

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.05.029

CSTR:32310.14.stbxb.2025.05.029

张兴辉,张坤,范廷玉,等.面向SDGs的安徽省碳生态补偿空间网络与分区治理[J].水土保持学报,2025,39(5):335-348.

ZHANG Xinghui, ZHANG Kun, FAN Tingyu, et al. Carbon ecological compensation network and zone management in Anhui Province under SDGs [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 335-348.

面向SDGs的安徽省碳生态补偿空间网络与分区治理

张兴辉^{1,2}, 张坤^{1,2}, 范廷玉^{2,3}, 张震^{1,2}, 徐良骥^{1,2}, 王万莉¹

(1.安徽理工大学空间信息与测绘工程学院,安徽淮南232001;2.煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室,安徽淮南232001;3.安徽理工大学地球与环境学院,安徽淮南232001)

摘要: [目的] 在“双碳”目标与可持续发展背景下,探究区域碳生态补偿机制对平衡土地开发利用过程中经济发展与生态保护之间矛盾具有重要意义。[方法] 以安徽省为研究对象,构建“时空分异-网络关联-补偿分区”的系统框架,结合网络分析法、碳生态补偿模型和熵权-TOPSIS等方法,通过K-means算法建立基于可持续发展目标(SDGs)下的差异化碳补偿方案。[结果] 1)研究期内安徽省土地利用碳排放显著增长且空间差异显著,整体表现为“北高南低、东高西低”的空间分布特征。2)区域碳关联网络逐步形成以合肥为核心,芜湖、马鞍山和淮南为主要节点的“核心-边缘”结构且整体网络特征在持续增强。3)碳补偿价值空间差异明显,总计碳支付、碳受偿金额分别为 109.89×10^8 、 25.23×10^8 元,确定7个支付区和10个受偿区。4)结合城市的可持续发展,最终形成7类碳综合生态补偿管理分区,并针对每一类型区提出“梯度补偿-协同治理”的差别化碳生态补偿建议。[结论] 研究结果为协调区域碳公平、推动“双碳”目标与SDGs协同发展提供借鉴,对完善跨区域生态补偿政策具有参考价值。

关键词: 土地利用碳排放; 空间关联网络; 碳生态补偿; SDGs

中图分类号: X171; X32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2025)05-0335-14

Carbon Ecological Compensation Network and Zone Management in Anhui Province under SDGs

ZHANG Xinghui^{1,2}, ZHANG Kun^{1,2}, FAN Tingyu^{2,3}, ZHANG Zhen^{1,2}, XU Liangji^{1,2}, WANG Wanli¹

(1.School of Spatial Informatics and Geomatics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2.State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Huainan, Anhui 232001, China; 3.School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: [Objective] Against the backdrop of the dual-carbon goals and sustainable development, this study investigates the critical role of regional carbon ecological compensation mechanisms in addressing the conflict between economic development and ecological preservation during land development and utilization. [Methods] Focusing on Anhui Province, this study constructed a systematic framework of "spatiotemporal differentiation-network connectivity-compensation zoning". Using network analysis, carbon ecological compensation modeling, and the entropy weight-TOPSIS method, a differentiated carbon compensation scheme based on Sustainable Development Goals (SDGs) was established through the K-means algorithm. [Results] 1) During the study period, land-use carbon emissions in Anhui Province increased significantly with notable spatial differences, demonstrating an overall spatial distribution of "high-north-low-south, high-east-low-west". 2) The regional carbon association network gradually formed a "core-periphery" structure centered on Hefei, with Wuhu, Ma'anshan, and Huainan as the main nodes, and the overall network connectivity continued to strengthen. 3) The

收稿日期:2025-03-04

修回日期:2025-04-02

录用日期:2025-04-15

网络首发日期(www.cnki.net):2025-05-27

资助项目:安徽省高校科学研究项目(2023AH051208, 2023AH010025);煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室开放基金项目(SKLMRDPC21KF19);安徽理工大学高层次人才引进基金项目(2023yjrc43)

第一作者:张兴辉(2002—),男,硕士研究生,主要从事碳收支与碳补偿研究。E-mail:2023201605@aust.edu.cn

通信作者:张坤(1985—),男,博士,讲师,主要从事矿区生态修复研究。E-mail:chzk@aust.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

spatial variation in carbon compensation values was significant, with total carbon payments and carbon compensation amounts reaching 109.89×10^8 yuan and 25.23×10^8 yuan, respectively. Seven payment zones and ten compensation zones were identified. 4) In line with urban sustainable development, seven types of carbon-integrated ecological compensation management zones were formed. For each type, differentiated strategies of "gradient compensation-collaborative governance" were proposed. [Conclusion] The findings offer insights for enhancing regional carbon equity and promoting the coordinated development of the dual-carbon goals and the SDGs, serving as a reference for improving cross-regional ecological compensation policies.

Keywords: land-use carbon emissions; spatial association network; carbon ecological compensation; SDGs

Received: 2025-03-04

Revised: 2025-04-02

Accepted: 2025-04-15

Online(www.cnki.net): 2025-05-27

为应对气候变化给人类发展带来的挑战,解决社会、经济和环境 3 个维度的发展问题,2015 年联合国提出《2030 年可持续发展议程》^[1],建立包括 17 个目标、169 个具体目标的发展框架,以实现人与自然的和谐共处。其中,“负担得起的清洁能源”(SDG7)、“工业、创新和基础设施”(SDG9)、“可持续城市和社区”(SDG11)、“负责任的消费和生产”(SDG12)和“气候行动”(SDG13)都与碳减排密切相关。然而,在城市化与工业化双重驱动下,碳排放仍在增加,并对气候变化产生重大影响。目前,国内外关于碳减排研究中,土地利用/覆盖变化(LUCC)涉及的碳排放相关问题已成为应对气候变化的重点,有研究^[2]表明,LUCC 对碳排放/碳吸收有显著影响,其作用力仅次于化石燃料燃烧。因此,如何通过土地空间治理优化,协调开发强度与生态环境的耦合关系,已成为实现“双碳”目标与可持续发展目标 SDGs 协同治理的关键。

碳补偿作为可以缓解经济发展与环境保护之间矛盾、促进区域低碳协同发展的重要工具,其理论与实践应用已得到广泛的研究^[3]。其本质是通过建立“碳排放核算-生态付费”的量化交易体系,将土地利用碳排放(LUCE)的外部性内部化,用于更好地规划区域碳排放^[4]。在理论方面,现有研究主要集中于森林^[5]、农田、流域^[6]和湿地等生态系统,通过碳汇价值评估、补偿意愿测算^[7]和生产活动中碳汇的盈亏^[8]等角度来实现碳生态补偿价值货币量化。而在实践中,国际上已形成欧盟碳排放交易体系^[9]、REDD+森林碳汇^[10]和生态服务付费等市场形式,并证明通过合理的补偿标准可有效抑制建设用地扩张,同时激励生态空间提质增效。国内参考其交易方式,按照责任共担、环境共治、效益共享原则,建立黄河流域横向补偿机制^[11]、长三角碳普惠交易^[12]等一系列政策,通过财政转移支付,弥补碳汇功能区因环境保护而陷入的发展困境,进一步验证跨区域协同减排的可行性。然

而,现有的研究多局限于静态碳核算与双边补偿模式,忽视不同地区之间经济水平和资源禀赋的差异,难以反映区域碳排放的时空异质性。与森林、农田、流域和湿地等具有明确损益关系补偿对象界定形式不同的是,由于城市之间存在着跨区域产业转移、技术扩散和人口流动等碳要素的物质交换,使每个城市的碳排放在交换过程中容易受到其他城市的影响^[13]。因此,在界定补偿主体标准时,应当充分考虑城市碳排放空间网络中的节点中心性与空间溢出效应,以实现“污染者付费”与“受益者补偿”的精准匹配。

基于此,本研究从城市 SDGs 治理视角出发,充分考虑城市的发展需要,以 LUCE 的空间分异为切入点,构建“时空分异-网络关联识别-补偿分区优化”的系统框架。通过探究 LUCE 的时空分异规律,量化碳排放空间关联网络的溢出效应,构建差异化碳补偿分区方案,为实现“双碳”目标和推动城市可持续发展提供建议及政策参考。本研究的创新点在于揭示 LUCC 驱动下 LUCE 的长时序时空演变特征;将城市之间的碳流动引入到跨区域碳补偿研究,突破传统地理邻近性假设;建立差别化的碳补偿分区方案,提升政策设计的空间适配性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安徽省位于中国东部,省会合肥市,辖 16 个地级市,总面积 14.01 万 km^2 。东部与长三角城市群相接,西部连接中部经济带,是长江经济带与淮河生态走廊的交会区($29^{\circ}41' \sim 34^{\circ}38' \text{ N}$, $114^{\circ}54' \sim 119^{\circ}37' \text{ E}$) (图 1),具有工业转型与生态保护的双重任务。全省地形由平原、丘陵和山地构成。北部为淮北平原,是中国东部重要的产粮区和煤炭生产基地,承担着粮食安全与能源供给的重要职责;中部为江淮丘陵和长江沿岸平原,以水稻种植为主,是全省工业发展的核心区域,省内 10 个工业化程度较高的城市中有 8 个分布于此;南部山区以黄山、九华山等为代表,森

