

长江经济带净碳汇空间网络特征及驱动因素

谭德明, 欧阳芳兰, 张彩平

(南华大学 经济管理与法学学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: [目的] 探究长江经济带净碳汇空间关联网络特征及其驱动因素, 为推进长江经济带碳减排协同, 促进双碳目标落实和实现区域协调发展提供科学参考。[方法] 采取修正引力模型构建市域尺度下的长江经济带净碳汇空间关联网络, 采用社会网络分析方法识别空间关联网络特征和驱动因素。[结果] ①2001—2021年, 长江经济带碳排放总量持续攀升, 呈现“东高西低”分布特征; 碳汇总量波动上升, 呈现“西高东低”特征; 净碳汇持续下降, 呈现“西高东低”特征。②长江经济带净碳汇总体呈现“东密西疏”的相互交织网络形态, 形成“重庆市”和“上海市”为双核的网络格局。区域整体网络高度集中, 存在上海、重庆等关键节点城市, 网络结构稳定性较差。③依据各城市在网络中地位差异可划为净溢出、双向溢出、经纪人和净受益4个板块, 其中跨板块溢出关系较板块内部关联更显著。④经济发展水平、产业结构高级化、能源消费强度以及不同土地利用结构等是长江经济带净碳汇空间关联网络的关键驱动因素。[结论] 未来需整体上考虑各城市净碳汇的空间网络关联, 以充分实现各城市间优势互补和减排效益最大化。

关键词: 碳减排协同; 净碳汇空间网络特征; 社会网络分析; 长江经济带

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0315-12

中图分类号: F301.2, X321

文献参数: 谭德明, 欧阳芳兰, 张彩平. 长江经济带净碳汇空间网络特征及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 315-326. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.034; Tan Deming, Ouyang Fanglan, Zhang Caiping, Spatial network characteristics and driving forces of net carbon sequestration in Yangtze River economic belt [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 315-326.

Spatial Network Characteristics and Driving Forces of Net Carbon Sequestration in Yangtze River Economic Belt

Tan Deming, Ouyang Fanglan, Zhang Caiping

(University of South China, School of Economic Management and Law, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: [Objective] Spatial network characteristics and driving forces of net carbon sequestration in the Yangtze River economic belt (YREB) were analyzed to provide a scientific reference for promoting coordinated carbon emission reduction, supporting the achievement of “dual carbon” goals and regional coordinated development. [Methods] A spatial association network of carbon sinks in the YREB was constructed at the municipal level using a modified gravity model. Social network analysis was then applied to examine the network’s characteristics and driving factors. [Results] ① From 2001 to 2021, total carbon emissions in the YREB exhibited an increasing trend, with a spatial distribution pattern of higher and lower emissions in the east and west, respectively. Conversely, total carbon sinks followed a fluctuating upward trend, showing a pattern of higher sinks in the west and lower in the east. Net carbon sinks have continuously declined, with a similar west-east gradient. ② The carbon sink network in the YREB showed significant spatial correlation, forming a complex dense in the east and sparse in the west network pattern, with Chongqing and Shanghai City emerging as dual-core nodes. The regional network exhibited high centrality, with cities such as Shanghai and Chongqing City playing key roles. The network’s overall structure demonstrated low stability.

收稿日期: 2024-07-23

修回日期: 2024-08-30

资助项目: 湖南省哲学社会科学基金重大项目(“学术湖南”精品培育项目)“‘双碳’目标导向的碳信息披露体系设计及标准化建设研究”(22ZDAJ011); 国家社科基金后期资助项目“‘双碳’目标导向的企业碳资产管理研究”(23FGLB011); 湖南省自然科学基金项目“基于城市空间网络分析(UNA)的轨道交通与土地利用耦合机理及协调发展研究”(23FGLB011)

第一作者: 谭德明(1976—), 男(汉族), 湖南省株洲市人, 博士, 副研究员, 主要从事城市环境治理、能源经济与管理等方面的研究。Email: 2000000258@usc.edu.cn.

通信作者: 欧阳芳兰(2000—), 女(汉族), 江西省萍乡市人, 硕士研究生, 研究方向为碳补偿、土地资源管理。Email: 20222011110873@stu.usc.edu.cn.

③ Cities were categorized into four groups based on their roles within the network: net exporters, bidirectional exchanges, brokers, and net beneficiaries. Interblock spillover effects were more pronounced than intra-block associations. ④ The primary driving forces behind the spatial association network of carbon sinks were economic development, industrial structure upgrades, energy consumption intensity, and land-use patterns. [Conclusion] In the future, it is essential to consider the spatial network dynamics of net carbon sinks across cities, leveraging complementary strengths to maximize emission reduction benefits.

Keywords: carbon emission reduction coordination; spatial network characteristics of net carbon sink; social network analysis; the Yangtze River economic belt

碳排放持续增长致使全球极端气候频现,2020年我国正式提出“双碳”目标,不仅是应对全球气候变化的重要举措,也是推动中国高质量发展的内在要求。党的二十大报告进一步指出实现碳达峰碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,事关经济社会发展全局和生态文明整体布局,需要全国统筹推进,区域具体落实。在发展新质生产力、“共抓大保护、不搞大开发”以及双碳目标的大背景下,长江经济带需要着力促进区域要素流动和高质量绿色发展。虽然,长江经济带在绿色低碳转型方面取得历史性成就,但作为横跨我国东中西部的协调发展带,区域发展不平衡、不充分特征依然显著^[1]。长期以来,长江经济带“重化工”的产业结构和“重煤炭”的能源布局致使区域整体碳排放量居高^[2],各地区迥异的发展水平、资源禀赋、生态本底等导致碳排放量、碳减排能力和潜力的差异,阻碍区域协调发展及碳减排目标实现。在经济社会发展与生态环境保护双重压力背景下,推动长江经济带高质量发展进入关键期。长江经济带需兼顾经济发展与生态建设,破解高碳排放对经济的制约。因此识别长江经济带净碳汇的空间关联关系和驱动因素,对抓住区域降碳痛点,推进区域协同减排具有重要意义。目前长江经济带区域碳减排研究方兴未艾,主要围绕长江经济带碳排放影响因素、碳排放、碳汇时空演变特征展开。各学者通过空间计量法、TOPSIS模型、系统广义矩估计方法、地理加权回归模型、超效率SBM模型等分别探讨了长江经济带发展战略^[3]、产业集聚^[4]、区域创新创业能力^[5]、环境规制^[6]、技术水平^[7]等对长江经济带碳排放的影响。关于碳排放、碳汇时空分布研究,学者们采取标准差椭圆、重心迁移模型和地理探测器方法^[8],借助空间自相关模型^[9]等分析长江经济带碳排放、碳汇的时空演变特征及驱动因素。

长江经济带碳减排以及碳排放、碳汇时空特征开展了丰富的研究,但仍存在几点不足:①多以长江经济带上、中、下游或城市群等局部区域展开,缺乏市域尺度下的区域整体研究,一定程度上弱化了长江经济带的一体性和城市差异性。②多分析长江经济带的

碳排放、碳汇的空间分布及演变特征,但缺乏净碳汇的空间关联网络研究。影响因素多围绕本底特征,忽略了城市的空间溢出效应。因此,本文采取修正引力模型构建市域尺度下的长江经济带整体的净碳汇空间关联网络,并选择社会网络分析方法识别净碳汇空间关联网络的整体特征、个体特征和影响因素,掌握各城市净碳汇在整体网络中的地位及驱动机制,为推进长江经济带协同碳减排提供科学参考。

1 研究方法和数据来源

1.1 研究区概况

长江经济带东起上海,西至云南,覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州、云南 11 个省市,承担着经济发展、粮食生产、生态保护等多重任务。长江经济带作为引领我国经济高质量发展的排头兵,人口和生产总值的全国比例超 40%,但产业结构的“重化工”和能源结构的“重煤炭”致使其成为碳排高地。长江经济带生态文明建设的先行示范地位与高碳排的现实矛盾要求积极推进区域协同碳减排。因此以长江经济带 11 个省市的 130 个城市为研究对象,选取 2001—2021 年为研究期,研究区域整体及内部碳排放、碳汇的时空变化趋势,识别长江经济带净碳汇空间关联网络特征及驱动因素,为推进区域协调发展,有序实现区域碳减排提供科学参考。

1.2 研究方法

1.2.1 碳排放量、碳汇量计算方法 参考温室气体排放计算方法和已有研究^[10-11],估算城市直接和间接碳排放。计算公式为:

$$Z_c = E_c + A_c \quad (1)$$

$$E_c = \sum_{i=1}^n E_i \cdot NC_i \cdot CEF_i \cdot COF_i \times 44/12 \quad (2)$$

$$N_c = \sum_{j=1}^m (Y_j \cdot b_j) \quad (3)$$

式中: Z_c 为城市总碳排放量; E_c, A_c 为能源和农业生产活动的碳排放量; n 为能源种类数; E_i 为*i*种能源消耗量; NC 为平均低位发热量; CEF 为碳排放因子; COF 为碳氧化率; $44/12$ 为碳转换系数; Y_j, b_j

