域碳排放和碳吸收在数量或质量上相抵或相等的状态,可用于表征碳源和碳汇在时空尺度的匹配或协调程度。全球气候变化是自然生态演化与人类社会发展的“博弈”结果,IPCC 报告亦表明近年来人类活动对气候变暖的影响越发显著^[1],而碳物质过度排放在该过程中扮演着重要角色。碳是连接自然和人类社会的关键元素之一,碳平衡水平可考量人与自然间的“碳”共生关系,对其内涵扩展和定量评估逐渐成为现阶段实现碳中和目标的热点议题^[2]。事实上,碳吸收与碳排放的时空不协调、不平衡关系研究,既是对区域碳平衡压力时空格局和演变规律等的理论探究,也是区域或城市社会经济和生态环境中长期发展规划的决策依据,碳平衡的研究及其加入相关国土空间规划内容具有重要理论和实践意义^[3-4]。“郡县治、天下安”,县域作为我国减碳增汇的关键空间单元和基层治理组织^[5],是研究碳平衡时空演变和低碳发展策略的理想尺度。如何科学有效探究城市群县域碳平衡空间异质性及其与人类活动强度的时空关联性,对践行区域内“双碳”目标达成和区域间“共享、共建、共治”的生态补偿制度等均具有重要意义。

碳平衡压力指数是碳排放量与碳吸收量间的关系数值。碳排放包括将 CO₂ 释放到大气中的任何过程或活动,碳排放水平在国际上有多种评估方式^[6-8]和核算体系^[9],其中,碳排放量是最为便捷也是应用范围最广的评估方式,被广泛应用于不同尺度下各行业的减排措施与对策制定^[10]。碳吸收则包括海洋碳汇和陆地碳汇,其中,海洋碳汇较为稳定,而陆地碳汇受人类活动影响使其空间异质性明显。过去几十年陆地生态系统碳汇显著抵消了部分人类活动导致的碳排放,成为“碳中和”目标中各界共同关注的焦点^[11]。当前碳汇的估算方式多样^[12-13],其中遥感估算法适用于城市、区域等大尺度的碳汇估算,通常结合归一化植被指数(NDVI)^[14]、植被净初级生产力(NPP)^[15]等数据进行线性模拟,同时 Wei 等^[16]研究发现碳汇效益与 NPP 呈正相关,对于探究全球气候变化规律和碳平衡机制等具有重要意义。需要指出的是,目前的碳平衡相关研究大多仅关注区域碳排放或碳吸收的数量或能力等单一主题,本研究则着眼于完整的碳闭环,同时兼顾“收”和“支”的时空匹配度;且现有研究多使用单一的“区域化”面板数据或“像元化”的栅格数据评估碳排放和碳吸收,本研究将两者融合则有助于实现碳平衡的行政区域整体性和自然单元差异性的有机结合,从整体-细部、区域间-区域内等多维度揭示碳排放和碳吸收的时空分异规律,可为生态文明建设和经济社会发展规划等

提供理论依据。

碳平衡形成及演变过程机制复杂,而其与人类活动强度的时空关联性是探究人地关系-碳“博弈”过程的关键切入点^[17]。当前碳平衡相关研究多通过探讨新型城镇化^[10]、土地利用程度^[18]等对其平衡能力的影响,进而为基于碳平衡的生态补偿量化^[19]、土地利用结构优化^[20]和国土空间规划^[4]等研究提供依据,但大多都仅从人类行为的某种方式或结果等视角进行研究。而人类活动强度是表达各种人类社会经济活动对自然状态下的区域产生影响的综合指标^[21],能更综合考量碳平衡与人类活动的相关性及其影响机制。碳平衡具有显著的时空差异性和区域特征^[22],大多学者认为土地利用方式的改变是其主要影响因素。但人类活动对土地的开发利用既可成为碳源,也可成为碳汇^[23],例如人类活动导致的土地开发和农地利用集约化等导致的碳排放增加,即为碳源,而植树造林和湿地恢复等活动则能增加生态系统的碳固存能力,则为碳汇,这样看来,仅靠单一土地利用数据难以表征多元、复杂和综合的人类活动^[24],无法明确区分土地利用是碳源还是碳汇的贡献。人口集聚意味着生产要素向城镇地区集中,以及由此引致的产业集聚、经济集聚势必对能源消耗和温室气体排放产生重要影响^[25]。同时,人为干扰亦始终存在于道路建设和扩展中,道路网络作为典型的人为干扰方式^[26],直接或间接地影响着碳汇与碳排。近年来研究学者亦发现夜间灯光数据与能源消费的碳排放、城市扩张等具有较高的相关关系^[27],可作为评估碳平衡的重要因子。事实上,区域碳平衡程度是人类活动释碳和绿色植被固碳的综合结果,其中,绿植的固碳能力直接受制于水热、地形、土壤等立地条件,而不同形式的人类活动碳排放强度结果与响应均存在差异^[28]。那么人类活动强度和碳平衡是否存在相关性?单因子在碳平衡格局中贡献度如何?因子组合的交互作用是增强还是减弱?以上问题的探究,有利于从人文社会和自然环境双视角更全面揭示区域碳平衡的驱动机制。

成渝城市群作为新兴城市群,其内部发展的集聚性与不均衡性导致该地区的降碳减排问题十分突出,国家对该区域的绿色发展高度重视,进行碳平衡探究有助于该区域社会经济与生态环境可持续发展的良性发展。为此,本研究以成渝城市群为研究对象,以县域为研究单元,融合多源数据分析碳平衡与人类活动强度时空演变及其关联性,并结合人文与自然类因子全面探究研究区碳平衡成因过程和驱动机制,以期为区域城市群实现“双碳”目标和相关城市规划与发展提供理论借鉴和实践参考。

1 研究区概况

成渝城市群是以成都、重庆两大城市为中心发展的双核心都市圈,位于四川盆地的核心地带^[29],地理范围在 27°39′—33°02′N,101°56′—110°12′E 之间,主体区域包括四川省内的成都、自贡、泸州、德阳等 15 个市下辖的 113 个区县,以及重庆市下辖的渝中、万州大渡口、江北等 29 个区县^[30](图 1)。研究区内地形起伏较大,周围由植被覆盖度较高的低山、丘陵等环绕,东北部分布的川东平行岭谷为我国最典型的褶皱山区,人口密集和产业集群的城市核心圈和拓展圈位于中部平原。受自然条件影响,成渝城市群人类活动空间和原生态环境空间较其他区域相对独立,使其成为开展人类活动排放碳与自然环境吸收碳及二者关系的绝佳地理空间。同时,该区域处于全国“两横三纵”城市化战略格局沿长江通道横轴和包昆通道纵轴的交汇地带,担负着全国“第四极”的使命^[31],是全国重要的城镇化区域,具有承东启西、连接南北的区位优势。由于石柱土家族自治县与彭水苗族土家族自治县数据缺失,故本研究就其余 141 个区县进行分析。

2 数据来源、处理与方法

2.1 数据来源及预处理

本研究采用的数据包括多源遥感数据和社会经济统计数据等(表 1),时间节点为 2010 年、2015 年以及 2019 年。各类数据的用途、来源及预处理过程具体如下:

首先是碳平衡压力指数估算所需的能源排放数据和 NPP 数据,前者来源于中国碳核算数据库(CEADs),该数据采用粒子群优化-反向传播(PSO-BP)算法统一了 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 卫星图像的规模,估算了

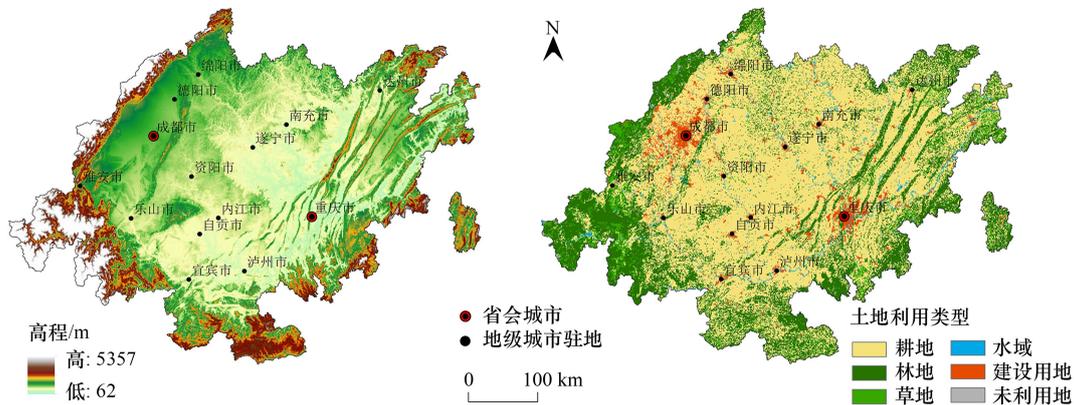


图1 研究区概况图

Fig.1 Overview of study area

1997—2017 年中国 2735 个县的 CO_2 排放量, 2019 年缺失数据采用相邻年份移动平均法和线性插值法^[32] 进行插值; NPP 数据采用数值地球动力学模拟组 (NTSG) 提供的 MOD17A3HGF V6 年度数据。其次, 人类活动强度水平测度所需的社会经济数据和地理信息数据主要来源于各省、市统计年鉴与统计公报。以上遥感数据均利用 ArcGIS 进行重投影至通用横轴墨卡托 (UTM) 后进行裁剪等统一预处理。

相关研究显示, 区域碳排放多与人类活动方式和强度直接相关, 而碳吸收能力与如植被、气温等自然条件的关系更为直接, 为进一步探讨碳平衡时空演变过程与机制, 本研究加入了 NDVI、地形和气候等自然条件因子 (表 1), 利用地理探测器全面识别人类活动和自然条件等驱动因子对研究区碳平衡的作用强度。