林覆盖率达 65.2%,构成长三角地区重要的生态屏障和碳汇核心区。

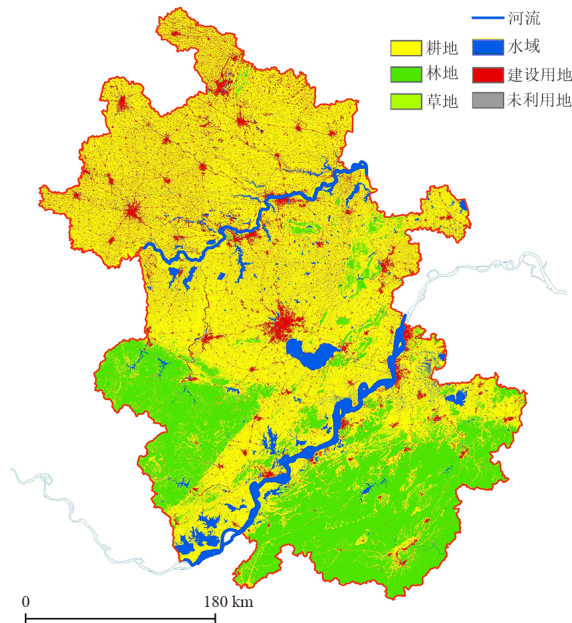


图 1 研究区土地利用类型
Fig. 1 Land use types in the study area

1.2 数据来源

土地利用数据来自武汉大学 CLCD 数据集^[14]。安徽省社会经济数据和能源消费数据主要来自安徽省统计年鉴和中国能源消费统计年鉴(<https://tjj.ah.gov.cn/>);道路、河流及行政区边界等矢量数据主要来自全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>)。

表 1 能源标准煤折算系数和碳排放系数

Table 1 Conversion coefficients for standard coal equivalent and carbon emissions										t/t
折算系数	原煤	洗精煤	焦炭	天然气	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	电力
标准煤换算系数	0.714 3	0.900 0	0.971 4	1.330 0	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	0.122 9
碳排放系数	0.755 9	0.755 9	0.855 0	0.447 9	0.585 7	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.793 5

1.3.2 碳排放社会网络分析

1)碳排放空间关联度测算。引力模型能深入刻画各区域之间的碳排放关联关系,量化区域碳排放关联网络的空间溢出效应,为跨区域碳生态补偿提供依据。然而,传统的引力模型无法适应 LUCE 的区域关联性与其它因素的流通性和不对称性^[13]。

本文对引力模型进行修正:第一,鉴于 2 个地区间的双向性和非对称性,通过调整碳排放比例来修正经验常数(K_{ij});第二,传统空间距离无法准确表达区域间的相互作用。因此,采用常住人口数量、GDP 和人均 GDP 等指标来衡量区域间的经济距离。修正后的引力模型表达式为:

1.3 研究方法

1.3.1 LUCE 的计算 基于碳排放-吸收角度,土地利用净碳排放量为碳源与碳汇之差。碳平衡率是指区域 LUCE 压力,等于碳源与碳汇的比值^[4]。结合现有研究,本文以耕地和建设用地 2 种土地利用类型作为主要碳源,把林地、草地、水域和未利用地当作碳吸收的载体。因此,土地利用净碳排放的计算公式为:

$$E_i = E_a + E_b = \sum_{k=1}^4 A_k \times \alpha_k + (B \times \mu + E_c) \quad (1)$$

$$CB = \frac{E_a}{E_b} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E_i 为第 i 个市的净碳排放量,万 t; CB 为碳平衡率,%; E_a 和 E_b 分别为碳吸收量与碳排放量,万 t; A_k 为第 k 种的土地利用类型(林地、草地、水域和未利用地)面积, hm^2 ; α_k 为第 k 种土地利用类型的碳吸收系数, t/hm^2 ; B 为耕地面积, hm^2 ; μ 为耕地的碳排放系数, t/hm^2 。基于已有研究^[15-16],耕地、林地、草地、水域和未利用地的碳排放(吸收)系数分别为 0.422、-0.644、-0.021、-0.253、-0.005 t/hm^2 (正值表示碳排放,负值表示碳吸收)。 E_c 为建设用地碳排放量,由于建设用地承载人类进行的各种生产活动,其产生的碳排放量需要通过能源消耗量来间接计算^[17]。

$$E_c = \sum_{j=1}^{10} m_j \times \beta_j \times r_j \quad (3)$$

式中: m_j 为第 j 种化石能源消费量, t; β_j 为折标煤系数, t/t ; r_j 为碳排放转换系数, t/t 。具体能源标准煤折算系数和碳排放系数见表 1。

$$M_{ij} = K_{ij} \frac{\sqrt[3]{P_i C_i G_i} \sqrt[3]{P_j C_j G_j}}{D_{ij}^2}$$
$$K_{ij} = \frac{C_i}{C_i + C_j} \quad D_{ij} = \frac{d_{ij}}{g_i - g_j} \quad (4)$$

式中: i 和 j 为城市; M 为 LUCE 空间联系强度; K_{ij} 为碳排放比例; P 为区域人口数量; G 为国内生产总值; D_{ij} 为各市间的经济距离,由 ArcGIS 软件测算出区域的球面距离(d_{ij})与人均 GDP 差值($g_i - g_j$)的比值,据此构建 LUCE 引力矩阵,每行取引力平均值作为比较值,将大于平均水平的记为 1,小于平均水平的记为 0,进而构建 0~1 矩阵。

2)社会网络分析法。社会网络分析法是借助网络关联模型将定性结构属性数据矩阵化,能清晰反

映城市在网络中的空间关联状况与网络地位^[18]。本文采用社会网络分析法,基于 0~1 矩阵,从整体网络特征和个体网络特征 2 个方面探究安徽省 LUCE 的空间关联网络特征。整体特征选取网络密度(ND)、网络关联度(C)、网络效率(E)、网络等级度(H)和最近上限(LUB)5 个指标,分别反映网络的紧密性、可达性、连接效率、层次性和协调能力。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,分别反映各个节点城市在网络中的地位、控制其他节点城市网络联接关系的程度及不受其他节点城市控制的程度^[19]。

3)修正模型的敏感性检验与对比分析。用第二产业占比替代人均 GDP,重新计算经济距离(D_{ij}),以及引入人口权重重新计算修正经验常数(K_{ij}),进一步验证不同参数的选择是否合理,是否导致网络关联强度的系统性偏差。结果显示,在替代参数下,其网络密度、节点中心性和网络效率等网络特征指标的波动幅度 $<15\%$,且安徽省以合肥市为核心,以淮南市、马鞍山市为中介的核心-边缘结构保持不变,表明修正模型能够稳定地反映区域碳流动的复杂交互关系。与传统地理距离模型($D_{ij}=d_{ij}$)相比,修正模型中淮南市对合肥市的关联强度为传统模型的 1.8 倍,而反向关联强度仅为 0.6 倍,与淮南市向合肥市输送能源的实际高度吻合。因此,修正后的引力模型通过引入经济距离与非对称因子,有效克服传统模型对地理邻近性的过度依赖,能够更科学地量化区域间碳排放的空间溢出效应,为跨区域补偿政策提供更精准的决策依据。

1.3.3 碳生态补偿模型 在碳中和目标下,根据区域碳排放与碳吸收的平衡状况确定补偿对象和标准,碳排放代表区域经济发展对生态的需求,碳吸收代表区域生态的供给能力,当供需平衡时实现碳中和^[20]。因此,现有补偿标准多基于静态碳赤字测算。具体模型为:

$$A_{ai} = CE_i \times P_c \quad (5)$$

式中: A_{ai} 为区域*i*的碳生态补偿额度,元; P_c 为单位碳的价格,元/t,来源于中国碳交易网(<http://www.tanjiaoyi.com>)安徽省的碳交易价格数据^[21]。

在现实情况中,传统静态核算方法未能纳入区域经济发展水平和资源禀赋的异质性特征,导致补偿主体与受偿主体的结构性失衡。基于生态公平原则,区域人口规模与土地面积应作为确定碳排放阈值的重要参数。因此,本文将在“2060 年的碳中和”远期目标下,以碳源/碳汇为碳生态补偿的基准值,依据区域经济发展水平与生态承载力的差异对碳

源/碳汇进行修正,进一步考虑区域的人口数量和土地面积来确定碳排放阈值^[4]。具体模型为:

1)碳源修正。碳排放强度与区域产业结构、能源利用效率和技术水平密切相关,其变化趋势反映城市的技术进步和经济增长。因此,本文基于区域碳排放强度差异对土地利用碳排放量进行修正,具体的计算公式为:

$$C_{ay} = CE_b \times \left[1 + \frac{(\gamma_i - \gamma_s)}{\gamma_s} \right] \quad (6)$$

式中: C_{ay} 为修正之后的碳排放量; γ_i 为区域*i*的碳强度,t/元; γ_s 为整个研究区的碳强度,t/元。

2)碳汇修正。由于不同区域存在显著的生态基底异质性,相较于生态优势区域,生态脆弱地区往往需要更高的生态治理成本以维持环境保护成效。生态系统服务价值(ESV)作为表征区域植被固碳、水土保持等生态功能的综合指标,能够有效反映这种空间异质性特征。因此,为确保碳生态补偿的公平性和合理性,本文基于 ESV 对土地利用碳吸收进行修正,具体的计算公式为:

$$C_{ah} = CE_a \times \left[1 + \frac{(ESV_s - ESV_i)}{ESV_s} \right] \quad (7)$$

式中: C_{ah} 为修正之后的碳吸收量; ESV_s 为整个研究区的单位面积 ESV 值,元/hm²; ESV_i 为区域*i*的单位面积 ESV 值,元/hm²。