分别为 j 类农用物资消耗量和碳排系数。各类农用物资碳排系数详见表 1^[12]。

表 1 农用物资碳排系数
Table 1 Carbon emission coefficient of agricultural materials kg/hm²

农用物资品种	碳转化系数
化肥	0.895
农用塑料薄膜	5.18
农田有效灌溉面积	266.48

赵宁等^[13]估算不同土地利用类型的土壤固碳、植被固碳。选取水稻、棉花、油料、烟叶、蔬菜、瓜果和其他作物表征作物碳汇 $Z_{\text{汇}}$, 计算公式为:

$$Z_{\text{汇}} = T_{\text{汇}} + C_{\text{汇}} \quad (4)$$

$$T_{\text{汇}} = \sum_{i=1}^n A_j \cdot \epsilon_j \quad (5)$$

$$C_{\text{汇}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot P_i \times (1-W)/a_i \quad (6)$$

式中: $T_{\text{汇}}$, $C_{\text{汇}}$ 分别为不同地类和农作物碳吸收量; n 为土地利用类型; A_j 为不同地类的面积; ϵ_j 为不同地类的碳汇系数; k 为农作物的种类数; C_i 为 i 类农作物合成单位有机质所吸收的碳; P_i 为农作物产量; W 为农作物经济产品部分的含水量; a_i 为 i 类农作物的经济系数。相关地类和农作物的碳吸收率等详见表 2—3^[14-16]。

表 2 不同土地利用类型的碳吸收率
Table 2 Carbon uptake rates for different land use types t/(hm² · a)

土地利用类型	碳吸收率
耕地	0.13
林地	3.81
草地	0.91
灌木	0.28
水域	0.024 8
建设用地	0.005
湿地	0.200 8

表 3 主要农作物经济系数和碳吸收率
Table 3 Economic coefficient and carbon absorption rate of main crops

品种	经济系数	含水量/%	碳吸收率
水稻	0.45	12	0.414
棉花	0.45	8	0.450
油料	0.25	10	0.450
烟叶	0.55	85	0.450
蔬菜	0.6	90	0.450
瓜果	0.7	90	0.450
其他作物	0.4	12	0.450

1.2.2 修正引力模型 社会网络分析基于空间关联关系,引力模型能够刻画空间网络的时序变化,同时综合考虑地理距离、经济规模等因素对区域联系的影响。鉴于净碳汇联系受多种因素影响,故采用修正的引力模型刻画空间关联关系^[17]:

$$x_{ij} = a_{ij} \frac{\sqrt[4]{P_i S_i U_i G_i} \sqrt[4]{P_j S_j U_j G_j}}{D_{ij}^2},$$

$$a_{ij} = \frac{S_i}{S_i + S_j}, \quad D_{ij}^2 = \left(\frac{d_{ij}}{G_i - G_j} \right)^2 \quad (7)$$

式中: P_i, P_j 分别为 i 和 j 市的人口数量; S_i, S_j 分别为 i 和 j 市的净碳汇量; U_i, U_j 分别为 i 和 j 市的城镇化率; G_i, G_j 分别为 i 和 j 市的 GDP; a_{ij} 为 i 和 j 市之间净碳汇联系中的贡献率; d_{ij} 为 i 与 j 市的地理距离; D_{ij}^2 表示两市间的“经济距离”。

1.2.3 社会网络分析 碳排放、碳汇的外部性决定其具有时空依赖性和空间关联效应^[18],而社会网络分析法(social network analysis, SNA)通过可视化个体、组织或系统间关系,能够揭示网络结构的特征及变化规律^[19]。本文运用社会网络分析法分析长江经济带净碳汇空间网络整体特征、个体特征和块模型^[20]。整体特征选取网络密度(ND)、网络关联度(C)、网络效率(E)和网络等级度(H)4个指标。网络密度指网络中实际存在的节点连线数与可能存在的最大连线数的比值〔公式(8)〕。关联度反映网络的稳健性〔公式(9)〕。网络效率反映网络中各节点的连接效率〔公式(10)〕。网络等级度是网络各节点间非对称的可达程度〔公式(11)〕。

$$ND = \frac{L}{N \times (N - 1)} \quad (8)$$

$$C = 1 - \frac{V}{N \times (N - 1) / 2} \quad (9)$$

$$E = 1 - \frac{M}{\max(M)} \quad (10)$$

$$H = 1 - \frac{K}{\max(K)} \quad (11)$$

式中: L 为网络中各节点的连线数; N 为网络节点的个数,该网络中存在的最大连线数量为 $N \times (N - 1)$; V 为网络中不可连通的点对数; M 为网络中多余线的条数; $\max(M)$ 表示网络中最大可能的冗余连线个数; K 为网络中对称的可达点对数, $\max(K)$ 表示网络中最大可能的对称可达点对数。

个体特征选取点度中心性、接近中心性和中介中心性3个指标。点度中心性 $[C_D(A_i)]$ 用于衡量网络结构中节点 A_i 在整个网络中的地位及影响力〔公式(12)〕。中介中心性 $[C_B(A_i)]$ 指在网络中节点 A_i 处于任意两个节点间最短路径的概率〔公式(13)〕。

接近度中心性 $[C_c(A_i)]$ 表示节点 A_i 直接连接网络中其余节点的能力,即便利性[公式(15)]。

$$C_D(A_i) = \frac{k_i}{(N-1)} \quad (12)$$

$$C_B(A_i) = \frac{2B_i}{[(N-2)(N-1)]} \quad (13)$$

$$B_i = \sum_{j \neq i} \frac{N_{ji}(i)}{N_{ji}} \quad (14)$$

$$C_c(A_i) = \frac{(N-1)}{[\sum_{j=1, j \neq i}^N d_{ij}]} \quad (15)$$

式中: k_i 为市 A_i 的净碳汇的度; N 表示网络中城市节点数量; B_i 为节点介数; $N_{ji}, N_{ji}(i)$ 分别表示节点 A_j 到节点 A_i 的最短路径数量和最短路径经过站点 A_i 的次数; d_{ij} 表示节点 A_j 到节点 A_i 的距离。

1.2.4 块模型分析 块模型常用于划分空间网络中不同板块,刻画板块间关联关系。借鉴已有文献^[21]分为4个板块:①净溢出板块。板块内成员的向外溢出关系强于向内接收关系,且板块内部成员间的溢出关系较薄弱。②经纪人板块。网络桥梁角色,既对其他板块成员具有溢出关系,同时接收其他板块发出的关系。③双向溢出板块。双向引导角色,对板块内部以及其他板块成员产生较多溢出关系。④净受溢板块。板块内部成员间溢出关系明显,对其他板块成员的溢出关系明显少于其他板块成员发出的接收关系。

1.2.5 QAP模型 QAP(quadratic assignment procedure, 二次指派程序)为非参数估计模型,无需满足变量间独立与正态分布假定,能够较好避免变量间的多重共线性问题。本文运用QAP模型分析长江经济带净碳汇空间关联网络的驱动因素。参考相关研究^[22-25],选取以下自变量:①经济发展水平差异。各市域的人均GDP;②产业结构高级化差异。各市域的第三产业产值与第二产业产值的比值;③城镇化水平差异;④能源消费强度。市域的能源消费总量与GDP的比值差值;⑤地理距离;⑥人口密度差异。各市域常住人口总量与区域面积比值;⑦粮食产量;⑧土地利用结构差异。包括地区耕地、林地、草地、建设用地和灌木的面积比例。基于以上分析建立QAP模型[公式(16)]:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}) \quad (16)$$

式中: Y 表示长江经济带净碳汇的空间网络关系矩阵; $X_1, X_2, X_3 \dots X_{12}$ 分别表示各因素的差异矩阵,在进行QAP回归前对各差异矩阵进行极差标准化。

1.3 数据来源

整理能源消费、土地利用、外购电力以及社会经济相关指标数据。数据来源于《中国能源统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国农业统计年鉴》等省市统计年鉴和统计年报。碳排放因子来源于《省级温室气体排放清单指南(试行)》,各级政府发布的碳排放清单指南以及IPCC排放因子数据库。土地利用类型数据来源遥感影像Lansat 8云数据。