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

一级指标 First index	二级指标 Second index	指标说明 Index description	空间分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data sources
碳平衡压力指数 Carbon balance pressure index	碳排放 Carbon emission	县域 CO_2 排放量	/	中国碳核算数据库 (CEADs)
	碳吸收 Carbon absorption	区域植被碳固存量	500m	数值地球动力学模拟组 (www.ntsg.umd.edu)
人类活动强度因子 Human activity intensity factors	产业结构 (X1)	第二产业比重	/	各地县域统计年鉴
	经济水平 (X2)	地区 GDP/区域面积	/	各地县域统计年鉴
	人口密度 (X3)	地区年末总人口数/区域面积	1km	各地县域统计年鉴、WorldPop
	道路密度 (X4)	区域道路总长度/总面积	/	OpenStreetMap, SEDAC
	夜间灯光 (X5)	监测人口和社会经济动态	500m	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/data/)
自然条件因子 Natural conditions factor	NDVI (X6)	地表植被覆盖度	1km	中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/)
	坡度 (X7)	地表起伏、隆起程度	30m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)
	高程 (X8)	地表起伏、隆起程度	30m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)
	降水 (X9)	影响植被生长的水热条件	1km	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/data/)
	气温 (X10)	影响植被生长的水热条件	1km	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/data/)

2.2 研究方法

2.2.1 碳平衡压力指数

碳平衡能力指区域实现碳吸收与碳排放中和的水平, 主要表征碳吸收与碳排放之间的差距。本研究基于县域年碳排放量和植被碳固存水平, 以碳平衡压力指数 (CBPI) 量化区域的碳平衡能力^[33]:

$$\text{CBPI} = A_i / F_i \quad (1)$$

式中, A_i 代表 i 地某年县域 CO_2 排放量; F_i 代表 i 地某年植被碳固存量。

NPP 作为地表碳循环的重要组成部分, 在全球变化及碳平衡中扮演着重要的作用^[34]。其不仅直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力, 而且是判定生态系统碳源/汇和调节生态过程的主要因子。相关研究认为, 单位植物干物质包含约 45% 的碳, 可吸收约 1.62 单位的 CO_2 ^[10], 故 F_i 可表示为:

$$F_i = \frac{\text{NPP}_i \times S_i \times 1.62}{0.45} \quad (2)$$

式中, NPP_i 代表 i 地的单位面积植被净初级生产力; S_i 代表 i 地区域面积。

参考李咏华等^[10]的文献, 将研究区碳平衡压力指数 (CBPI) 进行划分: 碳盈余区或碳平衡区, $\text{CBPI} \leq 1$; 弱碳赤字区, $1 < \text{CBPI} \leq 3$; 强碳赤字区, $\text{CBPI} > 3$ 。

2.2.2 人类活动强度综合指数构建

人类活动强度的定量化和空间化是研究人类活动对碳平衡影响的基础。参考 Ehrlich 提出的 IPAT (环境负荷-人口-富裕-技术) 理论^[35], 结合研究区实际情况, 本研究选取相应指标构建人类活动强度综合指数, 并参考黄孟勤等^[36]对相应指标进行量化。产业结构是人类经济活动和生态环境的重要连接体^[37], 而研究区影响碳排放与人类活动相关的产业主要为以工业为主的第二产业, 因此本研究选用第二产业占比表征产业结构; 经济水平的提高是人类活动的主要目的, 也是人类活动的主要结果^[38]; GDP 是度量区域人类宏观经济活动结果与产出的重要指标之一, 因此用其表征经济水平; 人口密度可表征区域人口集聚状态, 是人类活动强度最直观反映; 道路是人类活动过程的纽带, 是影响人类活动强度的重要指标, 可表征人类活动在区域内的可达性和便利性; 夜间灯光可以及时、有效地获取区域内的人类活动时空动态信息, 因而广泛应用于人类活动研究^[39]。综上, 本研究最终选取人口密度、经济水平、夜间灯光、产业结构、道路密度等 5 个因子, 并结合熵权法和综合指数法构建人类活动强度综合指数。

(1) 熵权法

熵权法是一种客观的赋权方法, 利用各指标的熵值所提供的信息量的大小来决定指标权重^[40], 具体计算步骤如下:

①数据标准化处理。采用极差法对指标数据进行标准化处理。

$$x_{\lambda ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j) \quad (3)$$

式中, $x_{\lambda ij}$ 表示标准化后的指标值; $\max x_j$ 和 $\min x_j$ 表示第 j 个指标中所有评价样本的最大值和最小值。

②计算熵值。计算第 j 项指标所有指标所占的比重 $p_{\lambda ij}$, 并计算各项指标熵值 e_j , 公式如下:

$$p_{\lambda ij} = x_{\lambda ij} / \sum_{\lambda=1}^h \sum_{i=1}^m \quad (4)$$

$$e_j = -k \sum_{\lambda=1}^h \sum_{i=1}^m p_{\lambda ij} \ln p_{\lambda ij} \quad (5)$$

式中, $k = 1 / \ln(h \times m)$; 当 $p_{\lambda ij} = 0$ 时, $p_{\lambda ij} \times \ln p_{\lambda ij} = 0$ 。

③计算权重。计算各项指标的权重 w_j ($w_j \in [0, 1]$), 公式如下:

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (6)$$

表 2 人类活动强度因子权重

Table 2 Weighting of human activity intensity factors

因子 Factor	人口密度 Population density	经济水平 Economic level	夜间灯光 Nighttime light	产业结构 Industrial structure	道路密度 Road density
权重 Weight	0.25	0.22	0.20	0.15	0.18

(2) 综合指数法

综合指数法可反映不同因子重要程度的区别^[41]。本研究将其与因子权重 (表 2) 结合, 共同测度研究区内人类活动强度。计算公式如下:

$$\text{HAI} = \sum_{i=1}^n (X_i \times W_i) \quad (7)$$

式中, HAI 表示人类活动强度, X_i 表示第 i 个指标归一化值 (n 为指标个数), W_i 表示第 i 个指标的权重。

2.2.3 局部双变量空间自相关

空间自相关反映空间单元上某种属性值与相邻单元上同一属性值的相关程度, 是空间域中集聚程度的一种度量^[42]。其中, 局部区域自相关能计算分析空间对象分布中所存在的局部特征差异, 并进一步揭示研究区域内邻近空间单元观测值间的相似性或异质性^[43], 其分析结果一般分为高-高 (HH)、高-低 (HL)、低-低 (LL) 和低-高 (LH) 集聚 4 种类型。

$$I_{ch}^i = P_c^i \times \sum_{j=1}^n W_{ij} \times P_h^j \quad (8)$$

$$P_c^i = \frac{X_c^i - \bar{X}_c}{\sigma_c}, P_h^j = \frac{X_h^j - \bar{X}_h}{\sigma_h} \quad (9)$$

式中, I_{ch} 为分析碳平衡 c (CBPI) 和人类活动强度 h (HAI) 的双变量全局自相关系数; X_c^i 是属性 c 位于空间单元 i 的值; X_h^j 是属性 h 位于空间单元 j 的值; \bar{X}_c 、 \bar{X}_h 分别为属性 c 、 h 的平均值; σ_c 、 σ_h 为方差; W_{ij} 表示空间权重矩阵。

2.2.4 相关系数法

相关分析是度量两个变量之间的关系密切程度的统计学方法, 通过计算年均 CBPI 与 HAI 之间的相关系数, 能够有效反映变量间关联的密切程度, 公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} \quad (10)$$

式中, R 为相关系数, 取值区间为 $[-1, 1]$; n 为年份数; x_i 为碳平衡, y_i 为人类活动强度。本文按照 $0 \leq R \leq 0.6$ 、 $0.6 < R \leq 0.8$ 、 $0.8 < R \leq 0.9$ 、 $0.9 < R \leq 1$ 将相关系数分为弱正相关、较弱正相关、较强正相关、强正相关 4 个等级。

2.2.5 地理探测器

地理探测器能够表征地理事物的空间异质性, 亦可客观反映出各地理综合体中各要素影响的优先级。在全球变化和低碳发展的背景下, 碳平衡格局及其变化是自“自然-社会”交叉作用的结果^[44], 因此其影响因素大致可归为自然、人为两方面。参考现有研究^[45-46], 自然因素主要包括气候、地形、植被等, 人为因素则通过用于前文构建人类活动强度的相关因子进行表征。综上, 本研究构建了包括自然条件因子与人类活动强度两大类一级指标及其对应的 10 个二级因子的指标体系, 探究成渝城市群碳平衡空间分异的成因规律。公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (11)$$

式中, q 表示因子对碳平衡空间异质性的解释力, 值越大解释能力越强; L 表示变量分层; N_i 和 N 分别为层和全区的单元数; σ_i^2 和 σ^2 分别是层 i 和全区的方差。

3 结果分析

3.1 成渝城市群县域碳平衡时空格局特征

3.1.1 碳平衡时空格局特征分析

2010—2019 年间, 成渝城市群各区县以碳盈余为主, CBPI 高值区沿成德绵乐城市带和沿江城市带呈现“双 C”环抱式分布, 以成都和重庆为两极分别向东北-西南呈弧形延伸并逐渐衰减, 遂宁市船山区和达州市通川区为高值飞地。碳赤字区县逐年减少, 低值区多位于四川盆地西南缘凉山生态屏障区和北部米仓山-大巴