3)碳生态补偿基准值修正。不同区域的资源禀赋差异对 LUCE 具有显著的影响,其中人口规模与土地面积作为区域资源禀赋特征关键要素,直接反映区域经济发展需求、碳排放总量控制及增量约束等发展压力。因此,本文通过引入人口-土地要素来确定不同区域的碳排放基准阈值,具体计算公式为:

$$C_v = CE \times \frac{P_i - M_i}{\sum (P_i \times M_i)} \quad (8)$$

式中: C_v 为区域*i*修正后的碳排放基准阈值,t;CE为区域碳排放总量; P_i 为区域*i*的人口数量,人; M_i 为区域*i*的土地面积,hm²。

基于对碳生态补偿模型的修正,最终得到具体碳生态补偿标准的计算公式为:

$$B_{ai} = (C_{ay} - C_{ah} - C_v) \times P_c \quad (9)$$

式中: B_{ai} 为修正后区域*i*的碳生态补偿额度,元。

1.3.4 可持续发展指标体系构建 经济发展促进碳排放增加,而碳排放增加阻碍可持续发展目标的实现。为实现减排和可持续的协同,本文对安徽省碳综合补偿类型区进行适应性管理分区。研究基于安徽省具体情况,选取与碳减排相关的 10 项 SDGs,构建包含社会经济、资源利用和生态环境 3 个子系统共

25 个评价指标的分析框架,用以评估城市可持续发展水平^[22]。

评价指标体系涵盖多个 SDGs 目标维度:为保障生态农业转型与粮食安全的协同发展(SDG2),纳入农业产值占比、农业机械总动力、人均粮食产量、人均耕地面积和单位耕地面积化肥施用量等指标(表 2)。在清洁能源应用与气候行动方面(SDG7/13),考察节能环保支出占比、单位 GDP 能耗和地均工业二氧化硫排放量。经济增长维度(SDG8)通过地均 GDP 和第

三产业占 GDP 比重进行衡量。可持续工业化与低碳技术创新(SDG9)则由第二产业占 GDP 比重、科学技术支出占比和人均道路面积等指标反映。城市可持续发展水平(SDG11)通过建成区绿化覆盖率、城镇化率、人口密度和人均公园绿地面积等指标进行评估。循环经济对减碳的贡献(SDG12)由单位 GDP 建设用地面积和工业固体废物综合利用率来表征。城市生态系统固碳潜力(SDG15)则通过土地利用程度综合指数、森林覆盖率和造林总面积等指标进行量化。

表 2 面向 SDGs 的城市可持续发展评价指标体系
Table 2 Evaluation index system for urban sustainable development under SDGs

系统层	准则层	指标层	单位	属性	对应目标
经济发展	经济水平	地均 GDP	万元/km ²	+	SDG8
		城镇化率	%	+	SDG11
		人口密度	人/km ²	+	SDG11
	经济结构	第二产业占 GDP 比重	%	+	SDG9
		第三产业占 GDP 比重	%	+	SDG8
		农业产值占比	%	+	SDG2
	经济投入	节能环保支出占比	%	+	SDG7/13
		科学技术支出占比	%	+	SDG9
		人均道路面积	m/人	+	SDG9
		农业机械总动力	kW	+	SDG2
资源安全	资源水平	人均粮食产量	t/人	+	SDG2
		人均耕地面积	hm ² /人	+	SDG2/15
		水资源利用效率	万元/(万 m ³)	+	SDG6
	资源利用	单位 GDP 建设用地面积	m ² /万元	-	SDG12
		单位 GDP 能耗	t/万元	-	SDG7/13
		土地利用程度综合指数		+	SDG15
生态环境	生态保护	建成区绿化覆盖率	%	+	SDG11/15
		人均公园绿地面积	m/人	+	SDG11
		森林覆盖率	%	+	SDG15
		造林总面积	hm ²	+	SDG15
	污染管理	地均工业二氧化硫排放量	t/km ²	-	SDG13
		地均工业废水排放量	t/km ²	-	SDG6/14
		工业固体废物综合利用率	%	+	SDG12
		污水处理率	%	+	SDG6
		单位耕地面积化肥施用量	t/hm ²	-	SDG2/15

熵权-TOPSIS 模型是一种多属性决策分析方法,能够定量地评价区域土地可持续发展水平,而 K-Means 聚类算法则将这些定量评价结果进一步划分为不同的类别,从而更客观地反映区域土地可持续发展水平差异,为区域土地可持续发展的分类管理提供科学依据。因此,本文采用熵权-TOPSIS 法计算区域与理想解的相对贴近度,结合 K-Means 聚类算法对贴近度进行非监督分类,通过轮廓系数确定 K-Means 聚类的 K 值,得到城市双核驱动型、协调发展型、资源依赖型及生态约束型 4 类功能分区。最后,结合碳生态补偿模型得出城市的碳综合生态补偿管理分区。

2 结果与分析

2.1 碳源/碳汇时空特征分析

由图 2 可知,2000—2023 年安徽省 LUCE 整体呈现明显增长趋势,从 2000 年的 2 640.18 万 t 增长至 2023 年的 13 598.55 万 t,增加 10 958.37 万 t,年平均增加 476.45 万 t。其中,建设用地是主要碳源,占 87%~97.5%。而耕地的碳排放较少,仅占 2%。其次,林地是主要碳汇,占总碳汇的 92.98%~93.56%,水域是仅次于林地的第 2 大碳汇,吸收量占总碳汇的 6.43%~7.01%。相比之下,草地和未利用地的碳汇量很小,基本可以忽略不计。因此,要实现减排增汇的目的依然要将重点放在遏制建设用地的扩张和保护林地上。

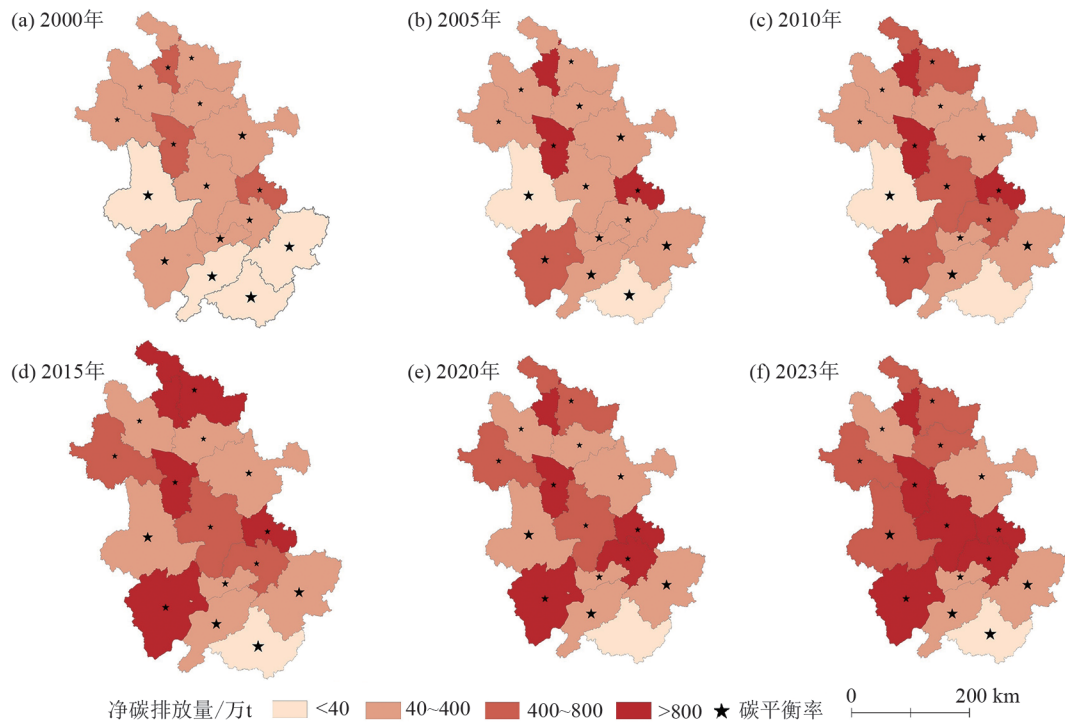


图2 安徽省典型年份 LUCE 和碳平衡率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of LUCE and carbon balance rate in typical years in Anhui Province

安徽省碳平衡率由8.71%降至1.83%，碳源与碳汇差距持续扩大，减排压力日益加剧。沿江城市带的合肥、芜湖等地区碳平衡率降幅尤为明显，从2000年的4.41%和3.81%分别降低至2023年的0.69%和0.59%。这种显著变化主要源于该区域承接长三角地区的高耗能产业转移，加之城市建设过程中大量占用林地和耕地等具有碳汇功能的生态用地，同时工业化进程加速带来能源消耗激增，导致碳排放量急剧上升的同时碳吸收能力持续下降。两淮地区由于能源结构以高碳能源为主，碳平衡率长期处于0.30%的低位水平。相比之下，皖南生态区凭借其65%左右的森林覆盖率等自然生态优势，始终保持着较高的碳平衡水平。这种区域分异特征凸显了安徽省在碳减排过程中面临的结构性挑战。

安徽省各地级市 LUCE 均呈稳定增长态势，其中年平均增长率达到17.94%，线性回归模型的 R^2 平均值超过0.75，显示出良好的趋势拟合效果(图3)。空间分布特征显示，淮南、淮北和马鞍山构成主要的碳排放集聚区，占全省 LUCE 总量的53.11%~55.61%。主要原因在于该区域长期存在的产业同质化现象导致经济结构严重依赖资源型产业，具有投入产出周期长、调整滞后的特征，不仅加剧结构刚性化程度，更形成高碳路径依赖与转型阻滞相互强化的恶性循环。

在区域整体高排放背景下，合肥市展现出特殊的低碳发展模式，其 LUCE 占比始终维持在5.50%~

6.48%，年平均增长率20.98%，显著低于同阶段165.34%的经济增速，这种碳排放增速与经济增长的弱脱钩现象，实证产业升级与土地集约化利用策略的有效性。与之形成对比的是，生态区位特殊的黄山市虽保持全省唯一的净碳汇地位，但其年平均43.35万t的碳吸收量，仅能抵消同期工业城市碳排放增量的2.10%，反映出单纯依靠自然生态系统碳汇功能难以应对工业化进程中的碳排放压力，必须构建多维度的碳治理体系。