2 结果与分析

2.1 长江经济带碳排放、碳汇时空演变特征

可视化长江经济带2001—2021年碳排放、碳汇以及净碳汇量的测算结果,如图1所示。由图1可知,研究期内长江经济带碳排放总量呈现直线上升趋势,由2001年的 3.29×10^{11} t上升至2021年的 6.40×10^9 t,年均增长速率为4.7%,年均碳排放总量为 5.10×10^9 t。碳汇量呈现先增长后下降再回升的小幅度波动增长趋势。由2001年的 1.79×10^9 t增长至2010年的 2.08×10^9 t,再缩减为2013年的 1.84×10^9 t,随后逐渐回升至2021年的 1.86×10^9 t,年均总碳汇量为 1.94×10^9 t。研究区净碳汇在研究期内均为负值,整体呈现碳失衡状态,且呈现逐渐降低趋势。发生这些变化的原因可能为:研究期内,长江经济带人口密集,且随着西部大开发、中部崛起以及长江经济带发展战略的陆续提出,建设工程和用地整体扩张及城镇化推进导致区域整体能源消耗需求持续增长。同时,长期以来的粗放式发展模式、重化工的产业结构以及煤炭为主的能源结构导致区域内碳排刚性增长,因此碳排放总量直线上升。长江经济带作为我国重要粮食主产区以及生态保护区,气候适宜、耕地资源丰富,森林植被覆盖率高,使其保持较为平稳的碳汇能力。但由于长江经济带经济社会发展的高能耗需求,区域整体碳排放总量居不下,加之区域碳汇能力有限无法消纳自身碳排放,因此研究区净碳汇量出现波动下降。

可视化长江经济带2001, 2006, 2011, 2016和2021年各城市碳排放、碳汇以及净碳汇的时空分异格局,采用自然断点分级法将3类数据划分为5级^[26-27](1—5级,数值表现为逐渐增大)。李焕^[28]设置净碳汇平衡阈值为0。由于各地区自然生态系统的碳吸收能力存在差异,当某区域的碳排放量超出自身生态系统的最大承载能力,即碳汇与碳排放的差值小于0时,表明该地区出现了碳赤字,反映了自然与社会系统间存在失衡。反之则处于碳平衡。

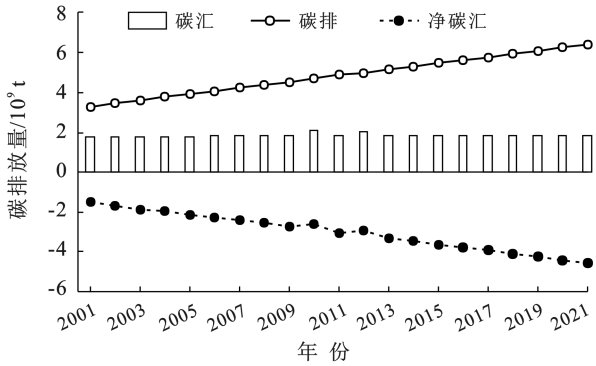


图 1 2001—2021 长江经济带碳排碳汇变化

Fig.1 Changes in carbon emissions and sinks in Yangtze River economic belt from 2001 to 2021

由图 2 可知,2001—2021 年长江经济带各城市碳排放总量持续上升,呈现“东高西低”特征,上海和重庆碳排放量处于最高等级。从等级划分结果看,碳

排放等级划分阈值随时间推移提高,第 1 等级划分起始值为由 2001 年的 4.28×10^6 t 增至 2021 年的 8.41×10^6 t,而第 5 等级划分起始值由 2001 年的 2.52×10^7 t 增至 2021 年的 4.92×10^7 t。同时,最高碳排等级城市由 2001 年的重庆市和上海市变为 2021 年的遵义市和自贡市。出现以上变化可能原因为:东、中部地区因地理区位优势,经济发展水平较高、人口密集、能源消耗高,而西部地区受自然条件限制以及生态保护的刚性要求,建设用地和工业扩张进程缓慢,因此碳排放相对东部较低。重庆市高耗能产业比例重,且能源结构以煤炭为主。而上海市人口密集、工业发达,城市居民用电和工业能源消耗大,因此重庆和上海碳排放居高。但由于重庆市和上海市实施产业的梯度转移,遵义市和自贡市等中西部地区承接了大量传统产业和资源密集型产业后碳排放总量提升,导致城市碳排放等级动态变化。

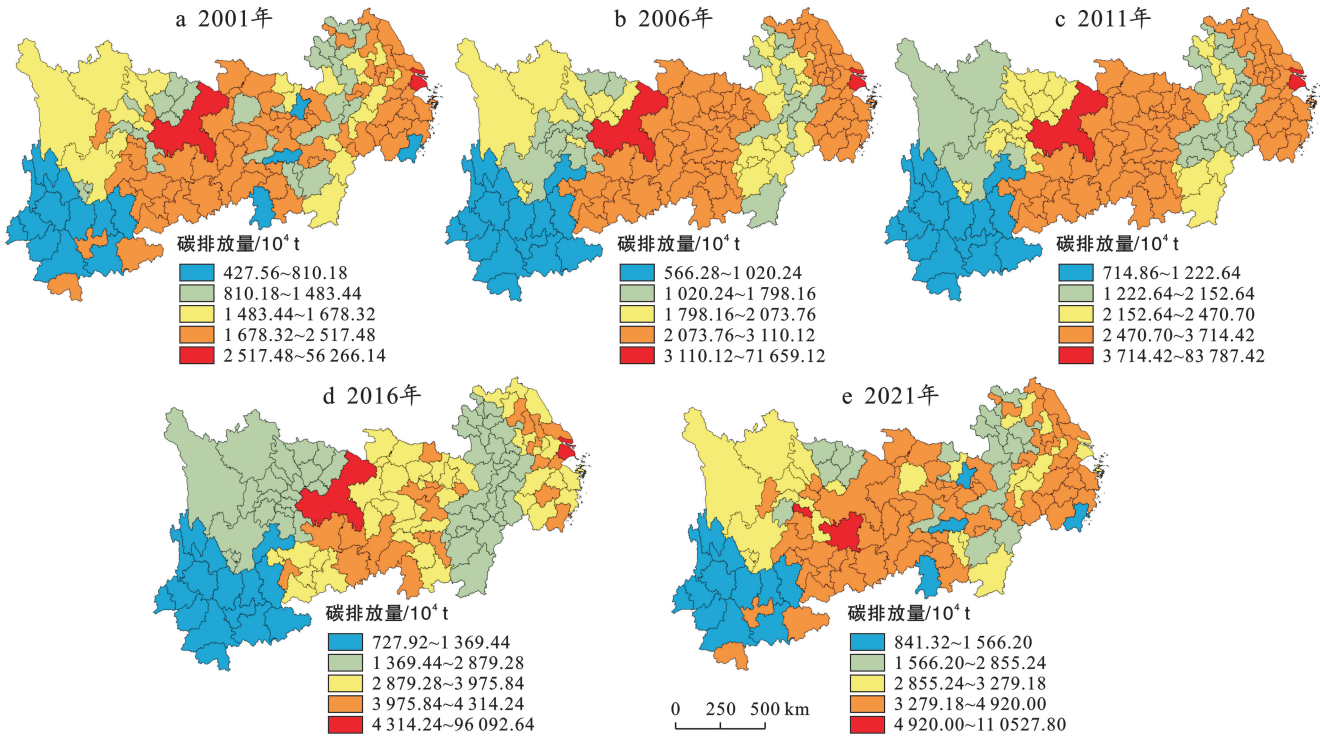


图 2 2001—2021 年长江经济带碳排放时空分布演变

Fig.2 Spatial and temporal distribution of carbon emissions in Yangtze River economic belt from 2001 to 2021

由图 3 可知,长江经济带各城市碳汇量时间上呈现波动上升,空间上“西高东低”特征。碳汇等级阈值波动变化,表现为 5 个年份的第 1 等级的起始值分别为 5.51×10^5 , 6.41×10^5 , 5.90×10^5 , 6.71×10^5 , 5.51×10^5 t,第 5 等级的起始值分别为 3.75×10^7 , 3.69×10^7 , 3.61×10^7 , 4.67×10^7 , 4.69×10^7 t,不同等级的城市数量保持基本稳定。以上分布特征可能原因:云南、四川等西部地区土地覆盖以森林、草原植被为主,具有较高碳吸收能力。在退耕还林、退耕还草等生态

保护政策背景下,土地利用结构上出现较为明显的耕地、草地转林地的调整,而东部地区在快速城镇化进程中,建设用地扩张挤兑耕地等生态用地,因此碳汇能力相对较弱。

由图 4 可知,长江经济带各城市净碳汇空间上呈现“西高东低”特征,大部分城市处于碳失衡状态。2001—2021 年,碳平衡城市数目逐渐减少,由碳平衡状态转向碳失衡的城市有 17 个。最大碳赤字城市由 2001 年的重庆市和上海市变为 2021 年的自