山生态屏障区附近区县。

研究期内,除少数区县如安岳县、兰溪区等 10 个区县 CBPI 呈现上升趋势(7.1%),研究区整体呈降低态势(92.9%),CBPI 高值区由成都和重庆“两极”中心区降低的趋势尤为显著,而增高区域仅零星分布于各区县建成区,其中以重庆市江北区($2.46a^{-1}$)和成都市成华区($-4.17a^{-1}$)为最(图 2)。此外,研究期部分区县 CBPI 出现大幅波动,如成都市武侯区 CBPI 减少 10.7 且期间出现先升后降的强烈波动;而重庆市江北区、南岸区和大渡口区则先降后升。值得注意的是,地形起伏显著影响研究区区域发展和宜居性,如川东平行岭谷地表褶皱紧密,CBPI 变化呈现出几乎一致的结构特征,主要原因是随着社会经济发展和交通的便利,自然地理条件带来的限制减弱,人类活动的范围扩大且方式得到改善。

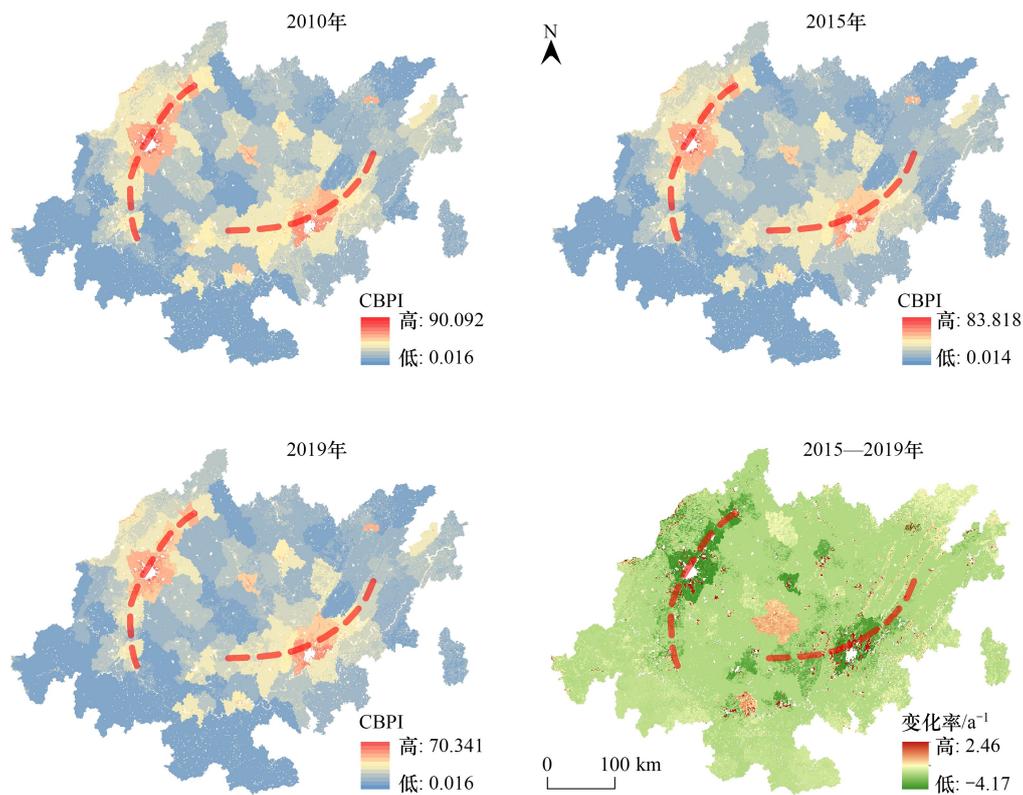


图 2 2010—2019 年成渝城市群 CBPI 时空格局及变化率

Fig.2 Spatio-temporal pattern and rate of change of CBPI in Chengdu-Chongqing City Cluster from 2010 to 2019

CBPI: 碳平衡压力指数 Carbon balance pressure index

成渝城市群各县域的碳平衡起始态和变化态不尽相同,对其进行聚类分析有助于进一步探究不同县域的演变趋势。采用自然断点以 2010 年 CBPI 为起始态结合其变化率进行分类,将各区县碳平衡变化态分为六类(表 3)。统计发现,低起点区域的县域占比 82.3%,且以低起点缓慢降低(39.7%)和低起点快速降低(38.3%)为主。高起点快降低仅 5 个区县,分别为成都市中心城区的青羊区、武侯区、金牛区、成华区和锦江区,共同构成成都市的核心碳赤字区域,是城市发展的增长极,亦是生态赤字重点区域,需重点采取碳减排措施。安岳县 CBPI 明显持续上升,作为“成渝之心”和连接成渝的交通枢纽物流要塞,随着国家政策扶持和城市群互助发展,集聚经济效应愈发显著导致其 CBPI 持续上升。

总之,研究期内成渝城市群各县域 CBPI 值多呈现降低趋势,以低起点缓慢降低和低起点快速降低为主,CBPI 变化率的高值主要出现在腹地东、西部成渝市中心区及其安岳县,整体呈现“东西高,四周低”的分布格局。

表 3 CBPI 分类依据及个数
Table 3 Classification basis and number of CBPI

一级分类 First classification	二级分类 Second classification	分类说明 Classification description	个数(占比) Number (proportion)
低起点 Low-point	快速降低	$Q_{CBPI}(0-3.5); S_{CBPI}(-0.36--0.14)$	54(38.3%)
	缓慢降低	$Q_{CBPI}(0-3.5); S_{CBPI}(-0.14-0)$	56(39.7%)
	持续升高	$Q_{CBPI}(0-3.5); S_{CBPI}(0-0.60)$	6(4.3%)
中起点 Mid-point	较快降低	$Q_{CBPI}(3.5-17.6); S_{CBPI}(-0.36--0.14)$	11(7.8%)
	缓慢降低	$Q_{CBPI}(3.5-17.6); S_{CBPI}(-0.14-0)$	9(6.4%)
高起点 High-point	快速降低	$Q_{CBPI}(17.6-46.5); S_{CBPI}(-0.36-0.14)$	5(3.5%)

Q_{CBPI} :CBPI 起始值; S_{CBPI} :CBPI 变化率

3.1.2 碳平衡细部格局特征分析

成渝城市群碳平衡格局存在明显空间异质性和聚集性。为进一步明晰成渝城市群碳平衡高值空间格局的细部特征,以 2019 年碳平衡空间格局为例进行细部特征分析发现,研究区 CBPI 虽具显著空间异质性,但主要呈现点状、带状的组团式聚集空间分布规律。研究区内主要存在五个重点高值区域(图 3),西部的成都市和东部的重庆市主城区的区县呈“带状”由中心向外散开分布不同程度的高赤字区域,中北部船山区、顺庆区和高坪区以及中南部内江市中心市区、翠屏区、江阳区和龙马潭区的三个“点状”突出区域形成三角高值区,东北部的通川区和开州区形成两个“点状”分布的高赤字区域,这与 2016 年《成渝城市群规划》的空间发展格局一致。此外,成渝城市群地形条件复杂,边缘地区广布山地,区域内山水交横,地势高低起伏,地形条件对人类活动痕迹和自然环境格局起着基础控制作用,进而影响着成渝城市群碳平衡格局形成“东西平原高,四周山地低”的分布格局。综上表明,研究区碳平衡的空间格局变化同时受到多重因素的综合作用,此外,以成都市和重庆市中心城区为核心的区县及其周边地区具有较为突出的圈层结构特征,值得进一步研究。

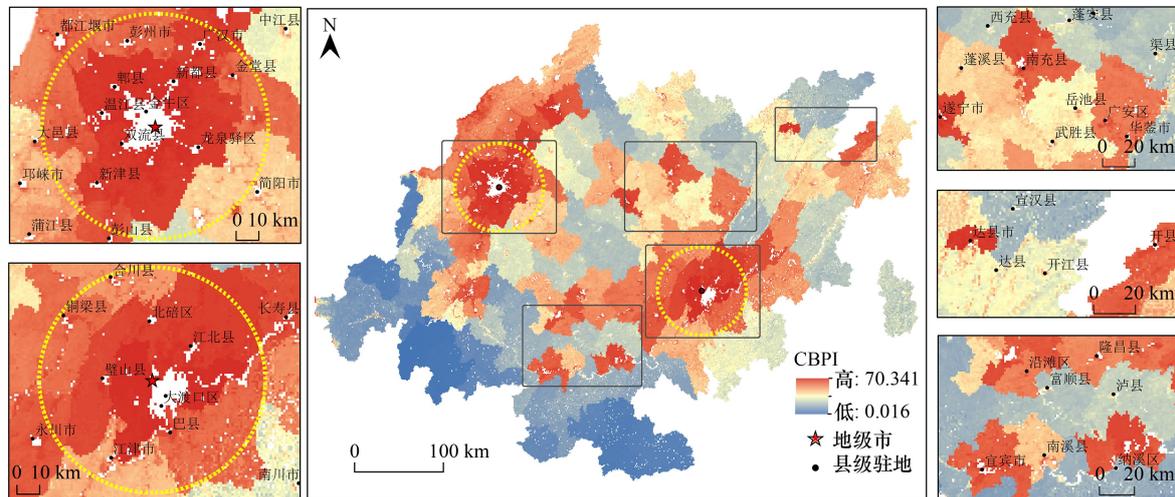


图 3 2019 年成渝城市群碳平衡局部空间格局

Fig.3 Local spatial patterns of carbon balance in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration in 2019

在城市发展过程中,“中心-外围”二元空间特征日渐突出,为进一步分析成渝城市群的内层结构变化,分别将成都与重庆市中心定为圆心,进行横、纵向剖面分析。CBPI 值显著的“两边低,中间高”的数据呈现进一步验证成都市和重庆市具有较为显著的圈层结构和圈层效应(图 4)。从两市纵向剖图来看,成都市数据的收敛性与集中性略强于重庆市,且纵向最高值区间位于金牛区与青羊区边界,变化率最高值点(5.23)位于温江区,而重庆市高值分布区较零散,纵向最高值区间在九龙坡区域内,值得注意的是,沙坪坝区与南岸区的变化