2.2 碳排放空间关联网络结构特征分析

2.2.1 整体网络特征分析

安徽省内城市间 LUCE 空间关联特征呈现显著集聚特征，空间网络结构呈典型的“核心-边缘”分布形态(图4)。2000—2023年区域空间联系强度呈现爆发式增长，平均引力值从初始的0.058激增至257.06，增幅超过4 400倍。2000—2010年，区域空间关联网络逐渐形成以马鞍山、合肥和芜湖为核心的三角结构，分别与14、12、10个城市之间有直接联系。到2010—2023年，随着长江三角洲区域一体化发展，合肥作为长三角城市群的副中心，区域核心地位不断巩固，形成由多核并立转向单极主导的“核心-多节点”结构，与省内其余15个城市形成深度联动。在核心城市快速发展的同时，安庆与蚌埠、亳州与池州、宿州等城市之间的关联密度仍处于较低水平，在空间网络中主要承担接受辐射的外围角色，反映出区域协同发展仍存在显著空间差异。

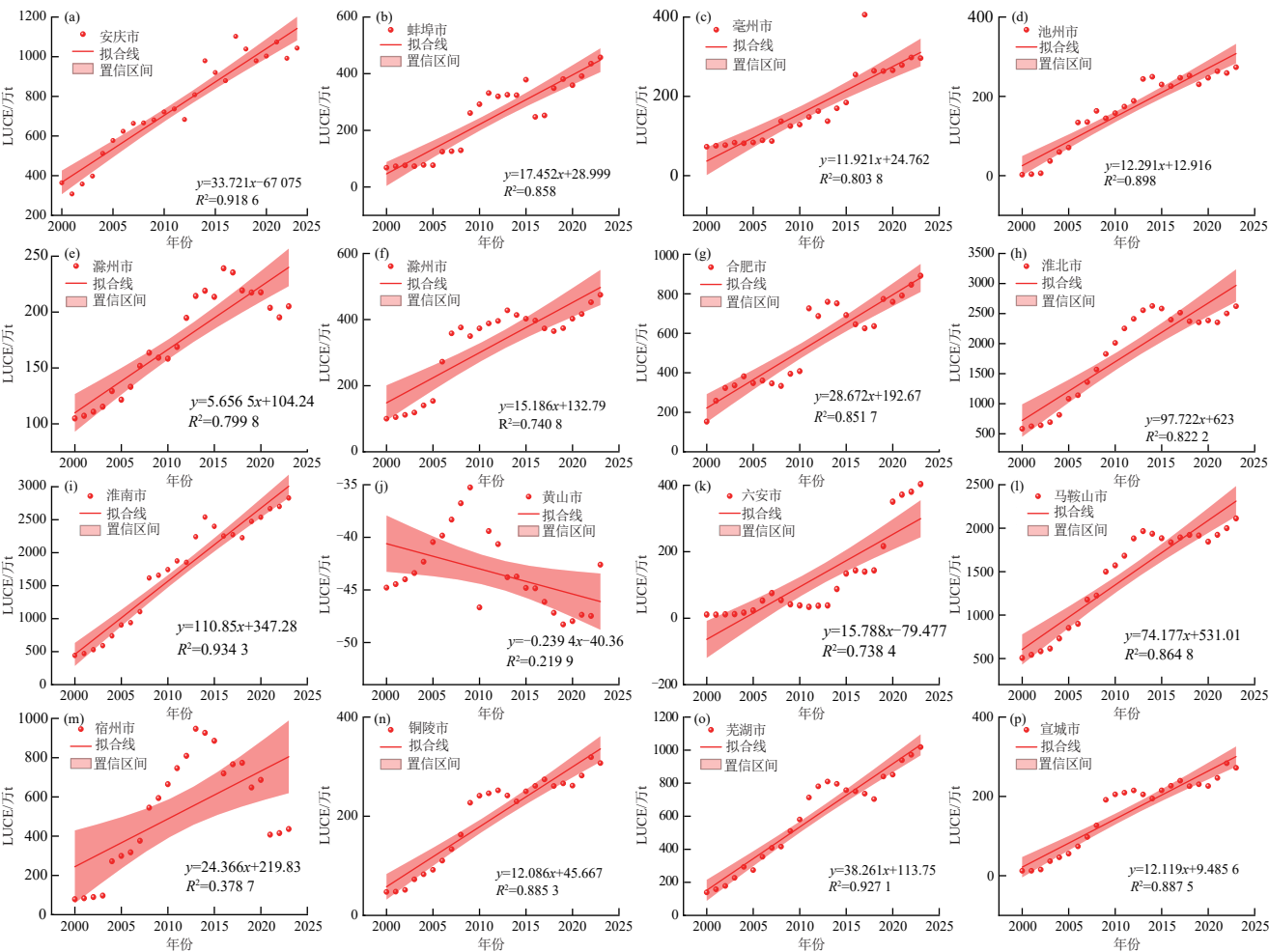


图 3 2000—2023 年安徽省地级市 LUCE 时间变化

Fig. 3 Temporal variation of LUCE in prefecture-level cities in Anhui Province from 2000 to 2023

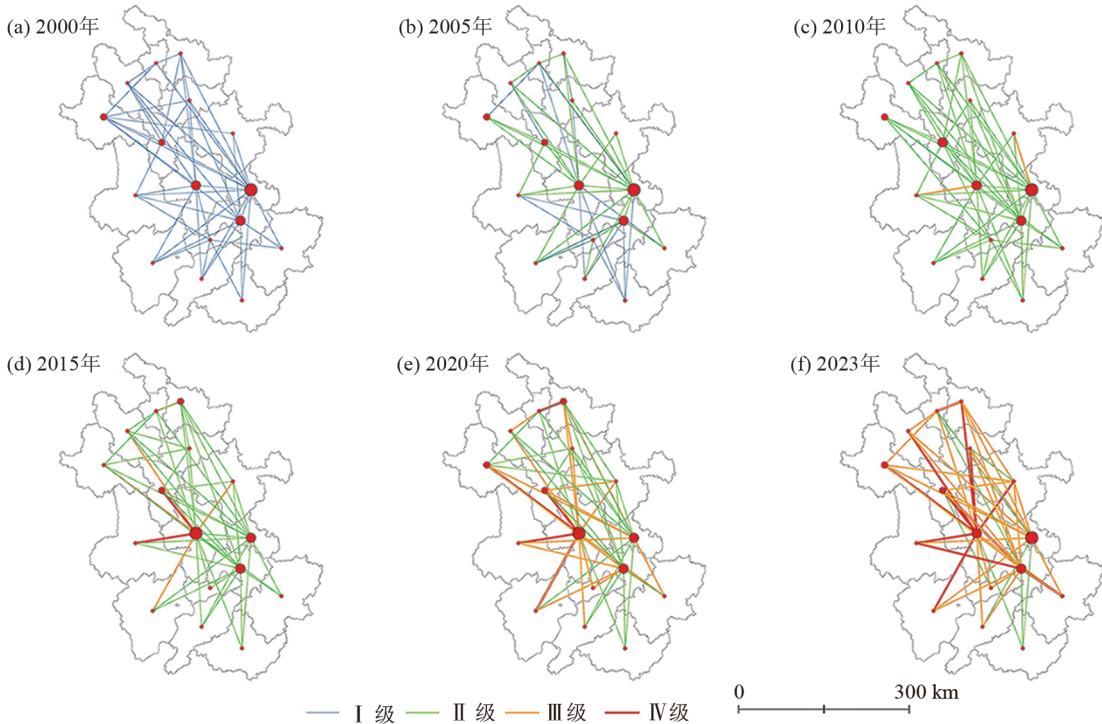


图 4 安徽省典型年份空间关联网

Fig.4 Spatial association network for representative years in Anhui Province

安徽省区域空间关联网络呈显著的空间协同效应(图5)。2000—2023年,LUCE网络的关联度始终保持为1,反映出安徽省已形成稳定网络结构。

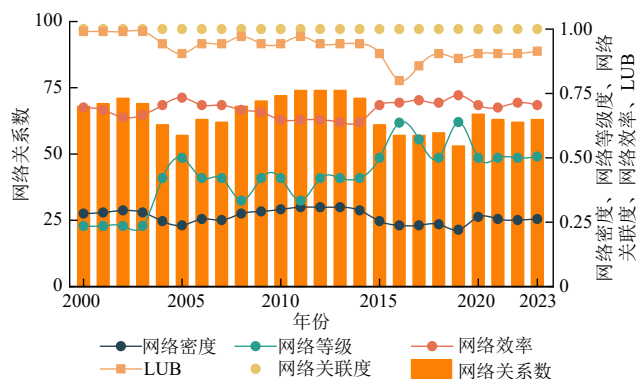


图5 安徽省LUCE空间关联整体网络特征

Fig. 5 Overall network characteristics of LUCE spatial association in Anhui Province

从图5还可看出,安徽省网络密度呈明显的阶段性波动特征,由2000年的0.283 3增加至2011年的0.308 3,随后逐渐回落至2023年的0.262 5。这种倒“U”形演变趋势暗示着城市间碳排放的交互强度正经历由集聚向扩散的动态调整,特别是边缘城市间的碳流动始终处于较低水平,显示出次级节点间的协同潜力尚未充分释放。网络等级、网络效率和LUB值均呈不同程度的增长趋势并维持在较高水平。这种看似矛盾的统计现象实际上揭示了核心城市主导作用持续强化的同时,区域碳排放治理体系正在发生结构性转变,逐步趋于扁平化。随着“双碳”目标的提出和“十四五”国土空间规划的落地实