贡市和遵义市。其可能原因在于:净碳汇空间分布特征出现原因与前文的碳排放、碳汇的时空分布变化的推断一致。而最大碳赤字城市变化则是因为自贡市和遵义市具有丰富的煤炭资源,长期以来,以

煤炭为主的能源结构和以化工、冶金等高碳排放为主的产业结构致使碳排放量较高,同时作为经济欠发达地区承接了重庆和上海大量传统产业后碳排放量级增长。

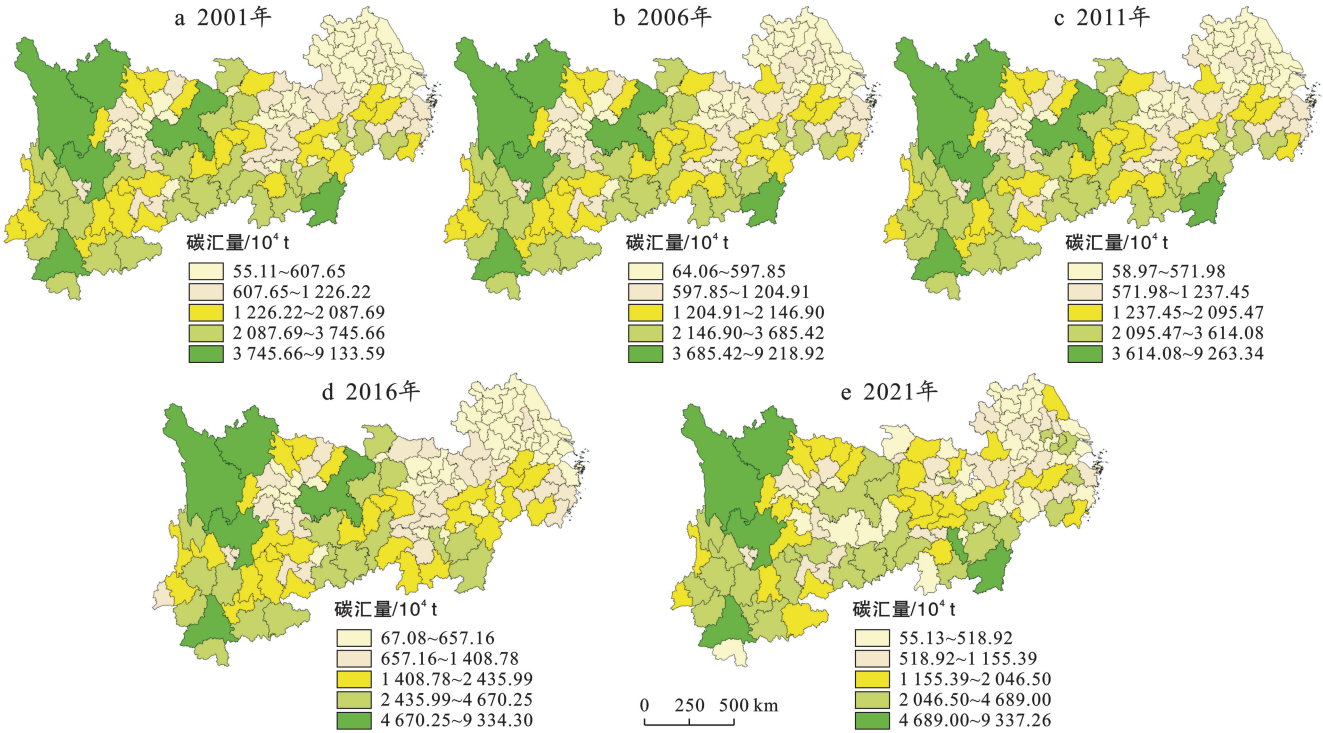


图 3 2001—2021 年长江经济带碳汇时空分布演变

Fig.3 Spatial and temporal distribution of carbon sinks in Yangtze River economic belt from 2001 to 2021

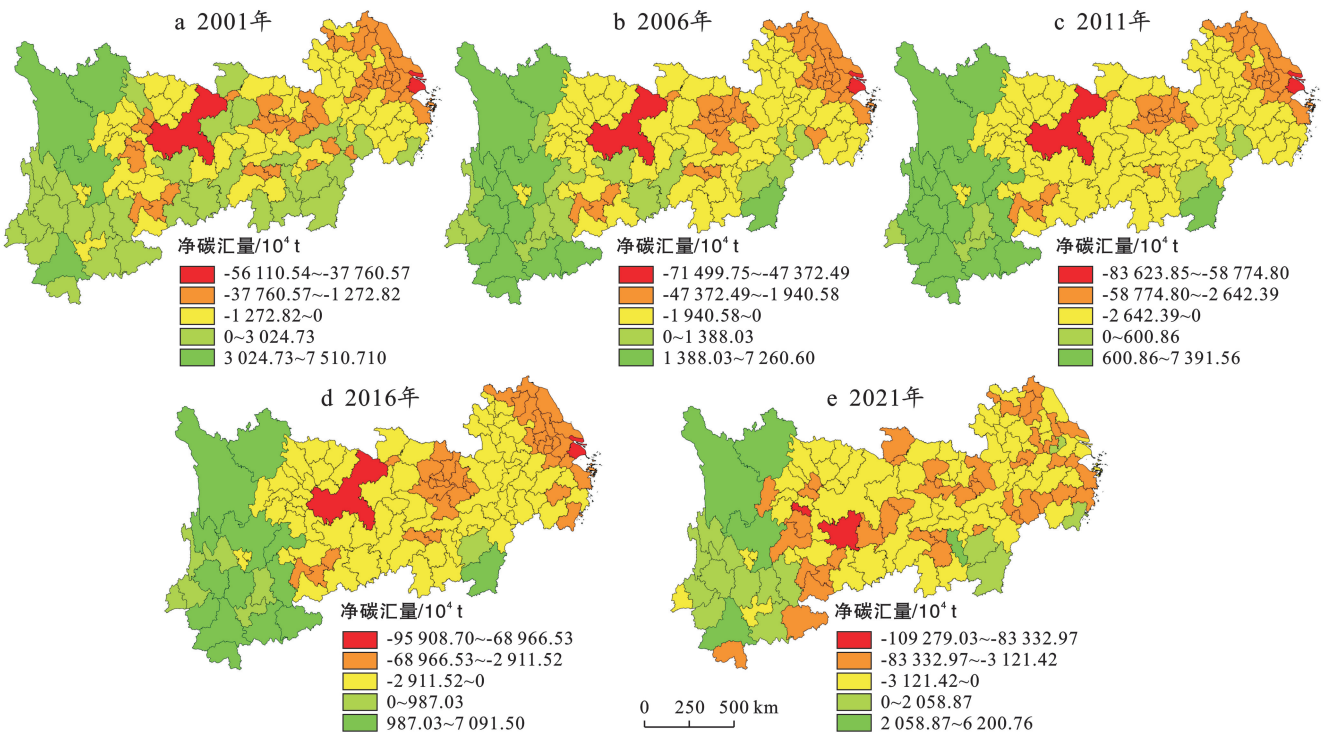


图 4 2001—2021 年长江经济带净碳汇时空分布演变

Fig.4 Spatial and temporal distribution of net carbon sinks in Yangtze River economic belt from 2001 to 2021

2.2 长江经济带净碳汇空间关联网络结构特征

2.2.1 长江经济带净碳汇空间关联网络构建 为体现长江经济带各城市间净碳汇的复杂网络关系,将城市 A,B,C,D 映射为节点,城市对的联系 V_{ba} 和 V_{ab} ,联系强度 W_{ab} 和 W_{ba} 分别为边和边权重,构建有向加权网络模型有向完全图 5a。考虑到实际城市对间净碳汇联系的复杂性和相互性,本文简化处理,将城市

间相互作用的联系强度 W_{ab} 和 W_{ba} 相加作为城市 A, B 之间的联系强度,构建无向完全图(图 5b)。在实际研究过程中,存在部分城市间净碳汇联系强度 $W_{ab} + W_{ba}$ 较弱,为体现研究科学性及较远城市对缺乏联系的实际情况,故将较弱的城市对联系强度(图 5c 虚线)删除,得到 5c 无向图,以此构建本文的研究对象复杂网络模型。