趋势最为显著,与最高值点的距离大致相等,分别为 25.7km 和 25.6km,这表明重庆市中心对周边地区的辐射效应具有较高的均衡性。从横向剖面来看,成都市的收敛性强于重庆市,其拟合最高值点位于青羊区,横向上升(5.23)和下降(-0.78)变化率最高的区域位于崇州市与青羊区,分别距离最高值点 27.5km 与 36.8km;重庆市横向最高值区间位于江北区和渝北区域交界处,变化率上升(3.44)和下降(-0.77)的最高值均位于最高值右侧的北碚区与合川区分界处。研究区两市主城区均为 CBPI 高值区,碳平衡状态呈现强赤字,主要是由于中心处建设、居住用地为主,植被覆盖较低,碳平衡指数高,导致整体呈现从中心向外延伸,且数值随距中心距离递增而递减的圈层结构。其中,重庆市直辖后主城九区协同发展,且受地形、水域和产业结构影响,各个区域发展程度不同,使其中心的高值集中但波动不一。

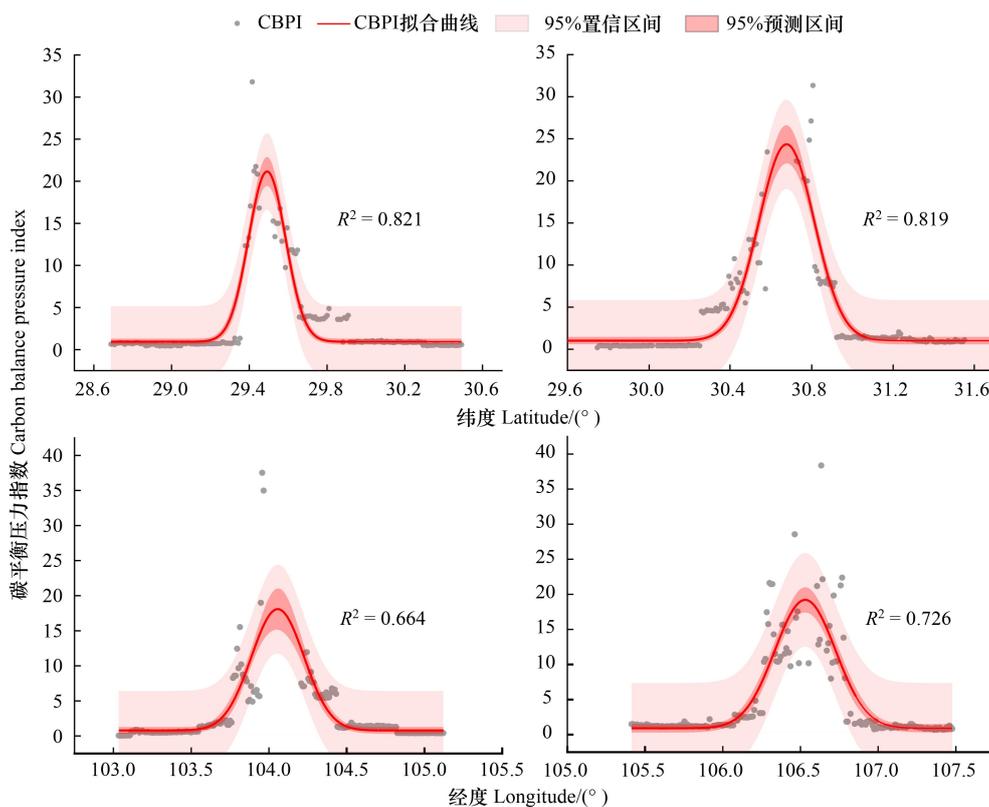


图 4 成都、重庆市地级市 CBPI 中心横、纵向剖面图

Fig.4 Horizontal and longitudinal CBPI profiles of the city centers of Chengdu and Chongqing

区域内的要素流动和要素组合变化会直接或间接地影响碳排放与碳吸收,而碳平衡转移恰恰反映了这种流动和组合的过程。能源消耗导致的碳排放量多表现为“先快速增长,然后平稳增长”,自然本底条件的不同又会导致碳汇能力呈现明显的区域异质性,因而各城市群碳平衡由于其产业结构、经济发展水平与资源禀赋等不同而呈现出格局差异。如长三角城市群受产业结构影响碳平衡自北向南呈现“低-高-低”的空间格局^[10];京津冀城市群经济发展水平高,却导致碳平衡呈现严重的赤字状态^[47];成渝城市群则因其区位和自然条件有着鲜明的双核特点。总的来说,成渝城市群碳平衡格局存在明显空间异质性和聚集性,在五个突出高值区主要呈点状、带状的组团式聚集空间分布,其中以重庆和成都市为中心向外具有明显的圈层结构。

3.2 成渝城市群县域人类活动强度时空格局分析

2010—2019 年间,成渝城市群人类活动强度显著增高(21.2%/a),以成都和重庆为“双核”、沿东北-西南轴线扩散衰减的“双核轴线圈层”城市群逐渐向网络型城市群演进(图 5)。作为西南重点发展城市群,在人口、资源等快速涌入和交通网络日益发达的推动下,以成都、重庆两市主城区为核心“增长极”,以泸州、宜宾、

内江、南充等市辖区县为轴点,人类活动强度逐年递增,极化与扩散效益并存,并逐渐以交通网络为纽带形成城市网络。HAI 高值区域主要分布在经济发达,人口密集在成都、重庆这两个“增长极”,其变化也遵循极化-涓滴效应,较高值以及中间值区围绕“双核地区”集中分布于中部平原地区。研究区外围地区多为山地,如西南部的雅安市、乐山市,居民定居和发展的适宜性较差,人类活动减弱,各区县 HAI 以较低值、低值区为主。变化率显著的西北部绵阳市涪城区与中南部翠屏区、龙马潭区、江阳区 and 自流井区以及近东北部的船山区、顺庆区和广安区在快速城镇化的过程中人类活动强度集聚。该研究结果与武燕等提出的“HAI 高强度区主要分布在经济发达,人口密集在成都、重庆“双核地区”,城市外围地区则以较低强度、低强度区为主,空间变化显著”较为一致^[48]。事实上,随着道路通达性的不断增强,人类活动强度空间分布因道路增密而形成破碎化格局^[49],区域与区域之间联系愈发紧密,推动“多中心、多层次、多节点”的网络型城市空间格局形成,与此同时人类活动亦不断扩展蔓延。另值得注意的是,研究期内以西部成都市为中心的县域主要沿南北向纵向发展,东部重庆市为中心的县域主要沿东西向横向发展,人类活动强度与碳平衡在时空演变上分布得较为一致。

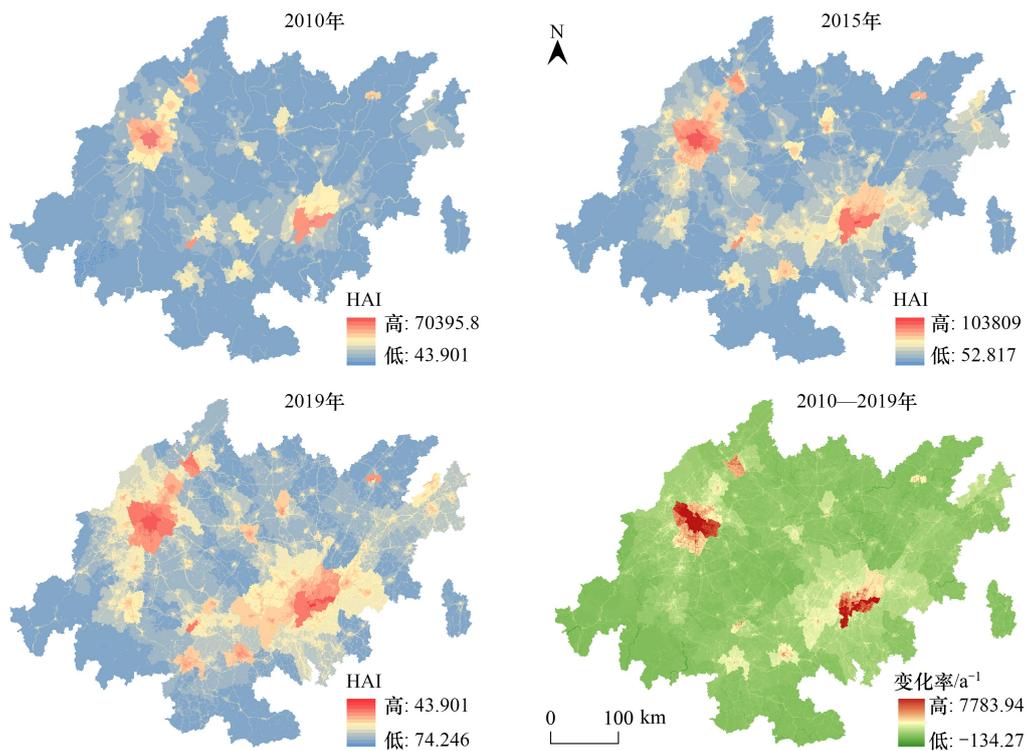


图5 2010—2019年成渝城市群 HAI 变化率

Fig.5 Change rate of HAI in the Chengdu-Chongqing City Cluster from 2010 to 2019

HAI: 人类活动强度 Human activity intensity

人类活动强度的变化趋势是一个多维度、多层次的过程,为了更有效地县域行政单元生态管控提供参考,通过自然断点法以 2010—2019 年 HAI 的起始值与变化率为依据进行分类(表 4)与分析。统计发现,研究期内成渝城市群 141 个县域人类活动强度均呈增强状态,多以低起点(84.4%)、缓慢增强(73.8%)为主,其中低起点缓慢增强类(63.1%)占大多数,低起点显著增强(21.3%)次之,中起点(11.4%)和高起点(4.2%)区域占比较少,主要集中在东西部的重庆市中心、此外在涪城区、通川区以及自流井区零散分布。值得注意的是,唯一处于高起点显著增强的武侯区,其 2010 年的人类活动强度远不如最高的渝中区或者周围的锦江区、金牛区,但其人类活动强度近几年迅速增强,从“2020 中国夜经济繁荣百佳县市”榜单不难看出,从经济领域“轻骑兵”的文旅消费,到逐渐成为夜经济的“主力军”,武侯区不断释放内需潜力,推动经济转型,人类活动持续增强。