施,安徽省碳排放管控体系经历深刻变革,网络关系数从2010年峰值的74个逐步减少至2023年的62个。

2.2.2 个体网络特征分析 安徽省LUCE体网络特征呈现显著层级结构特征(图6)。合肥、芜湖和马鞍山构成三角核心区,其点入度指标占据主导地位,三市点入度中心度合计占全省总量35%~43%,形成辐射全省的网络枢纽。淮北、淮南等皖北城市群表现出双向均衡特性,点入度与点出度保持动态平衡,在区域资源调配中发挥中介传导功能。皖南地区的黄山、宣城受地形阻隔与生态保护政策叠加影响,点入度小于点出度,在网络中呈边缘化特征。

安徽省点度中心度平均值从2000年的0.283 3逐渐降至2023年的0.262 5,呈“W”形下降趋势,但核心城市中心度在持续增强(图7)。合肥作为网络核心节点,在2015—2023年,其接近中心度平均值达94.77,较第2位城市高出12.11%,反映该市在网络可达性方面的优势。马鞍山虽在2010年后点度中心度下降13.9%,但这种结构性调整反而强化了合肥在区域网络中的核心地位。网络中介中心度呈现差异化演变,平均值由12.44降至8.06,但核心城市仍保持显著的中介优势:合肥、芜湖的中介效应指数始终高于区域平均值3.5倍,承担着跨区域要素流动的关键通道作用。总体而言,各中心性指标演变呈现同步强化现象,核心城市各项指标年平均增速达1.02%~1.34%,而边缘城市普遍出现0.65%~4.35%的负增长,这种正向反馈机制导致网络结构的“核心-边缘”差异持续扩大。

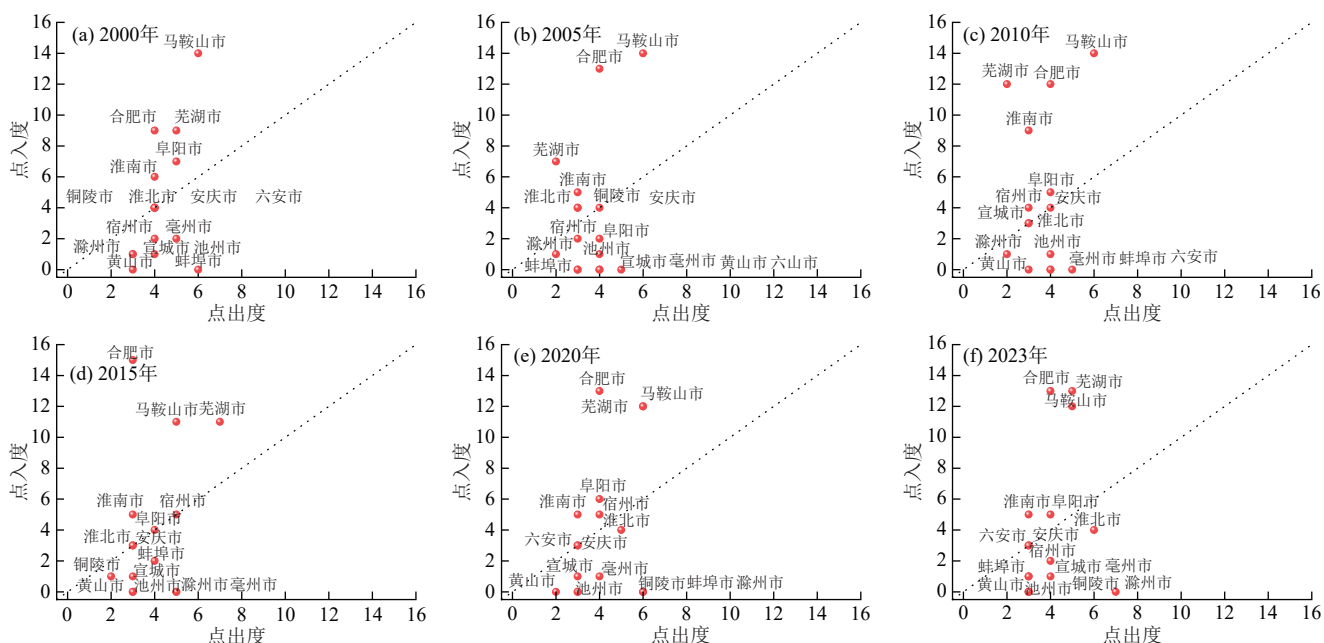


图6 安徽省LUCE点出度与点入度

Fig. 6 Out-degree and in-degree of LUCE nodes in Anhui Province

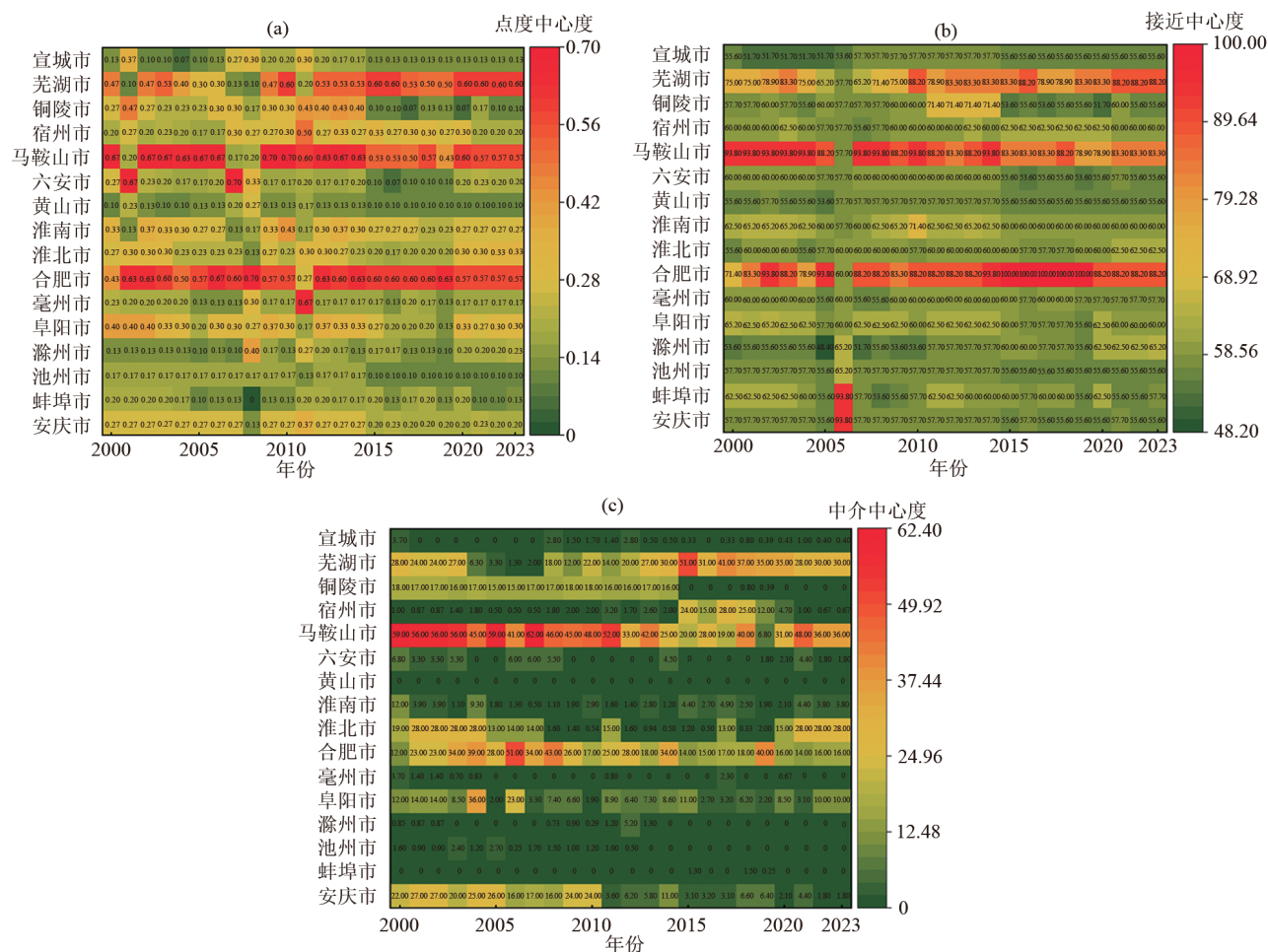


图7 安徽省LUCE空间关联个体网络特征

Fig. 7 Network characteristics of individual nodes in LUCE spatial association network in Anhui Province

2.3 碳生态补偿价值测算

2000—2023年,淮南、淮北、马鞍山等5个城市始终持续承担着生态补偿体系中的主要支付责任,并保持年平均4.99%~11.50%的稳定增幅(表3)。然而,占GDP比例却显著下降,达50.78%~85.09%,此消彼长的态势印证经济发展对生态补偿压力的缓冲效应。在支付区域内部,淮南与淮北2个城市的突出贡献尤为引人注目,二者的支付总额占比长期保持在70%以上。而铜陵、芜湖等城市的支付占比始终低于1.5%,直观反映不同城市之间产业结构和发展阶段的深度差异。合肥、蚌埠和黄山等8个城市已成为主要的受偿主体,其碳补偿的需求不断增加,年平均增长率为2.34%~12.53%,体现区域发展对低碳、绿色转型的迫切需求。值得注意的是,作为省会城市的合肥虽具有较高的LUCE,但考虑到其庞大的人口基数、经济总量及地域面积等现实条件,在补偿模型中仍保留适度的碳排放空间。经碳生态补偿模型修正后,合肥最终获得的补偿额度明显高于其他受偿城市,既体现补偿机制的科学性,也反映出政策对区域发展差异的包

