

DOI: 10.20103/j.stxb.202312292870

郭文强, 史瑞雪, 雷明, 韦星羽, 张雯革. 中国省际碳排放空间关联网络结构特征及碳平衡分区. 生态学报, 2024, 44(18): 8003-8020.

Guo W Q, Shi R X, Lei M, Wei X Y, Zhang W P. Structural Characteristics and Carbon-Balanced Zoning of Spatial Correlation Network of Inter-Provincial Carbon Emissions in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8003-8020.

中国省际碳排放空间关联网络结构特征及碳平衡分区

郭文强¹, 史瑞雪^{1,*}, 雷明^{1,2}, 韦星羽¹, 张雯革¹

¹ 新疆财经大学信息管理学院, 乌鲁木齐 830012

² 北京大学乡村振兴研究院, 北京 100871

摘要: 在碳达峰、碳中和的时代背景下, 准确把握碳排放空间关联网络结构及碳平衡分区, 对于推动生态环境协同治理、实现高质量协调发展具有指导作用。选用 2005—2021 年中国 30 个省份为样本, 采用社会网络分析和探索性空间数据分析刻画碳排放空间格局特征与碳平衡分区, 并对各综合分区提出针对性优化策略。研究表明: (1) 碳排放量整体呈增长态势但增速较慢, 表现出“东部高, 中西部低”的空间分布特征; 碳汇量增幅微弱, 空间上呈“中西部高, 东部低”的分布特征; 碳平衡能力呈波动递减且存在明显空间差异, 全国约 43.33% 的省份处于碳平衡能力较强的状态。(2) 中国省际碳排放空间关联关系日益紧密, 网络结构呈现较好的可达性和稳定性, 但个体网络特征差异明显, 京、津、沪和苏等省份处于网络中心位置, 控制和掌握网络相关性的能力显著。(3) 基于碳平衡分析, 将各省细分为 6 种碳平衡功能区, 且有 18 个关键省域被识别, 并针对各分区提出差异化协同减排策略, 促进区域间公平、高效的低碳转型发展, 以期为“双碳”目标的实现提供参考。

关键词: 碳排放; 空间网络结构; 社会网络分析; 碳平衡分区

Structural Characteristics and Carbon-Balanced Zoning of Spatial Correlation Network of Inter-Provincial Carbon Emissions in China

GUO Wenqiang¹, SHI Ruixue^{1,*}, LEI Ming^{1,2}, WEI Xingyu¹, ZHANG Wenping¹

¹ School of Information Management, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi 830012, China

² Institute of Rural Revitalization, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Under the background of carbon peaking and carbon neutrality, accurately grasping the characteristics of the spatial network structure of the carbon emissions and the carbon balance zoning are of great guiding effect to promote the ecological environment collaborative management and realize the high-quality coordinated development. This article selected panel data encompassing 30 provinces and municipalities in China (excluding Hong Kong, Macao, Taiwan, and Tibet) from 2005 to 2021 as samples. It comprehensively employed social network analysis and exploratory spatial data analysis to deeply explore and analyze the characteristics of the spatial network structure of the carbon emissions, and divided the carbon balance zoning. Furthermore, the paper proposed targeted optimization strategies and directions for the various comprehensive divisions. The following key findings were revealed: (1) By the large, the total amount of carbon emissions in China showed an upward trend, but the growth rate of carbon emissions was growing at a relatively slow pace. Notably, it exhibited a spatial pattern of “high in the eastern part of the country, low in the central and western”. The total carbon sinks showed a slight growth during the investigation period, showing a spatial distribution characteristic of “high in the

基金项目: 国家社会科学基金一般项目 (23XMX060); 新疆社会科学基金一般项目 (21BGL098); 新疆财经大学研究生科研创新项目 (XJUFE2024K040)

收稿日期: 2023-12-29; **网络出版日期:** 2024-06-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 2287204201@qq.com

限于数据的可获取性, 本研究尚未统计到中国港澳台和西藏自治区数据。

central and western part of the country, low in the eastern". The overall carbon balance capacity showed a trend of fluctuation and decrease with obvious spatial differences, and about 43.33% of the provinces in China were in a strong carbon balance capacity situation. (2) During the study period, the overall spatial network structure of the carbon emissions of 30 provinces, municipalities, and regions in China had become more and more closely related, and the structure of carbon emission spatial network showed good accessibility and stability. However, the spatial difference of individual network structure characteristics was significant, and the Beijing, Tianjin, Shanghai, Jiangsu occupied the leading position in the entire spatial correlation network, which plays an important controlling role on the whole carbon emission spatial network. (3) Based on analysis of the carbon balance, the space in the 30 provinces, municipalities, and regions in China had been divided into 6 different carbon balance functional zones. At the same time, 18 key provincial domains were identified and defined. In addition, the differentiated regional low-carbon optimization development directions and strategies were proposed for each type of zoning, in order to promote equitable, efficient and low-carbon transformational development among regions, provide a reference for the realization of carbon peaking and carbon neutrality.