表 4 HAI 分类依据及数量统计

Table 4 Classification basis and number of HAI

一级分类 First classification	二级分类 Second classification	分类说明 Classification description	个数(占比) Number (proportion)
低起点 Low-point	缓慢增强	$Q_{HAI}(50-2000); S_{HAI}(0.20-1.33)$	89(63.1%)
	显著增强	$Q_{HAI}(50-2000); S_{HAI}(1.33-3.10)$	30(21.3%)
中起点 Mid-point	缓慢增强	$Q_{HAI}(2000-7500); S_{HAI}(0.20-1.33)$	10(7.1%)
	显著增强	$Q_{HAI}(2000-7500); S_{HAI}(1.33-3.10)$	6(4.3%)
高起点 High-point	缓慢增强	$Q_{HAI}(7500-70500); S_{HAI}(0.20-1.33)$	5(3.5%)
	显著增强	$Q_{HAI}(7500-70500); S_{HAI}(1.33-3.10)$	1(0.7%)

Q_{HAI} : HAI 起始值; S_{HAI} : HAI 变化率

总之,研究区人类活动强度不断增强且对周边地区的辐射影响范围不断扩张,HAI 值域空间分布明显,核心区域变化显著,多为低起点缓慢增长区域且相应突出地区与地区发展规划相符,相关的政府政策规划的提出亦对区域人类活动的扩展具有一定推进作用。

3.3 成渝城市群碳平衡与人类活动强度关联性分析

3.3.1 碳平衡与人类活动强度相关性分析

区域碳平衡的格局和状态在很大程度上取决于人类活动的方式和强度,为了进一步揭示碳平衡与人类活动强度之间的关系,有必要对二者进行相关性分析。为此,本研究以 2019 年的 CBPI 和 HAI 空间数据为例统计分析二者的相关性并使用 Geoda 进行双变量空间自相关分析。

经相关分析发现,成渝城市群 CBPI 与 HAI 相关系数介于 0.58 至 1 之间,空间平均相关系数约为 0.94,整体呈现强正相关(图 6)。研究区有 99.4% 的区域呈较强和强正相关性,其中乐至县(0.98)和大渡口区(0.98)最为显著,合川区(0.85)和武侯区(0.80)两区整体相关性最弱亦呈现较强正相关,说明研究区 CBPI 和 HAI 相关性极强。基于双变量自相关分析发现二者 Moran's I 为 0.675,呈现较强的相似聚集特征。此外,LISA 聚集结果主要以“低-低”聚集、“高-高”聚集为主,其中 18 个县域表现为显著“低-低”聚集、13 个县域表现为显著“高-高”聚集,仅有通川县表现为“高-低”聚集。

成都和重庆这两个核心区“高-高”聚集的特征最为显著,尤其以其地级市周边的核心区域为主,如重庆市的沙坪坝区、九龙坡区,成都市的金牛区、青羊区、成华区等区域 HAI 与 CBPI 均为高值。成都和重庆是成渝城市群经济、交通、文化和信息流动的枢纽,高密度人口进行的人类活动带来强烈的经济发展,快速城市化加剧了能源需求和排放水平,同时也影响了自然植被和土地利用的变化,从而对碳平衡产生影响。人类活动直接或间接影响了碳排放和碳吸收的能力,同时区域植被覆盖等自然因子受其影响也发生变化,进一步影响碳平衡状态。显著“低-低”聚集区主要位于研究区西南部山区,北部的部分县域(盐亭、射洪、仪陇县、渠县和雁江区)也表现为“低-低”聚集。其中,汉源县、马边自治县、珙县和叙永县的“低-低”聚集特征最为显著,主要是由于这些区域位于成渝城市群的西南边缘地带,受到山区地形地貌的限制,交通不便,经济发展相对滞后,人类活动的空间分布不够集聚,导致经济活动较少,此外,区域土地利用类型以林地和草地为主,气候垂直变化不利于人居生活且植被覆盖高,碳固存量高,导致人类活动和碳平衡的呈现“低-低”聚集。北部部分县域海拔虽低于西南边缘地区,但这些县域以农业活动为主,仅有少数工业化程度较高的区域,而农业活动碳排放相对较少,因此碳平衡与人类活动的相关性也较低。雁江区虽然位于“高-高”聚集区的成都市的外围,但呈现出显著的“低-低”聚集特征,说明碳平衡与人类活动之间存在着人为与自然多重作用使其变化,其影响机制是一个复杂的变化过程。

3.3.2 碳平衡格局对人类活动及自然条件的综合响应

空间自相关仅能说明成渝城市群 CBPI 和 HAI 二者空间的一致性和匹配度,地形和气候等自然要素又通过影响人类活动和植被覆盖进而影响着碳平衡过程和状态,为此需要进一步探究自然条件对碳平衡能力的贡献,以更好识别碳平衡的作用机制和演变规律。因此,本研究除了考虑前文人类活动相关影响因子,在探究

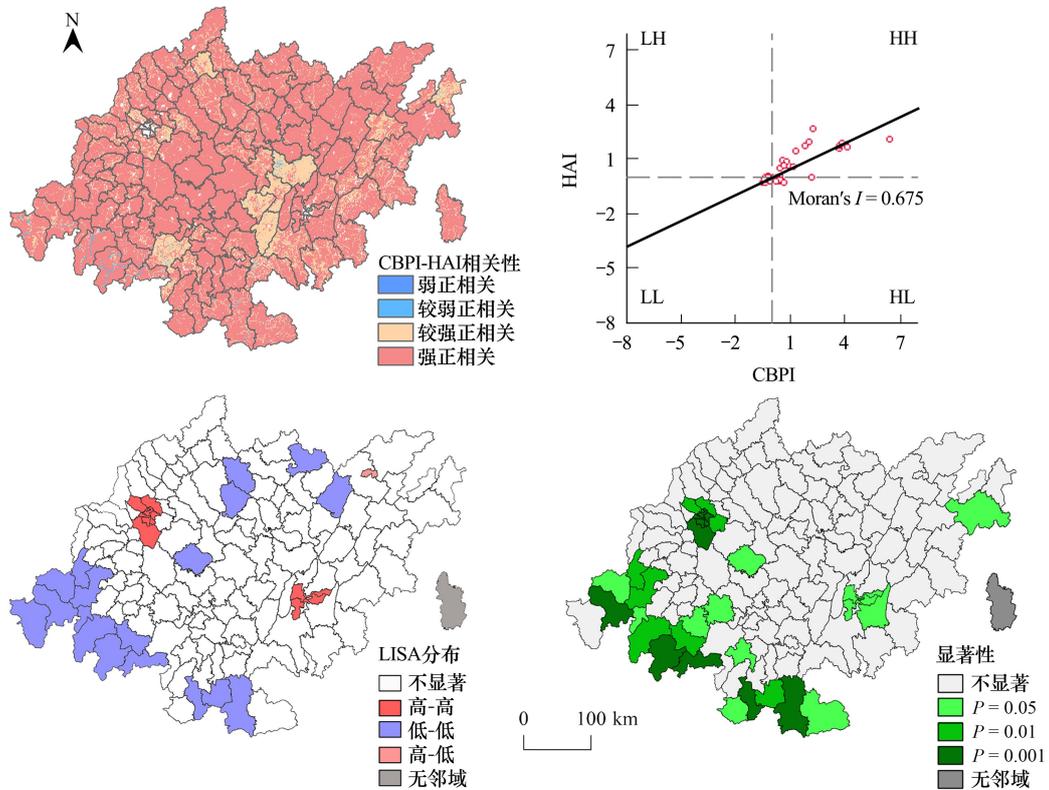


图 6 CBPI 和 HAI 相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between CBPI and HAI

LH: 低-高聚集; HH: 高-高聚集; HL: 高-低聚集; LL: 低-低聚集; LISA: 局部莫兰指数 Local Indicators of Spatial Association

HAI 各驱动因子影响力的同时加入坡度、高程、气温、降水、NDVI 五个自然类因子,共同考虑人文与自然环境,借助地理探测器依据 q 值评估各因子对碳平衡分布格局的影响程度,并探究各因子对碳平衡状态的交互作用机制。

单因子探测结果表明(图 7),各驱动因子对碳平衡变化整体影响情况排序为:经济水平>人口密度>产业结构>夜间灯光>NDVI>道路密度>降水>坡度>高程>气温。在碳平衡的相关影响因子中,人类活动类和自然类相关因子的贡献度分别为 78.9%和 21.1%,其中经济密度和人口密度作为主导影响因子贡献度分别达到 25.7%和 25.1%,主要是由于人们在经济的驱动下对经济资源进行空间配置,从而导致区域碳平衡状态的差异,学界亦有观点认为经济增长无论在长期上还是在短期上都促进碳排放的增加^[50],第二产业为主导的产业结构是碳排放增多的主要原因。此外,NDVI 与碳吸收息息相关,在自然类因子中占比高达 62.5%,植被通过光合作用吸收二氧化碳,从而减少大气中的温室气体浓度,NDVI 较高的区域通常具有更强的碳汇功能,因此成为影响成渝城市群碳平衡格局的核心因子。另值得注意的是,区域边缘地区均为山地地区,秦巴、武陵、乌蒙等山区环绕,有着“蜀道难、难于上青天”之说,交通与地形的限制使经济发展处于相对滞后水平^[51],而随着经济的发展,外部人类活动因素逐渐取代内部自然因素,成为影响最显著的因素。事实上,人类活动主要是通过影响碳排放进而影响碳平衡的格局,而自然因素则是通过影响碳吸收进而改变了碳平衡的状态,两者在时空上的动态变化共同影响着碳平衡。交互探测结果表明,多种驱动因子组合交互的解释能力强于单因子,且因子间通过双因子非线性的方式可增强 CBPI 的空间异质性。分析交互因子结果发现,2019 年最显著的交互因子为人口密度∩经济水平, q 值约为 0.75,其次为经济密度∩夜间灯光(0.74),同时经济密度∩NDVI 也在交互探测中影响显著(0.72)。夜间灯光指数能够反映出夜间人口和经济活动实际分布以及道路通达性,其