容性。安庆、池州和宿州等城市由于LUCE始终处于生态承载阈值范围之内,所以该区域在支付方与受偿方之间的角色定位存在周期性波动。综上所述,在远期碳中和目标下,碳生态补偿模型在统筹区域发展差距、资源禀赋差异等方面展现出独特优势,其通过精确测算建立的动态调节机制,既维护补偿制度的公平性,又保障政策实施的有效性。

2.4 面向SDG的碳综合生态补偿管理分区的治理策略

安徽省各城市的可持续发展面临着经济发展不平衡、资源分布不均衡、生态承载力和经济发展能力不匹配、碳源/碳汇供需关系错配等问题。因此,为实现“双碳”与SDGs的协调发展,本文在碳补偿分区的基础上,叠加社会网络分析和城市可持续发展水平评价的实证结果(图8),构建“碳补偿-空间关联-城市可持续发展评价”的分析框架,将2023年安徽省划分为7类碳综合生态补偿管理分区,并提出相关治理策略(图9)。

芜湖市属于经济发展-支付型城市,占安徽省总面积的4.29%,在安徽省LUCE空间关联网络中起到

“中介”作用。芜湖市的社会经济系统评分达到0.60,仅次于合肥市,展现出较强的生态补偿支付能力。该市的LUCE仅次于淮南、淮北等工业主导型城市,区域内的碳排放量并未远超出其自身所能承受范围,甚至部分区域可通过内部调控达到经济与生态平衡状态。因此,芜湖市在承担支付补偿金额责任时,应当调整产业结构,提升绿色发展意识,通过城市内部更新、内涵挖潜等方式,实现土地集约高效利用。同时,需充分发挥空间联动优势,强化资源要素的区域辐射能力。

表 3 安徽省碳生态补偿标准及占 GDP 比例

Table 3 Carbon ecological compensation standards and corresponding proportion of GDP in Anhui Province

类型	城市	碳生态补偿/(10 ⁶ 元)						占 GDP 比例/(10 ⁻²)					
		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2023 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2023 年
支付区	淮北市	857.11	1 492.98	3 150.32	4 568.32	4 210.76	4 691.86	8.662	7.144	6.400	5.897	3.763	3.436
	淮南市	375.60	803.00	1 603.06	3 244.13	4 018.11	4 587.94	2.981	3.046	2.267	3.536	3.077	2.865
	马鞍山市	510.85	516.25	1 001.42	1 340.36	1 304.17	1 564.12	4.049	1.390	1.074	0.981	0.620	0.604
	铜陵市	5.93	7.97	40.73	20.64	35.86	48.99	0.081	0.044	0.089	0.029	0.036	0.040
	芜湖市	8.75	19.27	36.20	6.23	37.61	63.34	0.044	0.048	0.027	0.003	0.010	0.013
受偿区	蚌埠市	-17.32	-40.58	-36.59	-53.03	-59.31	-29.50	-0.108	-0.130	-0.054	-0.040	-0.029	-0.014
	亳州市	-46.06	-96.15	-176.32	-224.25	-211.16	-225.12	-0.230	-0.296	-0.191	-0.133	-0.078	-0.068
	滁州市	-60.29	-120.63	-232.40	-294.54	-298.49	-337.56	-1.037	-1.095	-0.744	-0.517	-0.350	-0.304
	阜阳市	-95.33	-182.26	-289.73	-396.72	-424.82	-449.45	-0.373	-0.556	-0.346	-0.219	-0.144	-0.119
	合肥市	-43.11	-87.37	-275.62	-457.84	-567.52	-651.17	-0.133	-0.102	-0.093	-0.079	-0.057	-0.051
	黄山市	-21.18	-36.29	-64.44	-79.41	-78.39	-83.86	-0.261	-0.227	-0.208	-0.147	-0.092	-0.080
	六安市	-130.07	-229.96	-398.87	-404.94	-321.28	-342.83	-0.761	-0.735	-0.649	-0.384	-0.192	-0.162
	宣城市	-43.40	-71.53	-104.74	-151.34	-145.49	-151.80	-0.271	-0.284	-0.190	-0.150	-0.091	-0.078
其他	安庆市	55.66	49.63	-93.89	-38.71	51.58	25.47	0.220	0.116	-0.100	-0.025	0.022	0.009
	池州市	-13.03	-4.24	-10.69	-5.56	9.65	6.99	-0.081	-0.016	-0.018	-0.005	0.005	0.003
	宿州市	-61.21	-57.85	21.00	29.66	-103.75	-251.30	-0.344	-0.185	0.032	0.024	-0.053	-0.110

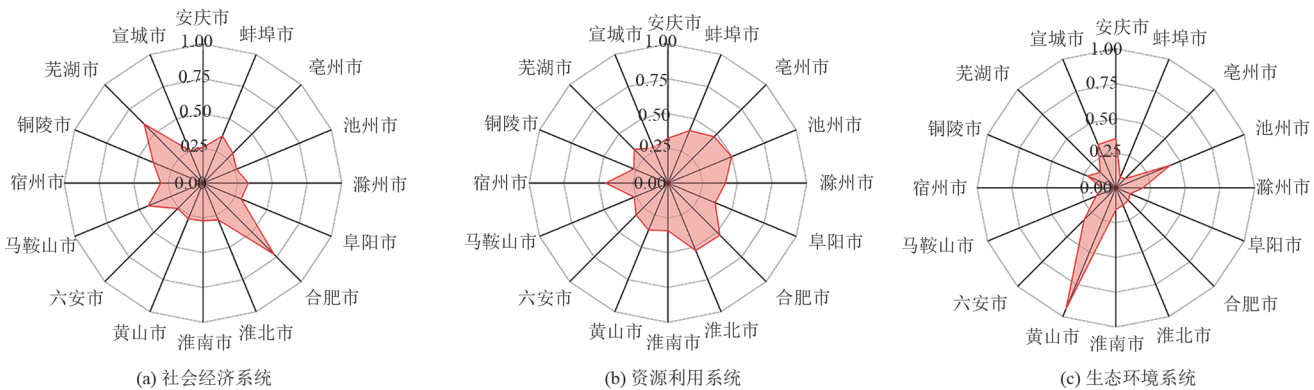


图 8 2023 年安徽省各城市子系统测度结果

Fig. 8 Measurement results of city subsystems in Anhui Province in 2023

协调发展-支付型城市包括安庆、淮南、马鞍山和铜陵 4 个城市,仅占全省土地总面积的 18.59%,却贡献全省 46.26% 的 LUCE。该区域在安徽省碳排放关联网络中占据核心枢纽地位,承担着碳排放要素资源在核心城市与边缘城市间的传输功能。其次,该区域普遍面临资源约束与环境承载力的双重挑战,现有碳汇能力与二氧化碳环境容量难以支撑经济快速发展需求。因此,协调发展-支付型城市应从产业结构优化和生态空间重塑 2 个维度实施转型策略。在产业层面,可通过清洁能源替代、能效技术革新等途径构建绿色制造体系,推进传统产业生态化改造。

在生态建设方面,加强土地用途管制,扩大园林、绿地和湿地面积,加强空间污染治理,从根本上缓解碳汇资源经济价值的亏损。

资源依赖-支付型城市包括亳州市、淮北市,它们占安徽省总面积的 8.02%,在空间关联网络中处于“被支配”的边缘位置。该区域能源富足而经济落后,面临着经济增速疲软与生态治理滞后的双重困境,即生态环境系统层评分平均值仅 0.113,与全省平均水平存在显著差距。因此,该区域应当引进煤炭清洁利用和低碳技术,通过政府引导加强不同经济发展水平地区之间的技术、能源、产业合作渠道,强

化区域之间的联系。同时,需要考虑并利用区域自然优势资源,进行合理的农业生产分工,发展区域特色农业,并推动区域内农地规模经营。

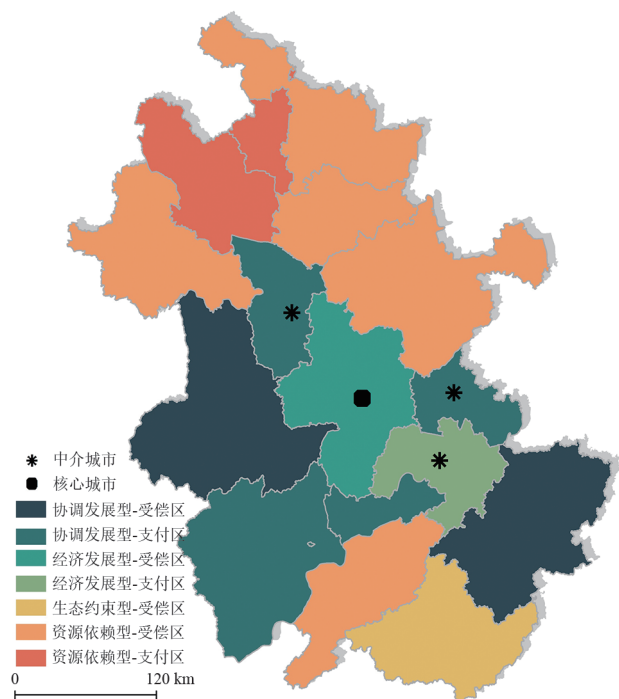


图9 安徽省碳综合生态补偿管理分区

Fig. 9 Carbon-integrated ecological compensation management zones in Anhui Province