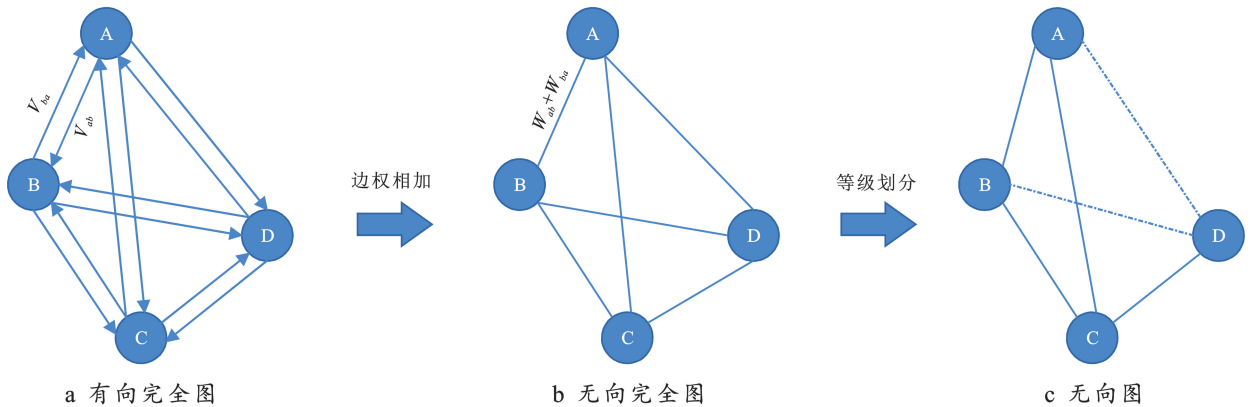


图 5 长江经济带净碳汇空间关联网络构建流程

Fig.5 Process of constructing spatial correlation network of net carbon sink in Yangtze River economic belt

2021 年部分城市间净碳汇联系强度较弱,无法凸显城市空间的空间联系特征,因此选取联系强度为前 35% 的城市对,利用自然断点法将联系强度划分为 5 级,绘制长江经济带净碳汇空间关联网络无向图(图 6)。

由图 6 可知,2021 年长江经济带净碳汇空间关联网络总体呈现“东密西疏”相互交织的网络形态,形成“重庆市”和“上海市”双核心的网络格局。重庆和上海占据整个净碳汇空间关联网络的核心位置,网络空间关联数分别为 104 和 115 个,有着较强的支配能力;苏州市、仙桃市、南京市、郴州市、贵阳市和合肥市净碳汇的网络空间关联数分别为 60,56,54,52,49 和 32 个,为次核心,是连接核心城市与边缘城市的重要桥梁;值得注意的是,保山市、临沧市、大理白族自治州、德宏傣族景颇族自治州、怒江傈僳族自治州和迪庆藏族自治州与其他城市的空间关联数均为 0,游离在空间关联网络之外。净碳汇关联强度前 5 的城市对组合为上海市与嘉兴市、南通市、苏州市、无锡市、和湖州市,表明上海市具有强势的碳排放溢出作用。作为上海大都市圈的核心城市,上海对周边嘉兴、南通、舟山、苏州、宁波等市的经济、科技、交通等具有较大的辐射带动作用。同时,随着产业结构的调整,高碳产业转移和碳排放要素流动搭建起上海市与湖州市、常州市、马鞍山市等中西部区域的净碳汇联系。

2.2.2 长江经济带净碳汇整体网络结构特征 通过 Ucinet 6.0 测算长江经济带 2021 年净碳汇空间关联网络的整体结构指标。其中,网络关联度为 1,表明

网络特征明显,存在净碳汇空间溢出。网络密度为 0.041 5,网络联系相对松散,净碳汇相关要素在城市间流动较为薄弱。网络效率偏高为 0.933,表明各城市间净碳汇连通性较好,但是网络稳定性较差。网络等级度为 1,表明网络等级梯度明显,中心位置节点对整体网络结构控制性较强。

2.2.3 净碳汇空间关联网络个体特征 计算得到长江经济带净碳汇网络的点度中心性、中介中心性和接近中心性。表 4 所示为排序前 10 的城市。由表 4 可知,长江经济带净碳汇空间关联网络中 3 类中心性特征分布不均衡,上海市和重庆市处于整个长江经济带净碳汇空间关联网络中心位置。3 类中心性特征值排名前 5 的为上海市、重庆市、苏州市、仙桃市、南京市,但上海和重庆的度中心分别为 0.93 和 0.84,其他城市均小于 0.5;中介中心性为 0.369 4 和 0.315 8,其他城市均小于 0.1,且接近中心性分别为 0.93,0.86,其他城市分布在 0.46~0.55 之间。由此可见各城市在净碳汇空间网络中地位和影响差异较大。究其原因,上海市和重庆市经济的快速发展、城镇化进程等加剧了区域的碳排放,同时碳要素伴随产业梯度转移、区域产品贸易等在区域间流动,强化了碳排放的空间溢出和净碳汇网络的紧密联系。具体而言,上海作为长三角一体化发展中的重要龙头和都市圈的核心,对周边地区具有较强辐射性和联动效应。而重庆市城市规模大、人口密集、能源资源丰富且工业基础雄厚,区域内部碳排放量较大,具有较强的虹吸效应和辐射效应,在与其他城市的联系中溢出效应明显。

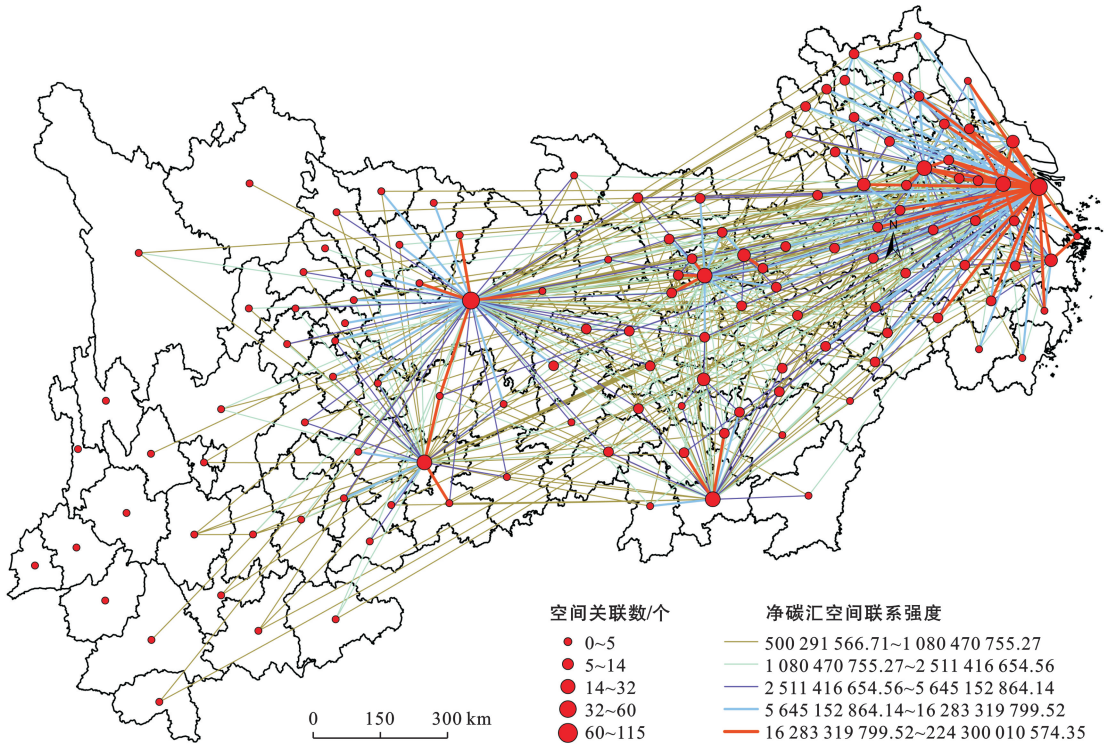


图 6 2021 年长江经济带净碳汇空间关联网络

Fig.6 Spatial correlation network of net carbon sink in Yangtze River economic belt in 2021

表 4 2021 年长江经济带净碳汇空间网络的中心性分析
Table 4 Centrality analysis of net carbon sink network in Yangtze River economic belt in 2021

排名	城市	点度中心性	中介中心性	接近中心性
1	上海市	0.93	0.369 4	0.93
2	重庆市	0.84	0.315 8	0.86
3	苏州市	0.48	0.049 7	0.63
4	仙桃市	0.45	0.057 6	0.65
5	南京市	0.44	0.037 2	0.61
6	郴州市	0.42	0.038 9	0.60
7	贵阳市	0.40	0.049 2	0.62
8	合肥市	0.26	0.010 1	0.57
9	宁波市	0.23	0.007 9	0.54
10	南通市	0.15	0.002 4	0.52