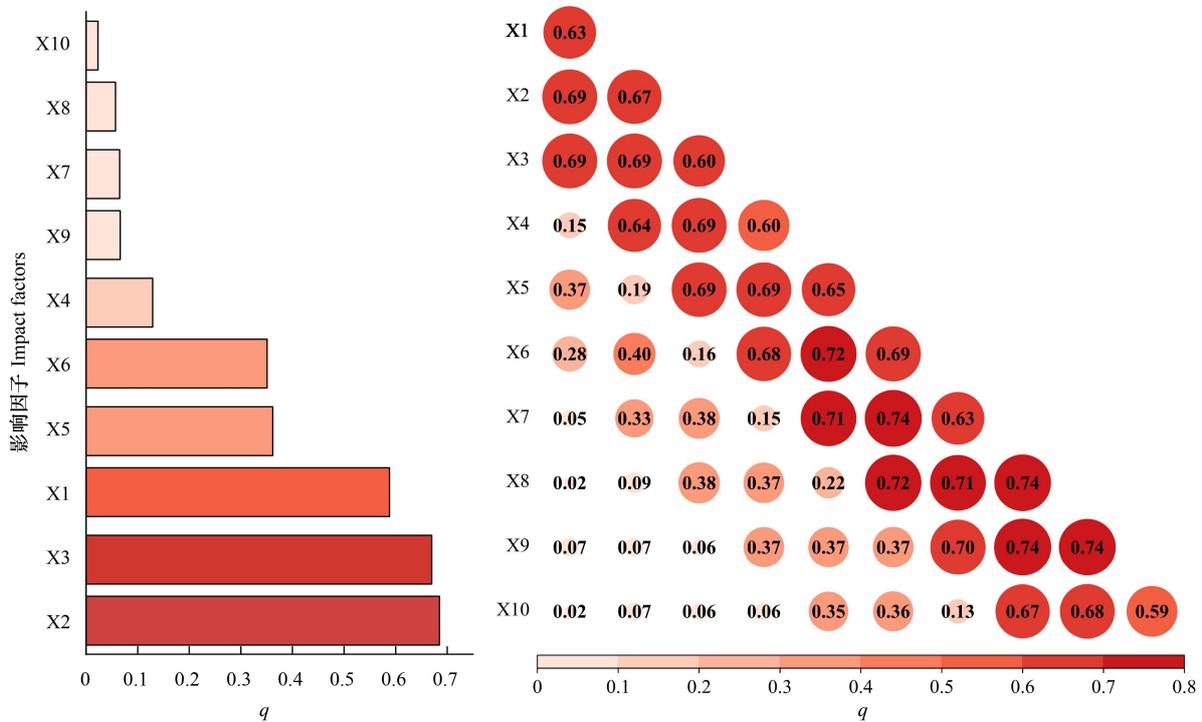


图7 碳平衡驱动因子探测结果

Fig.7 Interaction probes of carbon balance drivers

X1: 产业结构; X2: 经济水平; X3: 人口密度; X4: 道路密度; X5: 夜间灯光; X6: NDVI; X7: 坡度; X8: 高程; X9: 降水; X10: 气温; q : 因子解释度

不断上升说明随着区域不断发展,人口和产业聚集,碳排放也持续增多,植被覆盖度发生变化,多重因素共同影响了碳平衡状态。

总的来说,碳平衡状态的形成是一个社会-生态系统的耦合过程,并非由单一因子作用的结果,成渝城市群碳平衡主导因子以人类活动类因子为主,其中经济和人口是主导影响因素,且多种驱动因子组合交互的解释能力强于单因子,进一步说明碳平衡空间格局的变化是由人类活动因子主导,多种因素共同导致。

4 讨论

4.1 碳平衡量化的不确定性分析

碳平衡量化同时涉及碳源与碳汇水平和能力的定量描述,也是应对气候变化、实现可持续发展目标的关键环节,对于实现“双碳”目标和制定环境政策至关重要。目前的CBPI量化方法主要分为净值法和系数法^[52]两大类,其中净值法以碳排放与碳吸收的差值,即碳盈余和碳赤字衡量碳平衡;系数法以碳排放与碳吸收的比值表征碳平衡。与此同时,碳吸收和碳排放量化过程中采用的源数据大多不尽相同,而不同的面板数据、遥感数据以及不同参数所获得的模拟数据均会对二者的量化结果产生一定影响。例如,刘贤赵等^[53]基于夜间灯光数据以及相关数据估算中国各省域的碳排放量,并将结果与四大典型碳数据库分配的省域碳排放值进行比较,碳排放结果平均偏离了6.45%—9.12%,而其重要原因可能是四大国际数据库对中国碳排放的核算边界不尽相同所致。此外,刘元欣等^[54]与高国力等^[55]对我国城市群进行碳排放分析时,采用不同的碳排放数据,致使京津冀城市群的碳排放量数据存在差异。事实上,不同城市群的碳排放、碳吸收特征和碳平衡驱动因素均存在明显差异,如何针对不同研究区和研究内容选择适宜因子和数据等亦是今后碳平衡量化研究的重点内容。

相同数据采用净值法和系数法估算CBPI所得结果也会产生不确定性。为直观展示不同量化方式的不

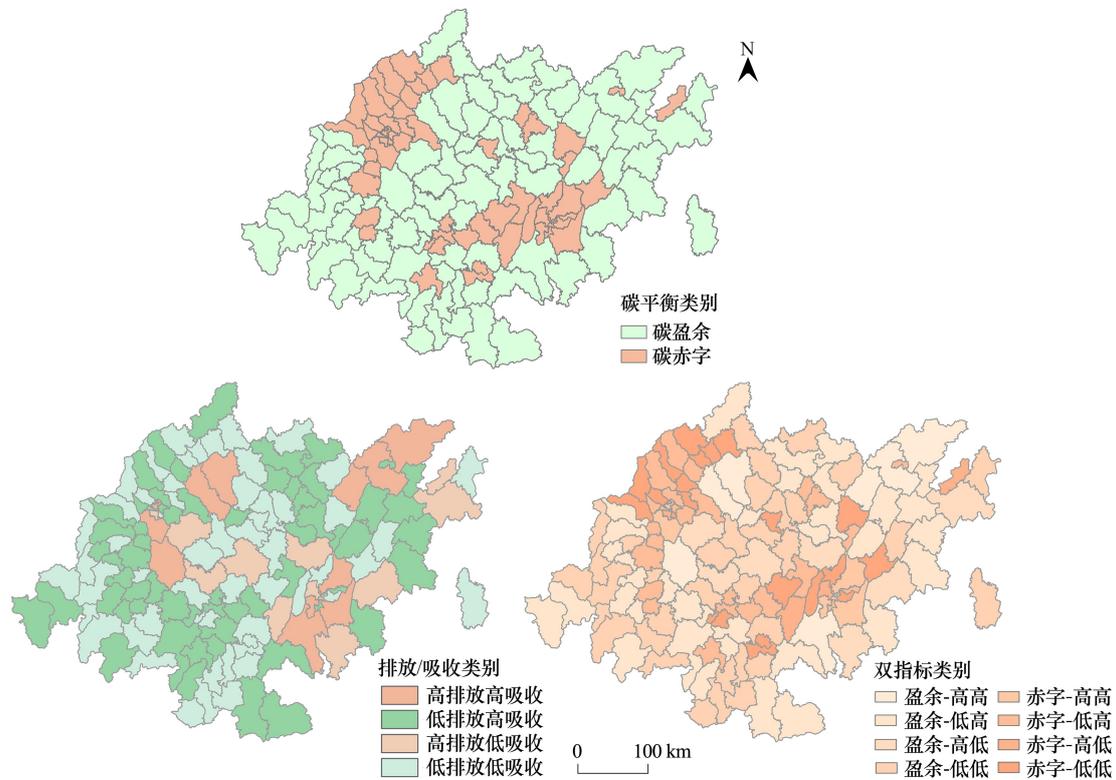


图 8 2015 年成渝城市群碳平衡不确定性分析

Fig.8 Carbon balance uncertainty analysis of the Chengdu-Chongqing City Cluster in 2015

同,以本研究 2015 年相关数据为例,采用系数法以碳排放与碳吸收的比值表征区域碳平衡能力(图 8),此外,通过统计得到县域碳排放与碳吸收均值,并以此为界按差值得到碳排放/吸收分类图,最后将两者叠置得到不同碳平衡状态下碳排放碳吸收情况分布。对比前两图可以发现,碳排放/吸收图较碳盈余/赤字空间分布图的突出区域整体向右下方偏移扩张。叠置后分析发现,研究区东北部的高排放高吸收区,均为四川省达州市重点区县,在碳平衡状态时除通川区均属于碳盈余状态,而其在碳排放碳吸收的分类中属于低排放高吸收区域,整体属于赤字-低高类别,而这两者由于方法的不同,其结果也出现了矛盾与差异化,进一步证明方法不同会导致结果的不确定性。而这主要是因为成渝城市群以工业发展为主,区域整体碳排放均值偏高,而通川区作为发展核心,区域较小,不利于工业发展,达州市的主要工业区域扩散至周边重点区县,且建成区人类活动密集,建筑物密度高而 NPP 低,整体呈现高赤字状态。