合肥市属于经济发展-受偿型城市,占安徽省总面积的8.15%,在LUCE空间关联网络中扮演着核心角色,对其他区域的能源、资金和人口等资源的流入具有虹吸效应。合肥作为省会和长三角城市群的副中心城市,经济发达,科技创新能力强,能源利用效率高,没有因为维持经济的增长而放弃城市的可持续发展,社会经济与资源利用双高(分别为0.721和0.529),处于协调发展的状态,但在生态保护方面仍有待提升。因此,合肥市相对于直接的经济补偿,更应采取区域政策扶持等方式,针对性引导建设用地增长数量、方向和规模,稳定现有林地、湿地等碳库的固碳作用,以此构建更具韧性的城市发展模式。

协调发展-受偿区型包括六安市和宣城市,共占安徽省总面积的19.83%,处于安徽省向外围拓展的过渡区域,接近马鞍山、淮南等高碳排放量城市,受临近区域影响明显。该区域经济发展缓慢,森林资源较为丰富,碳汇能力相对较强,碳平衡始终维持在较高水平(分别为9.55%和15.39%),且区域为维持生态环境导致其经济发展成本增高,而碳生态补偿价值金额对于缓解经济损失有着较大的作用。因此,该区域应当进一步着力加强对碳汇等自然资源的修复和保护,在接收补偿金额的同时,对影响生态

环境、自然资源等的经济建设活动进行严格管控,形成以优先保护、适度开发为原则的区域发展模式。

资源依赖-受偿型包括蚌埠市、池州市、滁州市、阜阳市、宿州市等5个城市,占安徽省总面积的34.19%,主要分布于淮北平原和沿江平原等区域,水资源丰富,农业生产条件优越,是安徽省重要的农产品生产基地。该类型区由于土地资源丰富,人口密集,承担更大的经济发展压力、碳排放压力和碳排放快速增长压力,大多具有少量的碳汇价值盈余。因此,该区域应当通过其自身调节实现绿色发展,科学利用自然资源优势发展低碳生态旅游和农业,并通过合理规划适当发展经济林,在保护生态环境的同时,将资源优势科学转化为经济优势。

作为安徽省唯一的生态约束型城市,黄山市占全省总面积的6.93%,处于LUCE空间关联网络边缘节点位置,社会生产活动强度偏弱,但碳汇吸收效应显著,成为缓解全省碳压力的重要生态屏障。该区域呈高森林覆盖率、低国土开发强度特征,面临经济发展与生态保护的失衡矛盾。因此,该区域应当积极融入碳汇交易试点,将黄山的竹林碳汇、湿地碳汇等纳入区域碳交易市场,通过向马鞍山、淮南和淮北等高排放城市出售碳配额的形式,实现生态资源资本化,将碳汇收益反哺生态保护与城市发展。

综上所述,安徽省应该依托合肥核心城市对其他市域碳排放行为的影响力,构建以合肥为中心的碳补偿协同机制。参照长三角碳普惠交易体系,以各城市自身经济规模和碳排放量为基准,按比例筹集区域碳补偿基金,形成“皖北支付-皖江调配-皖南受益”的梯度补偿格局,专项用于支持碳汇项目建设,并对碳减排成效显著的城市实施生态奖励。同时应推进碳交易市场创新,实现“用能权-排污权-碳配额”三权融合交易,推动碳配额与碳信用资产在省内自由流通,全面提升碳资源配置效率。

3 讨论

3.1 LUCE时空演变特征与驱动机制

2000—2023年,由于不同阶段经济发展水平、政策导向和环境因素的不同,安徽省LUCE分别以2014年和2017年为拐点,呈“激增-下降-缓增”变化趋势,与黄怀玉等^[23]、廖祥等^[24]的研究结果相似,同时符合中国目前大多数区域LUCE发展趋势。2000—2014年,安徽省LUCE呈线性增长趋势($R^2=0.98$),年平均增加762.23万t。合肥、芜湖和马鞍山等城市沿江经济带由于经济建设的迫切需求,承接长三角城市群大量高耗能、高排放的产业,如钢铁、化工、建材等。这些产业的快速集聚推动安徽省以超常的速度推进

工业化和城镇化进程,建设用地扩张超过 59.04%,进一步侵占耕地、林地和水域等生产生态空间,碳汇能力下降,从而使碳排放保持高速增长。其次,淮南、淮北等两淮矿区作为中国十四大煤炭基地之一,在安徽省乃至整个华东地区的能源供给中扮演重要角色^[25]。为满足合肥、芜湖和马鞍山等沿江经济带及长三角城市群的能源需求,淮南、淮北等区域建立大量的燃煤发电厂,其火电机组在“皖电东送”中的装机量占比超过 85.00%,而火力发电过程中释放大量二氧化碳,使得两淮矿区的 LUCE 极高,且碳平衡率持续维持在 0.30% 以下。到 2014—2023 年,安徽省开始践行绿色发展理念,构建低碳经济循环体系,合肥、芜湖和马鞍山等沿江经济带通过发展信息技术、生物产业、生态农业等绿色产业,逐步替代钢铁、化工等高碳产业。而淮南、淮北等两淮矿区通过淘汰落后产能,关闭部分燃煤自备电厂等形式,减少对传统化石能源的依赖^[26]。同时结合生态修复、土地复垦、植被恢复等方式重建生态系统,提升碳汇能力,使得安徽省 LUCE 呈“U”形变化趋势($R^2=0.91$),年平均增长率下降至 120.10 万 t,增速明显减缓。黄山、池州等皖南生态区在森林覆盖率超过 65% 的天然优势下,成为安徽省主要的碳汇功能区,年平均碳汇量达 42.59 万 t,实现区域碳中和。然而,相对于工业化带来的碳排放而言仍然微不足道,反映了单纯依靠自然碳汇难以抵消工业化进程中的碳排放压力。综上所述,虽然安徽省 LUCE 增长速度有所下降,但碳源与碳汇之间仍然存在极大差距,存在区域碳失衡现象,现阶段实现降碳减排和固碳增汇任务依然任重道远。

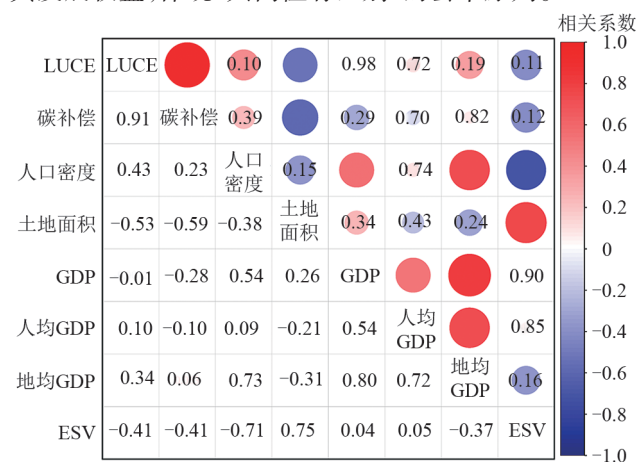
3.2 区域碳关联网络结构形成机制

社会网络分析作为量化区域碳关联网络空间溢出效应的重要工具,目前已经成为绿色低碳发展背景下生态补偿的研究热点领域。周汝波等^[13]研究表明,城市间土地利用结构的差异是形成安徽省 LUCE 空间关联网络的主要原因,而地理距离、经济发展水平和政策调控等是影响空间关联网络演化和城市间的碳排放空间溢出效应的重要作用力,与本研究结果相似。合肥、芜湖和马鞍山等沿江城市带以建设用地为主,承载高密度的工业与服务活动,成为主要的碳源节点。黄山、池州等皖南生态区以林地、水域为主要土地利用类型,发挥碳汇作用,形成“源-汇”空间梯度结构。在“十四五”规划政策驱动下,安徽省 LUCE 关联网络结构发生显著演变,2020—2023 年整体网络密度年平均增长 4.72%,合肥作为核心枢纽的中介中心度提升 14.29%,表明“产业协同”和“低碳转型”等政策工具有效强化核心城市功能,最终形成以合肥为核心的“核心-边缘”的网络结构特征和强者越强、弱者越弱的“马

太效应”。这种演变趋势与谭德明等^[27]以长江流域为研究区的研究结论较为一致,同时也符合长三角地区的整体发展规划^[28]。因此,要实现区域降碳减排和固碳增汇任务,应当重视各城市的差异化特征,充分发挥不同城市的比较优势,通过合理功能分工、产业转移和低碳技术扶持等形式,促进区域之间的协同合作,构建安徽省区域低碳发展路径,共同实现降碳减排和固碳增汇任务。

3.3 碳生态补偿标准的合理性分析

碳补偿制度作为协调经济发展与环境保护矛盾的经济激励机制,其碳补偿标准建立的合理性成为政策设计的关键^[4]。本文通过引入人口-土地要素和 ESV 等修正因子,弥补仅以土地利用净碳排放估算区域间碳生态补偿标准的不足,确保补偿标准能够更好地反映区域间的实际差异。研究结果(图 10)表明,LUCE 与碳生态补偿额度呈显著的正相关($\rho=0.91, p<0.05$),验证模型构建的合理性,符合“污染者付费,受益者补偿”的生态补偿原则。作为省会城市的合肥以占全省 8.15% 面积承担 16.10% 的常住人口,贡献全省 26.95% 的 GDP 总量,实现经济增长高于碳排放增量的弱脱钩状态。因此,尽管合肥的 LUCE 总量较高,但在通过碳生态补偿模型修正后,赋予合肥更高的碳排放基准空间,从而避免因绝对排放量高而过度惩罚其发展权益,体现“共同但有区别”的公平原则。



注:显著性水平为 0.05。

图 10 碳补偿与关键指标的关联性检验

Fig. 10 Correlation test between carbon compensation and key indicators

总体而言,LUCE 在通过“经济效率-生态公平-资源禀赋”三重修正后,使得碳生态补偿模型的价值核算更具效率与公平性,而合肥市高补偿额度是模型修正与区域发展特征耦合的结果,既体现“受益者补偿”的生态正义,又通过激励机制推动核心城市发挥低碳转型的引领作用,为区域协调发展提供长效支撑。