Key Words: carbon emissions; spatial network structure; social network analysis; carbon balance zoning

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,也是实现经济社会全面绿色转型和建设“美丽中国”的必然选择^[1]。党的二十大报告提出推进绿色低碳高质量发展道路,积极稳妥推进碳达峰碳中和^[2]。在“双碳”目标战略驱动下,各地区积极推进绿色低碳化发展,加快构建低碳循环经济体系。但是由于中国各地区经济社会发展状况、能源禀赋及生态环境压力等方面存在显著差异,地区碳排放强度和规模的空间异质性特征明显,区域间交流与合作形成的空间关联关系,对碳排放要素的流动产生至关重要的影响,对中国区域协同减排目标造成巨大压力,严重制约中国“双碳”目标的实现。因此,从空间关联网络视角考察中国碳排放的网络结构特征及碳平衡分区,对完善跨区域碳达峰、碳中和行动方案,推进区域公平减排增汇与促进区域绿色可持续发展具有一定的积极作用。

回顾以往研究发现,现有碳排放相关研究主要包括以下三个方面:第一,碳排放的空间特性分析,传统的空间计量方法(如空间分布异质性、空间聚集、空间收敛性等)普适性高、直接且能有效识别动态演变趋势,因而被广泛使用^[3-5]。如胡宗义等利用 Dagum 基尼系数分解法分析地方政府环境责任履行水平的区域差异^[6];高威等借助探索性空间数据分析、核密度估计等探讨中国生态用地碳汇的空间结构特征和时空演进态势^[7];Gui 等借助探索性时空数据分析探索广东省内各县域碳排放的时空演变特征^[8]。社会网络分析法是一种以“关系数据”为核心的跨学科研究方法,能识别空间中复杂的网络关系,并逐步被应用于研究碳排放空间关联网络中^[9]。该方法采用图论和矩阵方法描述关联关系并揭示其对网络中个体或整体结构的影响^[10]。如高煜昕等从社会网络分析视角探讨生活垃圾碳排放效率的空间相关性及其影响因素^[11];Rong 等运用社会网络分析考察长江流域土地利用碳排放的溢出效应^[12];张正峰等利用社会网络分析法分析京津冀县级尺度的碳排放空间关联作用^[13]。第二,碳排放空间分异的影响因素,学者们利用 STIRPAT 扩展模型、空间杜宾面板模型、地理探测器等从诸多要素展开对碳排放影响因素的分析^[14-16]。如牛亚文等运用地理探测器对长株潭地区县域土地利用碳排放影响因素进行分析^[17];Lee 等结合随机效应回归架构和带有协变量的有限混合模型探索 96 个国家碳排放的影响因素和异质性特征^[18];姚成胜等通过 LMDI 分解法将畜牧业碳排放进行分解并揭示畜牧业碳排放的驱动效应^[19]。第三,碳排放的情景模拟,目前主要通过 LEAP-LANDIS 模型、CLUE-S 模型和 RICE-LEAP 模型等模型进行预测分析^[20-22]。如顾汉龙等运用 CLUS-S 模型研究法库县土地利用变化格局进行模拟和验证^[23];Zhou 等考虑国家自主贡献、碳减排情景和深度减排情景三种情景探究中国未来工业过程中碳排放^[24]。以上研究都为新时代开展区域协同减排、发展低碳经济提供重要参考。

综上所述,已有碳排放的相关文献展现出研究要素多样化和研究方法多元化的特征,但也存在以下不足:(1)现有成果针对碳排放空间演变特征的分析与勾勒大多借助传统空间自相关分析,仅能考察碳排放是否呈

现空间集聚效应,难以甄别不同区域在碳排放空间关联网络中的角色特征和分布状况。(2)当前关于碳平衡分区的文献大多以碳排放为基础,按照生态承载系数、经济贡献系数等依据展开分区研究,而综合考虑区域碳排放特征与空间关联关系等要素的区域空间格局优化的研究相对较少。鉴于此,本文以中国 30 个省(自治区、直辖市)为研究对象,在测算分析 2005 年、2010 年、2015 年和 2021 年中国整体和省际碳排放、碳汇和碳平衡能力的基础上,利用修正后的引力模型建立以省份为单元要素的碳排放引力矩阵,借助社会网络分析法从局部和整体网络视角探究碳排放空间网络结构特征,划分碳平衡分区并对分区提出差异化减排策略,以期为中国实现“双碳”目标提供重要的理论支持。