总体来看,量化方法和数据来源及其分辨率与时空尺度等多种因素均会造成碳平衡量化的不确定性。因此,在进行碳平衡量化时,应基于研究区域及相关数据基本情况,综合考虑以便较为全面地分析因果,权衡利弊,使区域之间相互调整,整体达到更好的碳平衡状态。

4.2 成渝城市群碳平衡与城市规划空间格局一致性分析

人类活动和自然环境相互作用的人地关系始终以国土空间为主要资源载体^[56],国土空间能够通过用地结构以及承载的人类活动方式等影响区域的碳收支状况,但是从本质上来说只有满足并符合人类活动的空间规划才是空间利用的真正价值。某种程度上来说,空间规划是国家期待该区域未来人地关系在过程中如何演变的一种体现,可以反映出人类与环境之间综合作用的结果,造成碳平衡的赤字或盈余/平衡,二者的一致性分析有利于全面地来识别或者研究人地关系的过程和结果。

碳平衡格局可以进一步反映区域实现碳吸收与碳排放中和的状况,而国土空间规划作为生态文明建设重要抓手,无疑成为落实低碳减排新任务的借力工具。2016 年发布的《成渝城市群发展规划》中提到要发挥重

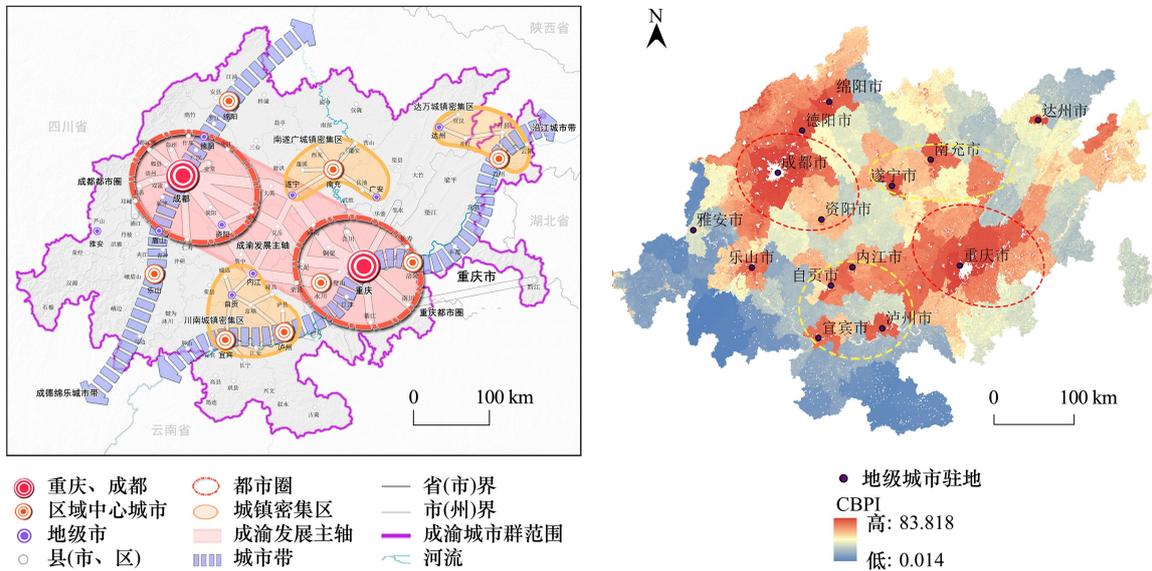


图9 成渝城市群空间格局示意图^[30]与2019年碳平衡空间格局分布图

Fig.9 Diagram of spatial pattern of Chengdu-Chongqing City Cluster and Distribution of spatial pattern of CBPI in 2019

庆和成都双核带动功能,构建“一轴两带、双核三区”空间发展格局。而碳平衡的变化受区域的经济、社会发展,人口集聚以及道路交通的建设等影响,也形成以成都市、重庆市为东西主核心,其余三个次核心共同发展,同时,整体形成“两带”以“成渝发展主轴”为连接轴的双C环抱式圈层分布格局,两者的空间分布具有高度一致性(图9)。此外,其自然资源禀赋对于碳平衡的空间分布也有着显著影响,低值区主要分布在研究区盆地外缘南北部的岷山-邛崃山-凉山、米仓山-大巴山、武陵山、大娄山等重点生态区。主要是自然条件作为限制与基础,为空间格局定下红线与基石,但随着人类活动强度不断地在地表加剧,其影响愈发显著成为主导因素,两者空间格局分布的一致性也更进一步印证了本研究碳平衡格局结果的客观性与可信度。

中国改革开放以来,经济快速增长,国土空间大格局的规划与发展过程中出现了诸多问题,人类活动与资源环境的矛盾冲突亦直接或间接影响了区域碳平衡格局。“十四五”规划明确指出,国家将加强空间规划,以减少人类活动对自然空间的占用,因此,未来的发展要形成尊重自然和人地和谐的发展思想,在进行城市国土空间规划时可基于碳平衡状况,分析不同地域单元或不同行政单位下的国土空间碳平衡状况,并将其纳入国土空间规划的“双评价”体系中,从自然和人类活动两方面共同进行资源、产业、政策的相应分配,加强区域绿色建设,合理规划使区域之间能更好地达到一种“平衡”状态。同时,可考虑在碳平衡的基础上进行分区,参考王女杰等提出的“生态补偿优先级”,根据研究区的碳赤字或盈余情况,将补偿支付区划分为优先支付区、次级支付区、潜在支付区^[57];亦可根据碳排放类型的特征将研究区划分为碳源优化区、碳汇优化区、生态补偿区及经济补偿区^[58],成渝城市群碳平衡存在明显的空间分异特征,尤其在成都和重庆为两极为核心向外呈现明显的圈层效应,应由“内”向“外”从两极产业结构上进行升级优化并向外扩散,建立“共享、共建、共治”的生态补偿制度。

4.3 不足与展望

本研究在前人研究的基础上,对碳平衡和人类活动强度及其关联性进行定量化研究,但仍存在一些不足之处,需在以后的研究中继续深入和完善。首先是数据的可获取性、估算方式的固有局限以及专业知识的限制均对碳平衡和人类活动强度的估算结果精确性构成制约。如本文所使用的CEADs的碳排放数据为碳排放研究提供了较精准的数据基础,但现有的省域碳排放量数据仅公布至2019年,县域仅到2017年,无法开展更具时效性的研究。此外,由于在县域层面上不同类型的数据收集和匹配较为困难,未能进行长时间尺度和更

高时空分辨率的研究区 CBPI 和 HAI 时空演变的研究,限制了对某些区域或时间段碳平衡状态的深入分析。此外,尽管考虑了多种自然和人文因素,但仍存在其他未被充分考虑的影响因素,如政策变化、空间溢出效应以及碳循环机理等,这些都可能对碳平衡及其空间分布产生重要影响。

5 结论

(1)2010—2019 年间,成渝城市群 CBPI 整体呈“双 C”环抱式分布,存在明显空间异质性和聚集性。研究区各区县以碳盈余为主,CBPI 整体呈降低态势,高值区沿成德绵乐城市带和沿江城市带呈现“双 C”环抱式分布,并以成都和重庆为两极分别向东北-西南弧形延伸并逐渐衰减。此外,成渝城市群 CBPI 在空间上主要呈现点状、带状的组团式聚集分布,其中以重庆和成都市市中心向外具有明显的圈层结构。

(2)2010—2019 年间,成渝城市群 HAI 显著增高(21.2%/a),与 CBPI 表现出空间一致性和时间同步性。研究区 HAI 以成渝为双核为中心、沿东北-西南轴线扩散衰减的“双核心轴线圈层”城市群逐渐向网络型城市群演进,同时,人类活动强度不断增强且对周边地区的辐射影响范围不断扩张,变化率在局部地区突出显著,如成都和重庆市中心的中心县域。

(3)成渝城市群 CBPI 与 HAI 之间存在着较强空间正相关性。研究区空间平均相关系数约为 0.94,其中乐至县(0.98)和大渡口(0.98)最为显著;基于双变量 Moran's I 的 CBPI 与 HAI 之间相关性系数为 0.675,说明两者呈现较强的相似聚集特点。研究区聚集类型主要以“低-低”聚集、“高-高”聚集为主,显著“低-低”聚集区主要集中在研究区西南部山区,尤其以汉源县和马边自治县显著性最为突出;显著“高-高”聚集区集中在重庆市和成都市的主城区。

(4)成渝城市群碳平衡主导因子以人类活动类因子为主,其中经济水平和人口密度是主导影响因素;NDVI 为自然类因子影响碳平衡状态的核心因子。因子探测结果表明,人类活动类和自然类相关因子的贡献度分别为 78.9%和 21.1%,其中经济密度和人口密度作为主导影响因子贡献度分别为 25.7%和 25.1%;交互探测结果表明,最显著的交互因子为人口密度 \cap 经济水平, q 值约为 0.75。

参考文献(References):