2.2.4 块模型分析结果 利用块模型分析,刻画长江经济带净碳汇网络的空间聚类特征和城市间互动关

系,结果如表 5 和图 7 所示。由表 5 可知,长江经济带净碳汇关联网络中的关联总数为 630 个,板块内外部分别为 58 和 572 个,板块内部联系明显弱于板块间交互,呈现全局关联特征。根据 4 个板块的接收、溢出关系和期望与实际的内部关系比例,将其划分净溢出、双向溢出、经纪人、净收益 4 个板块。

构建密度矩阵刻画各板块间以及板块内部的相关关系,临界值为整体网络密度 0.041 5,构建像矩阵详见表 6。由表 6 可知,长江经济带净碳汇网络中板块内部的关联较为松散,溢出关系紧密。其中,板块 2 内部相关性最大为 0.019,而板块 1,3,4 内部相关性较弱。此外,由像矩阵可知,板块 1 受其余 3 个板块的空间溢出,板块 2 内部存在较大相关性,同时接受板块 3,4 的空间溢出,板块 3 相关性较弱,板块 4 内部相关性较强。

表 5 2021 年长江经济带净碳汇空间网络的板块划分结果

Table 5 Results of plate division of net carbon sink space network of Yangtze River economic belt in 2021

板块	成员数量/个	接收关系数/个		溢出关系数量/个		期望内部关系比例/%	实际内部关系比例/%	板块类型
		板块内	板块外	板块内	板块外			
板块 1	27	56	2	56	209	21.14	21.13	净溢出板块
板块 2	21	53	50	2	223	16.26	0.89	双向溢出板块
板块 3	43	94	104	0	49	34.15	0	经纪人板块
板块 4	33	62	209	0	91	26.02	0	净受益板块

注:期望内部关系比例为(板块内成员数-1)/网络中成员总数-1,实际内部关系比例为板块内部关系数/板块溢出关系总数。

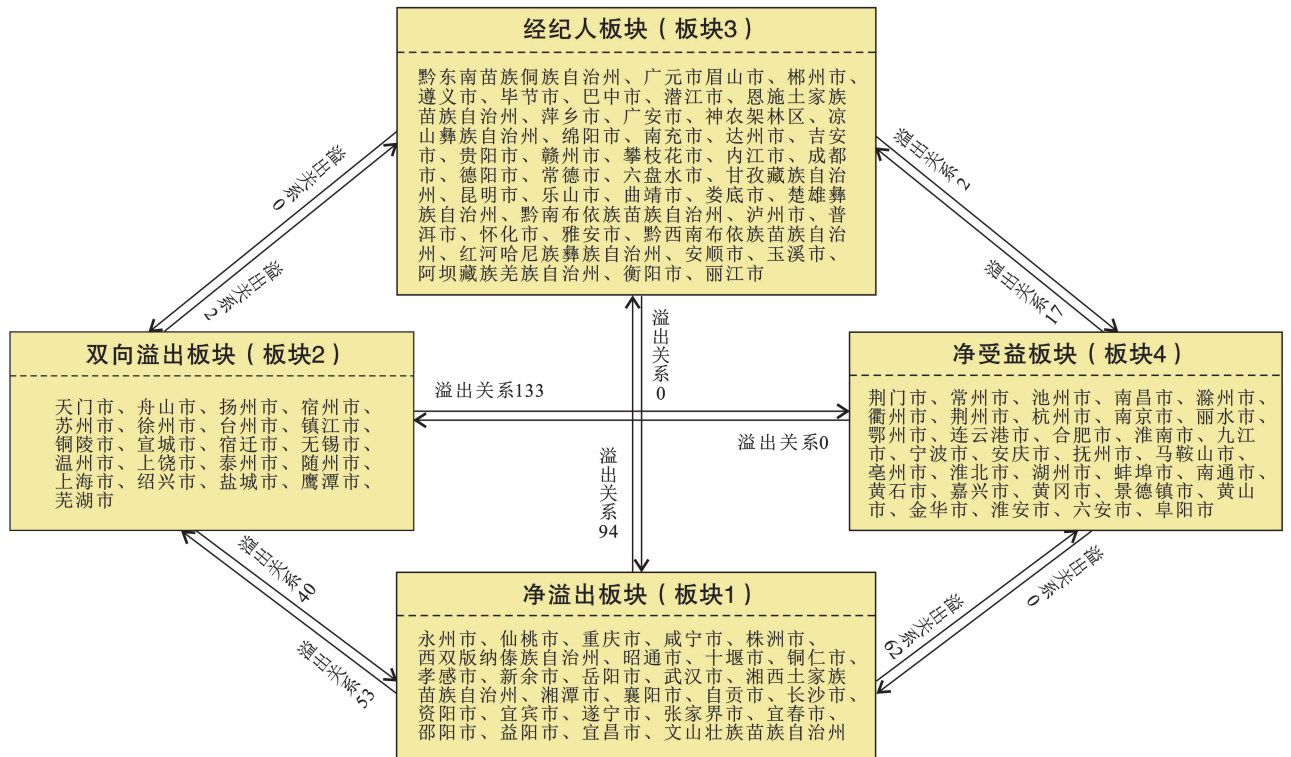


图 7 2021 年长江经济带净碳汇空间网络的板块分布情况

Fig.7 Plate distribution of net carbon sink network in Yangtze River economic belt in 2021

表 6 长江经济带净碳汇关联板块的密度矩阵与像矩阵

Table 6 Density matrix and image matrix of net carbon sink correlation plates in Yangtze River economic belt

板块	密度矩阵				像矩阵			
	板块 1	板块 2	板块 3	板块 4	板块 1	板块 2	板块 3	板块 4
板块 1	0.080	0.093	0.082	0.070	1	1	1	1
板块 2	0.040	0.119	0.045	0.192	0	1	1	1
板块 3	0.000	0.000	0.027	0.001	0	0	0	0
板块 4	0.000	0.000	0.012	0.070	0	0	0	1

2.3 净碳汇空间关联网络驱动因素分析

选择随机置换次数 5 000 次进行 QAP 因素分析 [公式(16)]。由表 7 可知,调整后 R^2 为 0.233,且通过 1% 的显著性水平检验,参考现有研究^[29] 本文 23.3% 的解释力是可接受的。回归结果显示: ①产业结构高级化和能源消费强度差异均通过了 10% 的显著性水平检验。其中,产业结构高级化差异系数为负,表明城市间产业高级化水平越接近,则更有利于空间关联网络的形成。能源消费强度差异系数为正,表明城市间能源消费强度差异促进空间关联网络形成。可能原因在于,产业结构高级化水平表征产业结构优势,对降碳表现为显著正外部性,且差距越小,城市间产业发展结构越相似,越有可能实现要素的跨区域流动^[30] 增强区域间的空间关联。此外当城市间能耗强度差异越大时,能源跨城消费频繁,碳排要素流动加快,城市间空间关联网络越紧密。②经济发展水平差异通过 5% 水平的检验且系数为负。相近的经

济发展水平导致发展模式、产业和能源结构等产生相同需求,刺激区域间的要素流动,从而增强区域空间网络关联性。③地理距离、人口密度通过 1% 水平的检验。其中地理距离系数为负,原因在于城市间距离越近时,要素流动和经济联系成本越低,越有利于城市间经济来往,增强空间关联。人口密度系数为正,可能原因在于人口引起能源消耗,人口密度高往往需要向外获取能源,进而推动跨城资源流动。④耕地、林地、建设用地、灌木面积比例差异均通过 1% 的水平检验,草地面积比例差异则通过 5% 的水平检验,且系数为负。表明城市间土地利用结构差异越大时,净碳汇空间关联网络联系越弱。可能原因在于,土地利用结构受资本、能源以及其他资源投入的影响,城市间土地利用结构相似导致相似的经济发展模式,从而促使产业合作、资源要素的流动加剧,产生更强的空间联系。⑤城镇化水平和粮食产量差异对长江经济带净碳汇空间网络的形成没有显著影响。

表 7 长江经济带非参数估计模型(QAP)回归分析结果
Table 7 Quadratic assignment procedure (QAP) regression analysis results in Yangtze River economic belt

变量名称	非标准化回归系数	标准化回归系数	ρ 值
经济发展水平	-0.218 375	-0.020 829	0.017**
产业结构高级化	-0.255 858	-0.013 587	0.075*
城镇化水平	-0.130 835	-0.004 984	0.179
能源消费强度	0.257 692	0.012 320	0.072*
地理距离	-2.063 430	-0.267 460	0.000***
人口密度	4.217 904	0.389 351	0.000***
粮食产量	0.202 930	0.009 307	0.131
耕地面积比例	-1.227 535	-0.139 533	0.005***
林地面积比例	-1.152 158	-0.148 101	0.008***
草地面积比例	-0.632 202	-0.033 470	0.038**
建设用地比例	-0.672 439	-0.062 842	0.006***
灌木面积比例	-1.136 644	-0.126 171	0.000***
R^2	0.233		
Adj R^2	0.233		
样本量	16 770		