1 研究方法数据来源

1.1 数据来源

本文主要选择 2005—2021 年中国 30 个省(自治区、直辖市)的样本数据(不包括港澳台及西藏自治区的数据)作为研究对象。其中,30m×30m 分辨率的土地利用数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.globeland30.org/>)中,杨杰、黄昕研究团队开发的土地利用数据,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域湿地、建设用地和未利用地;碳排放数据来源于《中国能源统计年鉴》和中国碳核算数据库(<http://www.ceads.net>);其他数据来源于《中国统计年鉴》和各省(自治区、直辖市)统计年鉴,地区生产总值通过 GDP 平减指数(以 2005 年为基期)折算为不变价。

1.2 研究方法

1.2.1 碳平衡能力测算

基于《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》提供的模型估算方法^[25],将碳生态承载系数作为衡量碳平衡能力强弱的发展指标,测算省际单元能源消耗的碳排放量,估算省际单元林地、草地、水域湿地和未利用地的碳汇量。

(1)省际单元碳平衡能力。利用碳生态承载系数(ESC)表示某省份的碳汇占全国的比例与该省份的碳排放占全国的比例之间的比值,该指标能识别碳汇对碳排放的消纳作用,反映碳平衡能力强弱^[26—28]。具体公式如下:

$$ESC = \frac{\frac{CS_i}{CS}}{\frac{C_i}{C}} \quad (1)$$

式中, CS 和 C 分别为中国整体的碳汇量和碳排放量, i 为某省份。若 $ESC > 1$,表明 i 省碳吸收的贡献度大于碳排放的占比,具有较高的生态系统固碳能力;反之亦然。

(2)省际单元碳排放量(C_i)。化石能源的燃烧活动是造成碳排放的主要原因^[29],在所有排放源中占据主导地位,而工业生产过程、农林业等土地利用、废弃物处理及其他方面由于数据收集不完整以及产生少量碳排放的问题,本文在估算过程中未纳入考虑。因此本文基于 2005—2021 年各省终端能源消费量,选取原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、焦炭、焦炉煤气、其他煤气、其他焦化产品、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油等 17 种化石能源,核算二氧化碳排放量,计算公式如下:

$$C_i = \sum_{\alpha=1}^{17} (E_{\alpha} \times \beta_{\alpha} \times \gamma_{\alpha}) \quad (2)$$

式中, C_i 为 i 省能源消耗的碳排放总量; E_{α} 为第 α 种能源的总消费量; β_{α} 为第 α 种能源标准煤核算系数^[30]; γ_{α} 为第 α 种能源碳排放系数^[31]。

(3)省际单元土地利用碳汇量(CS_i)。在土地利用数据中,耕地的农作物进行光合作用吸收 CO_2 ,但很快又以呼吸作用的形式释放 CO_2 ,碳汇效应较弱^[32]。因此以林地、草地、水域湿地和未利用地作为主要碳汇用

地,具体计算公式如下:

$$CS_i = \sum_{m=1}^4 B_m \times b_m \quad (3)$$

式中, CS_i 为*i*省的碳汇量; B_m 为第*m*种用地类型对应的面积,包括林地、草地、水域湿地和未利用地; b_m 为第*m*种用地类型的碳汇系数^[33—35]。

1.2.2 碳排放社会网络分析

(1) 省际碳排放关联的测度

为建立中国省际碳排放空间关联关系,首先需要刻画省际间碳排放的关联程度。目前学者们通常基于向量自回归模型和修正后的引力模型来测度空间关联关系,由于向量自回归模型对时滞的选择十分敏感,无法准确表征网络结构特征^[36]。因此,本文采用修正后的引力模型构建 30 个省份碳排放关联关系矩阵^[37]。邵帅等^[38]认为碳排放的关联关系与省份间碳排放的不对等性、经济发展水平、省份间人口迁移、省份间能耗流动以及省份间地理距离有关。基于此,修正后的引力模型如下:

$$y_{ij} = k_{ij} \frac{\sqrt[3]{P_i C_i G_i} \sqrt[3]{P_j C_j G_j}}{D_{ij}^2} \quad (4)$$

$$k_{ij} = \frac{C_i}{C_i + C_j}, D_{ij} = \frac{d_{ij}}{g_i - g_j}$$

式中, y_{ij} 为*i*省对*j*省的碳排放关联强度; k_{ij} 为*i*省的碳排放量在*i*省、*j*省两省碳排放总量中的占比; P 、 C 、 G 、 g 分别为人口规模、碳排放量、GDP 和人均 GDP; D_{ij} 为*i*省和*j*省之间的经济地理距离; $g_i - g_j$ 为人均 GDP 差值; d_{ij} 为省会间的球面距离,借助 ArcGIS 软件中的欧氏距离计算省会城市间的球面距离。