3.4 碳生态补偿管理分区方法探讨

碳补偿作为缓解经济发展与环境保护之间矛盾、促进区域低碳、协调发展的经济激励制度,近年来得到广泛讨论^[4]。但目前的碳补偿策略没有充分考虑区域经济发展水平、生态本底、资源禀赋特征和人口密度等情况,忽略城市可持续发展的需要及城市之间LUCE的空间溢出效应,导致城市间的碳补偿工作缺乏有效的协调和联动,使得提出的碳补偿策略缺乏差异化和针对性。因此,本文基于LUCE长时序核算数据,结合碳生态补偿原理及各城市在空间关联网中的角色定位,从SDGs的视角将安徽省进行碳补偿优化管理分区,并针对每个分区提出差异化的碳补偿策略。从研究结果来看,碳补偿优化管理分区方案符合各区域建设和发展现状,具有可行性。该方案不仅可以促使地区降低碳排放、保护碳汇资源,推动区域实现碳中和远期目标,而且有助于提升各地区经济发展的均衡性和生态资源利用的公平性,促进城市SDGs的实现。但本研究也存在不足,即由于能源数据的获取存在限制,本文没有涉及区县等尺度的研究,使得碳补偿的指导研究有一定局限性;在SDGs指标的构建上有待进一步完善,本文只考虑与碳排放相关的SDGs指标,缺乏统一而科学的指标体系覆盖SDGs的完整体系。因此,后续的研究仍需要进一步深化。

4 结论

1)2000—2023年安徽省LUCE显著增长,空间极化特征显著,整体表现为“北高南低、东高西低”的分布特点,沿江产业带-两淮能源核是LUCE的主要增长区域。

2)安徽省内城市间LUCE具有显著的空间等级特征,整体呈关联性和稳定性增强趋势。然而,核心城市与边缘城市之间的联系相对松散,空间关联上具有较大的提升空间。

3)安徽省各城市碳生态补偿支付区的支付额度对区域经济发展影响整体可控。2023年有淮北市、淮南市和马鞍山市等6个碳生态补偿支付区,黄山市、合肥市和阜阳市等10个碳生态补偿受偿区。

4)根据城市的可持续发展水平,将2023年安徽省碳生态补偿分区划分为4种类型,明确碳生态补偿分区,提出差别化碳生态补偿建议。

参考文献:

- [1] PLATFORM SDGK. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development [EB/OL]. (2015-10-21) [2025-02-10]. <https://docs.un.org/en/A/RES/70/1>.
- [2] ZHANG R S, MATSUSHIMA K, KOBAYASHI K. Can land use planning help mitigate transport-related

carbon emissions? A case of Changzhou [J]. Land Use Policy, 2018, 74: 32-40.

- [3] 王奕淇,甄雯青. 基于主体功能区的碳收支时空分异和碳补偿分区:以黄河流域县域为例[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5015-5026.
WANG Y Q, ZHEN W Q. Spatiotemporal differentiation of carbon budget and carbon compensation zoning based on the plan for major function-oriented zones: A case study of counties in the Yellow River basin [J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5015-5026.
- [4] 李璐,夏秋月,董捷,等. 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[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2627-2639.
LI L, XIA Q Y, DONG J, et al. County-level carbon ecological compensation of Wuhan urban agglomeration under carbon neutrality target: Based on the difference in land use carbon budget [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2627-2639.
- [5] CHEN Z, DAYANANDA B, DU H Q, et al. Assessing carbon sequestration potential in state-owned plantation forests in China and exploring feasibility for carbon offset projects [J]. Forests, 2024, 15(5): e886.
- [6] FAN Z G, XIA W T, YU H, et al. Land use carbon budget pattern and carbon compensation mechanism of counties in the Pearl River basin: A perspective based on fiscal imbalance [J]. Land, 2024, 13(8): e1141.
- [7] SUN J F, LI G D, ZHANG Y, et al. Assessment of suitable areas for afforestation and its carbon sink value in fragile ecological areas of northern China [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 348: e119401.
- [8] 毕文泰,李宗泽,陈素云. “双碳”目标下农业碳汇交易与粮食主产区利益补偿机制研究 [J]. 价格理论与实践, 2023(1): 161-164.
BI W T, LI Z Z, CHEN S Y. Research on agricultural carbon trade and benefit compensation mechanism in major grain-producing areas under the “dual carbon” goal [J]. Price (Theory and Practice), 2023(1): 161-164.
- [9] AMADDEO E, BERGANTINO A S, MAGAZZINO C. Who pays for the EU Emission Trading System? The risk of shifting tax burden from firm to final consumer [J]. Energy Economics, 2025, 143: e108240.
- [10] THERESIA V, ATMADJA S S, LIEBERHERR E. Global analysis of the proposed benefits from REDD+ projects: Influencing factors and discrepancies [J]. Environmental Research Letters, 2025, 20(2): e024024.
- [11] 张婕,古明敏,王陈. 基于共享视角的黄河流域综合生态补偿机制 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(3): 192-204.
ZHANG J, GU M M, WANG C. Comprehensive ecological compensation mechanisms of the Yellow River basin from the sharing perspective [J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(3): 192-204.
- [12] 王中航,张敏思,苏畅,等. 我国碳普惠机制实践经验与

- 发展建议[J]. 环境保护, 2023, 51(4): 55-59.
- WANG Z H, ZHANG M S, SU C, et al. Practical experience and development suggestions for carbon inclusiveness mechanism of China[J]. Environmental Protection, 2023, 51(4): 55-59.
- [13] 周汝波, 洪武扬. 社会网络分析视角下广东省土地利用碳排放空间关联与碳平衡优化分区[J]. 环境科学, 2025, 46(9): 5403-5414.
- ZHOU R B, HONG W Y. Spatial correlation and optimization zoning of carbon emission from land use in Guangdong Province from the perspective of social network analysis[J]. Environmental Science, 2025, 46(9): 5403-5414.
- [14] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [15] 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.
- FANG J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. Estimation 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.
- [16] 李彦旻, 沈育生, 王世航. 基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 182-188.
- LI Y M, SHEN Y S, WANG S H. Spatio-temporal characteristics and effects of terrestrial carbon emissions based on land use change in Anhui Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 182-188.
- [17] WANG M J, WANG Y J, TENG F, et al. The spatio-temporal evolution and impact mechanism of energy consumption carbon emissions in China from 2010 to 2020 by integrating multisource remote sensing data[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 346: e119054.
- [18] 郭文强, 史瑞雪, 雷明, 等. 中国省际碳排放空间关联网络结构特征及碳平衡分区[J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8003-8020.
- GUO W Q, SHI R X, LEI M, et al. Structural characteristics and carbon-balanced zoning of spatial correlation network of inter-provincial carbon emissions in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8003-8020.
- [19] DONG J, LI C B. Structure characteristics and influencing factors of China's carbon emission spatial correlation network: A study based on the dimension of urban agglomerations[J]. Science of the Total Environment, 2022, 853: e158613.
- [20] 万伦来, 林春鑫, 陈艺. 基于相对碳赤字的中国省际碳补偿时空格局研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2572-2583.
- WAN L L, LIN C X, CHEN Y. Temporal and spatial patterns of interprovincial carbon compensation in China based on relative carbon deficit[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(12): 2572-2583.
- [21] 中国碳交易网. 安徽省碳交易价格数据[EB/OL]. [2024-12-06]. <http://www.tanjiaoyi.com/>.
- China Carbon Trading Network. Anhui Province carbon trading price data [EB/OL]. [2024-12-06]. <http://www.tanjiaoyi.com/>.
- [22] 贾琨, 盛茜钰, 刘畅文, 等. 面向 SDGs 的黄河中下游土地可持续发展水平测度及障碍诊断[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(9): 237-247.
- JIA K, SHENG Q Y, LIU C W, et al. Measurement of land sustainable development level for SDGs and diagnosis of the obstacle factors in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(9): 237-247.
- [23] 黄怀玉, 龚直文, 陈小娟, 等. 基于土地利用碳收支差异的重庆市碳补偿优先区识别[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5027-5039.
- HUANG H Y, GONG Z W, CHEN X J, et al. Identification of priority areas for carbon compensation in Chongqing based on the difference in land use carbon budget[J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5027-5039.
- [24] 廖祥, 杨鑫, 牛振生. 成渝城市群陆地碳排放时空变化及效应研究[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(1): 211-225.
- LIAO X, YANG X, NIU Z S. Spatio-temporal changes and effects on terrestrial carbon emission in Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. Environmental Science and Technology, 2023, 46(1): 211-225.
- [25] 袁亮, 徐良骥. 高潜水位采煤沉陷区资源化、能源化、功能化利用构想与实践[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 65-74.
- YUAN L, XU L J. Conception and practice of resource utilization, energization and functionalization of coal mining subsidence areas with high groundwater level[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 65-74.
- [26] 陶雪峰, 石必明, 岳基伟, 等. 废弃矿井可采煤层群瓦斯资源特征及其应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(3): 161-173.
- TAO X F, SHI B M, YUE J W, et al. Characteristics and applications of gas resources in abandoned coal seam Groups within mining areas[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(3): 161-173.
- [27] 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.
- TAN D M, OUYANG F L, ZHANG C P. 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.
- [28] 李万隆, 崔耀平, 秦耀辰, 等. 京津冀和长三角城市群建设用地分配研究[J]. 地理学报, 2024, 79(10): 2567-2584.
- LI W L, CUI Y P, QIN Y C, et al. Construction land allocation in Beijing-Tianjin-Hebei and Yangtze River delta urban agglomerations[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(10): 2567-2584.