注:***表示在 1%的水平上显著; **表示在 5%的水平上显著; *表示在 10%的水平上显著。

3 讨论

(1) 从长江经济带区域整体看,2001—2021 年区域碳排放总量呈现持续上升趋势,碳汇总量呈现出波浪式增长态势,而净碳汇始终为负值,表明该区域整体处于碳失衡的状态,与已有研究结果相契合^[30-31]。长江经济带作为中国经济发展的重要引擎,研究期内高能耗的产业结构与能源结构致使能源、产业梯度转型慢;而与碳汇相关的用地结构呈现小幅度波动变化。市域尺度下,各城市碳排放呈现“东高西低”分布,上海和重庆碳排放量处于最高等级,而碳汇呈现“西高东低”特征,与现有研究相一致^[32-33]。净碳汇与经济发展水平的空间分布高度吻合,表明区域内经济、生态和社会发展不平衡、不充分特征依然显著。因此,实现长江经济带区域碳减排需要综合考虑各城市的功能定位与规划,充分利用各城市区位、生态本底和资源优势,加强区域协同发展,实现各城市碳排放权以及减排责任的平衡。

(2) 2021 年长江经济带净碳汇空间关联网络整体呈现“东密西疏”格局,形成以“重庆市”和“上海市”双核心的网络化结构。个体特征表现为上海市、重庆市等关键节点城市在净碳汇空间关联网络中起主导作用,反映了区域发展的不平衡性。因此,实现长江经济带区域协同减排和协调发展,需要充分考虑各城市净碳汇的空间关联及其在网络中的地位角色,通过

产业合作、技术转移、资源共享以及碳补偿等方式实现各城市的优势互补和长江经济带整体碳减排效益的提升。

(3) 依据各城市在网络中位置和角色差异划分净溢出板块、双向溢出板块、经纪人板块和净受益板块。各板块内部关联相对较弱,但跨板块的溢出关系较为明显。一方面,随着长江经济带一体化发展,各城市经济要素等的流动促进网络的形成;另一方面,净碳汇仍旧依托产业、交通和贸易等经济社会活动产生联系,具有明显的地域特征。不同板块城市应建立长效合作机制,净溢出板块应发挥引导作用,加大碳减排投入,增强降碳增汇的引领作用;双向溢出板块作为净碳汇空间网络的重要节点,需要充分发挥碳减排引领和辐射效应。经济发展水平较高的城市,应主动承担碳减排责任,发挥资本、技术等优势,加强减排技术扩散,实现区域深度合作。净受益板块和经纪人板块应充分融入网络中,加强与其他城市的交流与合作。

(4) 各城市经济发展水平、产业结构、能源强度、地理距离、人口密度以及不同土地利用结构(耕地、林地、草地、灌木和建设用地)是长江经济带净碳汇关联网络形成的驱动因素。当前,长江经济带净碳汇空间关联网络仍以碳排放相关的经济社会活动为主要联系方式,表明各城市经济发展与碳排放间的钩连效应仍旧显著,科技增汇和技术降碳存在较强的滞后性且效益不足。因此,对于生态本底殷实的欠发达城市,应当结合自身资源禀赋,积极发展绿色环保产业,避免过度开发破坏市域的生态承载力,并加强与发达城市的技术交流与合作,引进绿色低碳技术实现固碳、增汇与降碳的同步推进。对于碳失衡的发达城市,可以充分发挥自身的资本、技术优势,加大绿色低碳技术的研发与投入,发挥低碳技术扩散的减排辐射效应。同时通过产业合作与分工实现深度合作,提高净碳汇空间关联性,实现碳减排的规模效应。

4 结论

(1) 2001—2021 年长江经济带碳排放总量持续上升,空间上呈现“东高西低”特征;碳汇总量呈现波动上升趋势,空间上呈现“西高东低”特征;而净碳汇在研究期内持续下降,在空间上呈现“西高东低”。

(2) 2021 年长江经济带净碳汇空间网络总体呈现“东密西疏”特征,形成“重庆市”和“上海市”双核心网络格局。区域整体网络联系密集,网络等级梯度明显,但网络结构稳定性较差。其中上海市、重庆市等关键节点城市对其他城市有着较强支配力。

(3) 长江经济带净碳汇空间网络中,各城市网络地位和位置存在差异,可划分为净溢出板块、双向溢出板块、经纪人板块和净受益板块。各板块内部关联较松散,而跨板块溢出关系较为明显。

(4) QAP 回归结果表明,经济发展水平、产业结构高级化、能源消费强度、地理距离、人口密度,以及不同土地利用结构等差异均会对长江经济带净碳汇空间网络关联性产生显著影响。而城镇化水平和粮食产量差异的影响并不显著。

参考文献(References)

- [1] 郝吉明,王金南,张守攻,等.长江经济带生态文明建设若干战略问题研究[J].中国工程科学,2022,24(1):141-147.
Hao Jiming, Wang Jinnan, Zhang Shougong, et al. Several strategic issues for the construction of ecological civilization in Yangtze River economic belt [J]. Strategic Study of CAE, 2022,24(1):141-147.
- [2] 杨庆,张凤太,孙长城,等.非协调耦合视角下长江经济带高质量发展与生态保护的时空特征[J].水土保持通报,2021,41(3):238-246,257.
Yang Qing, Zhang Fengtai, Sun Changcheng, et al. Temporal and spatial differentiation characteristics of high-quality development and ecological protection in Yangtze River economic belt from perspective of non-coordinated coupling [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):238-246,257.
- [3] 闫华飞,杨美,肖静.长江经济带发展战略促进了区域碳减排吗?:基于双重差分模型的检验[J].长江流域资源与环境,2023,32(06):1138-1151.
Yan Huafei, Yang Mei, Xiao Jing. Does development strategy of Yangtze River economic belt promote regional carbon emission reduction?: Tests based on difference-in-differences model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(6):1138-1151.
- [4] 黄庆华,时培豪,胡江峰.产业集聚与经济高质量发展:长江经济带 107 个地级市例证[J].改革,2020(1):87-99.
Huang Qinghua, Shi Peihao, Hu Jiangfeng. Industrial agglomeration and high-quality economic development: Examples of 107 prefecture-level cities in the Yangtze River economic belt [J]. Reform, 2020(1):87-99.
- [5] 田容至,曹高航,项松林,等.长江经济带区域创新创业能力对碳排放的影响及空间效应研究[J].长江流域资源与环境,2023,32(7):1365-1378.
Tian Rongzhi, Cao Gaohang, Xiang Songlin, et al. Research on influence and spatial effect of innovation and entrepreneurship on carbon emissions in Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(7):1365-1378.
- [6] 李强.正式与非正式环境规制的减排效应研究:以长江经济带为例[J].现代经济探讨,2018(5):92-99.
Li Qiang. A research on emission reduction effects of formal and informal environmental regulation: Taking the Yangtze River economic belt as an example [J]. Modern Economic Research, 2018(5):92-99.
- [7] 黄德春,沈雪梅,竺运.长江经济带制造业碳排放效率的时空演变及影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2023,32(6):1113-1126.
Huang Dechun, Shen Xuemei, Zhu Yun. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emission efficiency of manufacturing industry in Yangtze River economic belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(6):1113-1126.
- [8] 黄汉志,贾俊松,刘淑婷,等.2000—2020 年长江经济带碳汇时空演变及影响因素分析[J].环境科学研究,2023,36(8):1564-1576.
Huang Hanzhi, Jia Junsong, Liu Shuting, et al. Analysis of spatial-temporal evolution and influencing factors of carbon sinks in Yangtze River economic belt from 2000 to 2020 [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(8):1564-1576.
- [9] 黎振强,周秋阳.产业结构升级是否有助于促进碳减排:基于长江经济带地区的实证研究[J].生态经济,2021,37(8):34-40,111.
Li Zhenqiang, Zhou Qiuyang. Does the upgrading of industrial structure help promote carbon emission reduction: An empirical research based on the Yangtze River economic belt [J]. Ecological Economy, 2021,37(8):34-40,111.
- [10] 义白璐,韩骥,周翔,等.区域碳源碳汇的时空格局:以长三角地区为例[J].应用生态学报,2015,26(4):973-980.
Yi Bailu, Han Ji, Zhou Xiang, et al. Spatiotemporal pattern of carbon sources and sinks in Yangtze River Delta region, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(4):973-980.
- [11] 谢永浩,刘争.中国省域种植业碳汇量、碳排放量的时空分异及公平性研究[J].世界农业,2022(2):100-109.
Xie Yonghao, Liu Zheng. Study on the temporal and spatial differentiation and equity of carbon sink and carbon emission of China's provincial planting industry [J]. World Agriculture, 2022(2):100-109.
- [12] 杨国清,朱文锐,文雅,等.20 年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究[J].生态环境学报,2019,28(2):332-340.
Yang Guoqing, Zhu Wenrui, Wen Ya, et al. Spatial differentiation in the intensity and efficiency of carbon emission from land use in Guangdong Province in past two decades [J]. Ecology and Environmental Sciences,