- [1] 樊星,秦圆圆,高翔.IPCG 第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议.环境保护,2021,49(Z2):44-48.
- [2] 赵荣钦,张帅,黄贤金,秦耀辰,刘英,丁明磊,焦士兴.中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区.地理学报,2014,69(10):1425-1437.
- [3] 向芳芳,何风琴,黄丽萍,陈荣清.快速城镇化地区国土空间碳汇冲突评价及其异质性分析——以京津冀城市群为例.生态学报,2024,44(23):10676-10687.
- [4] 丁明磊,杨晓娜,赵荣钦,张战平,肖连刚,谢志祥.碳中和目标下的国土空间格局优化:理论框架与实践策略.自然资源学报,2022,37(5):1137-1147.
- [5] 戴琳琳,封昌炜,周子杰,金丹.中国县域尺度碳收支的时空演变研究.生态经济,2023(11):31-39.
- [6] Awaworyi Churchill S, Inekwe J, Ivanovski K. Conditional convergence in per capita carbon emissions since 1900. Applied Energy, 2018, 228: 916-927.
- [7] 郭沛,梁栋.低碳试点政策是否提高了城市碳排放效率——基于低碳试点城市的准自然实验研究.自然资源学报,2022,37(7):1876-1892.
- [8] 田光辉,李江苏,苗长虹,杜萍萍.基于非期望产出的中国城市绿色发展效率及影响因素分析.经济地理,2022,42(6):83-91.
- [9] 冯碧梅.湖北省低碳经济评价指标体系构建研究.中国人口·资源与环境,2011,21(3):54-58.
- [10] 李咏华,高欣芸,姚松,葛丹东.长三角城市群核心地区碳平衡压力与新型城镇化脱钩关系.经济地理,2022,42(12):72-81.
- [11] 朴世龙,何悦,王旭辉,陈发虎.中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望.中国科学:地球科学,2022,52(6):1010-1020.
- [12] 许恩银,王维枫,聂影,杨红强.中国林业碳贡献区域分布及潜力预测.中国人口·资源与环境,2020,30(5):36-45.
- [13] Wilson B T, Woodall C W, Griffith D M. Imputing forest carbon stock estimates from inventory plots to a nationally continuous coverage. Carbon Balance and Management, 2013, 8(1): 1.
- [14] 殷炜达,苏俊伊,许卓亚,刘志成.基于遥感技术的城市绿地碳储量估算应用.风景园林,2022,29(5):24-30.
- [15] 洪长桥,金晓斌,陈昌春,王慎敏,杨绪红,项晓敏.集成遥感数据的陆地净初级生产力估算模型研究综述.地理科学进展,2017,36(8):924-939.
- [16] Wei X D, Yang J, Luo P P, Lin L G, Lin K L, Guan J M. Assessment of the variation and influencing factors of vegetation NPP and carbon sink capacity under different natural conditions. Ecological Indicators, 2022, 138: 108834.

- [17] 张文英, 高雪松, 王启. 沱江流域土地利用碳平衡与人类活动强度的关系. 水土保持通报, 2023, 43(3): 349-356, 365.
- [18] 李卓娜, 杨洋, 朱晓东. 基于土地利用变化的江苏省碳排放时空差异与碳平衡分区. 环境保护科学, 2024, 50(1): 120-132.
- [19] 胡剑波, 王青松. 基于碳平衡的民族地区生态补偿量化研究. 广西民族研究, 2019(6): 145-154.
- [20] 汤洁, 毛子龙, 王晨野, 徐小明, 韩维峰. 基于碳平衡的区域土地利用结构优化——以吉林省通榆县为例. 资源科学, 2009, 31(1): 130-135.
- [21] 刘世梁, 刘芦萌, 武雪, 侯笑云, 赵爽, 刘国华. 区域生态效应研究中人类活动强度量化评价. 生态学报, 2018, 38(19): 6797-6809.
- [22] You J S, Dong Z M, Jiang H Y. Research on the spatiotemporal evolution and non-stationarity effect of urban carbon balance: Evidence from representative cities in China. Environmental Research, 2024, 252: 118802.
- [23] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907.
- [24] 陈泓瑾, 刘琳, 张正勇, 刘亚, 田浩, 康紫薇, 王统霞, 张雪莹. 天山北坡人类活动强度与地表温度的时空关联性. 地理学报, 2022, 77(5): 1244-1259.
- [25] 孙猛, 费不凡. 人口集聚与碳排放: 基于空间溢出效应视角的经验考察. 人口学刊, 2022, 44(5): 72-85.
- [26] 林玉英, 李宝银, 邱荣祖, 林金国, 伍世代. 基于 GWR 模型的道路网络对森林碳密度干扰的地理变异——以闽江上游地区为例. 地理科学, 2022, 42(6): 1113-1123.
- [27] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 朱向东, 周艺, 王振波, 张蕾. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析. 地理学报, 2018, 73(1): 177-191.
- [28] 谷方杰, 张文锋. 省际视阈下中国“双碳”目标实现路径选择研究. 中国软科学, 2023(7): 215-224.
- [29] 杨亮洁, 秦丽双, 杨永春, 潘竟虎. 城市群地区城市高质量发展与生态环境的交互协同作用——以成渝城市群为例. 生态学报, 2023, 43(17): 7035-7046.
- [30] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 成渝城市群发展规划(2016) [EB/OL]. (2016-05-04) [2024-10-23]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/ghs/sjdt/201605/t20160504_1170022.html.
- [31] 张扬, 陈雨露, 张杨, 张莹, 龚杰. 成渝城市群“三生空间”时空格局与耦合协调分析. 地域研究与开发, 2022, 41(5): 119-125.
- [32] 蒋金荷, 丁新兴. 环境政策的“同伴效应”研究: 来自低碳城市试点的证据. 中国软科学, 2024, (4): 112-121.
- [33] Chen J D, Li Z W, Song M L, Dong Y Z. Decomposing the global carbon balance pressure index: evidence from 77 countries. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(6): 7016-7031.
- [34] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 李京. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300.
- [35] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth. Science, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [36] 黄孟勤, 李阳兵, 李明珍, 陈爽, 曾晨琴, 张冰, 夏春华. 三峡库区人类活动强度与景观格局的耦合响应. 生态学报, 2022, 42(10): 3959-3973.
- [37] 崔木花. 安徽省产业结构演变的生态环境效应. 经济地理, 2020, 40(8): 131-137, 152.
- [38] 李香云, 王立新, 章予舒, 张红旗. 西北干旱区土地荒漠化中人类活动作用及其指标选择. 地理科学, 2004, 24(1): 68-75.
- [39] 何春阳, 史培军, 李景刚, 陈晋, 潘耀忠, 李京, 卓莉, 一之瀨俊明. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据和统计数据的中国大陆 20 世纪 90 年代城市化空间过程重建研究. 科学通报, 2006, 51(7): 856-861.
- [40] 章德, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究. 管理学报, 2010, 7(1): 34-42.
- [41] 陆建忠, 崔肖林, 陈晓玲. 基于综合指数法的鄱阳湖流域水资源安全评价研究. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 212-218.
- [42] Liu W J, Jiao F C, Ren L J, Xu X G, Wang J C, Wang X. Coupling coordination relationship between urbanization and atmospheric environment security in Jinan City. Journal of Cleaner Production, 2018, 204: 1-11.
- [43] 王雪芹, 戚伟, 刘盛和. 中国小城镇空间分布特征及其相关因素. 地理研究, 2020, 39(2): 319-336.
- [44] 赵荣钦, 刘英, 丁明磊, 张战平, 黄贤金, 秦耀辰. 区域二元碳收支的理论方法研究进展. 地理科学进展, 2016, 35(5): 554-568.
- [45] 韩晓佳, 王继军, 温昕. 退耕区域生态系统服务作用关系尺度效应及分异机制——以安塞区为例. 生态学报, 2024, 44(5): 1791-1807.
- [46] 毛永发, 周启刚, 王陶, 罗泓然, 伍龙江. 耦合 PLUS-InVEST-Geodector 模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因. 长江流域资源与环境, 2023, 32(5): 1042-1057.
- [47] 王超, 谢泓毅, 张馨予, 曾雪婷. 京津冀城市群碳源汇匹配关系的时空格局演化. 生态学杂志, 2024: 1-15. (2024-06-06). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.q.20240605.0917.002.html>.
- [48] 武燕, 吴映梅, 高彬媛, 李琛, 郑可君, 李婵. 成渝城市群生态系统服务价值与人类活动强度空间关系. 水土保持研究, 2023, 30(1): 173-182.
- [49] 刘永超, 李加林, 袁麒麟, 史小丽, 浦瑞良, 杨磊, 卢雪珠. 人类活动对港湾岸线及景观变迁影响的比较研究——以中国象山港与美国坦帕湾为例. 地理学报, 2016, 71(1): 86-103.
- [50] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素. 地理学报, 2021, 76(12): 3103-3118.
- [51] 李峥荣, 徐邓耀, 雷舒砚, 王如渊. 成渝城市群县域经济差异及其成因分析. 世界地理研究, 2018, 27(3): 76-85.
- [52] 李竹, 王兆峰, 吴卫, 邵海琴. 碳中和目标下中国省域碳平衡能力与城镇化的关系. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3136-3152.
- [53] 刘贤赵, 杨旭. 夜间灯光数据估算中国省域碳排放与国际碳数据库分配的碳排放比较. 遥感技术与应用, 2022, 37(2): 319-332.
- [54] 刘元欣, 贺铄, 江雅婧, 罗旭, 袁家海. 中国四大城市群碳排放驱动因素时空分解研究. 气候变化研究进展, 2024, 20(2): 231-241.
- [55] 高国力, 文扬, 王丽, 徐睿宁. 基于碳排放影响因素的城市群碳达峰研究. 经济管理, 2023, 45(2): 39-58.
- [56] 曹小曙. 基于人地耦合系统的国土空间重塑. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2051-2059.
- [57] 李璐, 夏秋月, 董捷, 张斌. 武汉城市圈县域空间横向碳生态补偿研究——基于土地利用碳收支差异. 生态学报, 2023, 43(7): 2627-2639.
- [58] 周波, 许源溪, 冯田. 成渝城市群碳平衡空间分异与优化对策. 长江流域资源与环境, 2024, 33(8): 1650-1662.