- 2019,28(2):332-340.
- [13] 赵宁,周蕾,庄杰,等.中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J].生态学报,2021,41(19):7648-7658.
Zhao Ning, Zhou Lei, Zhuang Jie, et al. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(19):7648-7658.
- [14] 张梅,赖力,黄贤金,等.中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究[J].资源科学,2013,35(4):792-799.
Zhang Mei, Lai Li, Huang Xianjin, et al. The carbon emission intensity of land use conversion in different regions of China [J]. *Resources Science*, 2013,35(4):792-799.
- [15] 何勇.中国气候、陆地生态系统碳循环研究[M].北京:气象出版社,2006.
He Yong. Study on the Carbon Cycle of Climate and Terrestrial Ecosystems in China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [16] 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. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013,28(8):1298-1309.
- [17] 郑云,黄杰.中国农业生态效率空间关联网络特征及其驱动因素研究[J].经济经纬,2021,38(6):32-41.
Zheng Yun, Huang Jie. A study on the characteristics and driving factors of spatial correlation network of agricultural ecological efficiency in China [J]. *Economic Survey*, 2021,38(6):32-41.
- [18] Zhang Renjie, Tai H, Cheng Kuotai, et al. Carbon emission efficiency network formation mechanism and spatial correlation complexity analysis: Taking the Yangtze River economic belt as an example [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,841:156719.
- [19] Yu Ziqi, Chen Longqian, Tong Haixia, et al. Spatial correlations of land-use carbon emissions in the Yangtze River delta region: A perspective from social network analysis [J]. *Ecological Indicators*, 2022,142:109147.
- [20] 王奕淇,甄雯青.中国省际碳排放绩效空间关联效应及影响因素研究[J/OL].生态学报,2024,(16):1-15 [2024-09-09]. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202401020005>.
Wang Yi qi, Zhen Wenqing. Spatial correlation effect and influencing factors of provincial carbon emission performance in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,(16):1-15 [2024-09-09]. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202401020005>.
- [21] 冯颖,侯孟阳,姚顺波.中国粮食生产空间关联网络的结构特征及其形成机制[J].地理学报,2020,75(11):2380-2395.
Feng Ying, Hou Mengyang, Yao Shunbo. Structural characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of grain production in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75(11):2380-2395.
- [22] Rong Tianqi, Zhang Pengyan, Li Guanghui, et al. Spatial correlation evolution and prediction scenario of land use carbon emissions in the Yellow River basin [J]. *Ecological Indicators*, 2023,154:110701.
- [23] 尹剑,龙焱焱,姜洪涛.珠江流域城市工业碳排放效率的空间关联网络特征与影响因素[J/OL].环境科学:1-15 [2024-07-11]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202312121>.
Yin Jian, LONG Yaoyao, JIANG Hong-tao. Spatial Correlation Network Characteristics and Influencing Factors of Industrial Carbon Emission Efficiency of Cities in Pear River basin [J/OL]. *Environmental Science*: 1-15 [2024-07-11]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202312121>.
- [24] 胡景心,沙青娥,刘慧琳,等.珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素[J].环境科学,2023,44(12):6643-6652.
Hu Jingxin, Sha Qing'e, Liu Huilin, et al. Evolution characteristics and driving forces of carbon dioxide emissions and sinks in the Pearl River delta region, China [J]. *Environmental Science*, 2023,44(12):6643-6652.
- [25] 王少剑,黄永源.中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素[J].地理学报,2019,74(6):1131-1148.
Wang Shaojian, Huang Yongyuan. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019,74(6):1131-1148.
- [26] 陈红梅,张彩莉,李建豹.长三角地区新型城镇化对城市土地绿色利用效率的影响及空间效应[J].长江流域资源与环境,2024,33(7):1382-1396.
Chen Hongmei, Zhang Caili, Li Jianbao. Research on influence and spatial effect of new-type urbanization on urban land green use efficiency in the Yangtze River delta region [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024,33(7):1382-1396.
- [27] 詹绍奇,张旭阳,陈孝杨,等.2000—2020年淮南矿区土地利用变化对碳源/碳汇时空格局的影响[J].水土保持通报,2023,43(3):310-319.
Zhan Shaoqi, Zhang Xuyang, Chen Xiaoyang, et al. Effects of landuse change on spatial and temporal patterns of carbon sources/sinks in Huainan mining area from 2000 to 2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(3):310-319.

- mation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000 [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 37(6):804-812.
- [22] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5):687-699. Xie Xianli, Sun Bo, Zhou Huizhen, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5):687-699.
- [23] 王晓, 于兵, 李继红. 土地利用和土地覆被变化对土壤有机碳密度及碳储量变化的影响: 以黑龙江省大庆市为例[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 49(11):76-83. Wang Xiao, Yu Bing, Li Jihong. Effects of land use and land cover change on soil organic carbon density and carbon storage: A case study of Daqing, Heilongjiang Province [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(11):76-83.
- [24] Li Yonghua, Jiang Hezhou, Zhang Bo, et al. Comparative evaluation of multi-scale spatiotemporal variability and drivers of carbon storage: An empirical study from 369 cities, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110568.
- [25] 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. Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [26] 李晨欣, 陈松林, 李晶, 等. 基于“三生”空间的土地利用冲突时空演变特征研究: 以厦门、漳州和泉州城市群为例[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3):247-254. Li Chenxin, Chen Songlin, Li Jing, et al. Evolution of Spatio-temporal characteristics of land use conflict based on Productional-living-ecological space: A case study at Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou urban agglomeration [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3):247-254.
- [27] 万沛钰, 徐国良, 万春燕. 乡村旅游地土地利用功能结构演变及模拟: 以江西省三坪村为例[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(9):1769-1782. Wan Peiyu, Xu Guoliang, Wan Chunyan. Evolution and simulation of land use functional structure in rural tourism destinations: A case study of Sanping Village in Jiangxi Province [J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(9):1769-1782.
- [28] 李焕. 农地边际化研究导论: 新理论、新方法、新思路 [M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2023. Li Huan. Introduction to the Study of Marginalization of Agricultural Land: New theories, New methods, and New ideas [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2023.
- ~~~~~
- (上接第 326 页)
- [28] 潘竟虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应[J]. *地理学报*, 2021, 76(1):206-222. Pan Jinghu, Zhang Yongnian. Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1):206-222.
- [29] 吉雪强, 刘慧敏, 张跃松. 中国省际土地利用碳排放空间关联网络结构演化及驱动因素[J]. *经济地理*, 2023, 43(2):190-200. Ji Xueqiang, Liu Huimin, Zhang Yuesong. Spatiotemporal evolution and driving factors of spatial correlation network structure of China's land-use carbon emission [J]. *Economic Geography*, 2023, 43(2):190-200.
- [30] 郭爱君, 张传兵. 数字经济如何影响碳排放强度?: 基于产业结构高级化与合理化的双重视角[J/OL]. *科学与科学技术管理*, 1-28[2024-09-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1117.G3.20231130.1033.004.html>. Guo Aijun, Zhang Chuanbing. How does the digital economy affect the intensity of carbon emissions?: Based on the dual perspectives of industrial structure upgrading and rationalization [J/OL]. *Science and Management of S. & T.*, 1-28[2024-09-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1117.G3.20231130.1033.004.html>.
- [31] 张娜, 孙芳城, 胡钰苓, 等. 长江经济带三大城市群土地利用碳排放的区域差异及空间收敛性[J]. *环境科学*, 2024, 45(8):4656-4669. Zhang Na, Sun Fangcheng, Hu Yuling, et al. Regional difference and spatial convergence of land use carbon emissions in three urban agglomerations of Yangtze River economic belt [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8):4656-4669.
- [32] 侯瑞萍, 夏朝宗, 陈健, 等. 长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(23):9483-9498. Hou Ruiping, Xia Chaozong, Chen Jian, et al. Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River economic belt [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23):9483-9498.
- [33] 史娜娜, 肖能文, 王琦, 等. 长江经济带生态系统格局特征及其驱动力分析[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(11):1779-1789. Shi Nana, Xiao Nengwen, Wang Qi, et al. Spatial pattern of ecosystems and the driving forces in the Yangtze River economic zone [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(11):1779-1789.