由式(4)计算得到中国 30 个省份的引力矩阵 $(y_{ij})_{30 \times 30}$,采用每行均值为阈值的原则对该矩阵进行二值化处理,若引力值大于等于阈值,则两省份间存在关联关系,赋值为 1;反之,赋值为 0,由此得到省际碳排放的空间关联矩阵^[39]。

(2) 省际碳排放空间关联网络结构特征的刻画方法

本文以碳排放空间关联关系为主线,在把握碳排放空间关联网络的整体结构和个体结构的基础上,利用块模型考察碳排放的空间关联模式及其变动情况,并甄别各区域在空间网络中发挥的作用。其中利用网络密度、网络关联度、网络等级度和网络效率 4 个指标来衡量中国省际碳排放的整体网络结构特征;采用度中心度、中介中心度和接近中心度 3 个指标来衡量中国省际碳排放的个体网络结构特征。各项指标的计算公式和特征如表 1^[40—41]。

1.2.3 探索性空间数据分析方法

探索性空间数据分析通过对要素或现象空间分布格局的探索和勾勒,识别要素或现象间的集聚效应^[42],主要包括全局空间自相关和局部空间自相关。其中,全局空间自相关的公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (C_i - \bar{C})(C_j - \bar{C})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2} \quad (5)$$

式中, n 为省份数目; w_{ij} 为空间地理邻接权重矩阵; C_i 和 C_j 为*i*省和*j*省碳排放量; $\bar{C}$ 为总体碳排放均值。

局部空间自相关用以分析局部地区空间集聚特征,揭示省份与邻近省份碳排放空间关联的程度^[43]。利用 Anselin local Moran's I 指数测算局部空间自相关程度。公式为:

$$I_i = \frac{n(C_i - \bar{C}) \sum_{i \neq j} w_{ij} (C_j - \bar{C})}{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2} \quad (6)$$

表 1 中国省际碳排放空间关联网络的指标与特征

Table 1 Indicators and characteristics of provincial carbon emissions spatial correlation network in China

指标 Index	公式 Formulas	符号含义 Symbolic meaning	特征 Features
网络密度 Density	$D=M/[N \times (N-1)]$	M 为实际关联数量; N 为网络中的节点数	测算整体网络关系是否完备的指标
网络关联度 Connectedness	$C=1-V/[N \times \frac{N-1}{2}]$	V 为网络中不可达点对的数量	指网络结构稳健性强弱的指标
网络等级度 Hierarchy	$H=1-K/\max(K)$	K 为对称可达点对数	指网络等级结构森严与否的指标
网络效率 Efficiency	$E=1-M/\max(M)$	M 为网络中多余的线条	衡量省份和网络间关联关系的紧密性
度中心度 Degree	$C = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{\max} - C_i)}{\max [\sum_{i=1}^n (C_{\max} - C_i)]}$	$C_{\max}$ 为网络中点的绝对中心度的最大值	衡量某省份对其他省份的吸引力和联系力
中介中心度 Betweenness	$BC_i = \frac{2 \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n g_{jk}(i) / g_{jk}}{n^2 - 3n + 2}$	G_{jk} 为省份 j 与省份 k 间存在的最短路径数; n 为省份数目	测算某省份作为桥梁连接其他省份间的作用
接近中心度 Closeness	$CC_i = \frac{n-1}{\sum_{j=1}^n d_{ij}}$	d_{ij} 为省份 i 和省份 j 间的最短距离	测算网络中省份之间的直接联系

式中,各系数含义同上。当局部 Moran's I 大于 0 时,表示省份与其邻近省份的碳排放相似,空间集聚群可划分为高高型(HH)和低低型(LL)聚类;当局部 Moran's I 小于 0 时,表示省份与其邻近省份的碳排放存在显著差异,空间集聚群可划分为高低型(HL)和低高型(LH)聚类。

2 中国省际碳平衡能力时空分异

选取 2005—2021 年中国省际碳排放量、碳汇量和碳平衡能力均值的 50%、100%、150% 和 200%,将碳排放量、碳汇量和碳平衡能力划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级,然后利用 ArcGIS 10.8 软件的 5 级自然断点分级法对 2005 年、2010 年、2015 年和 2021 年的碳排放、碳汇和碳平衡能力的空间分布进行勾勒。

2.1 碳排放时空分布特征

2005—2021 年,全国碳排放量呈持续性上升的趋势,碳排放量从 $5087.67 \times 10^6 \text{t}$ 上升至 $9665.44 \times 10^6 \text{t}$,年均增长率 4.09%(图 1)。2005—2015 年碳排放量年均增长率为 5.35%,到 2021 年下降至 2.03%,表明中国省际碳排放量总体呈现增长态势但增速较慢。原因可能是作为节能减排重要抓手的能源和产业结构在“十三五”

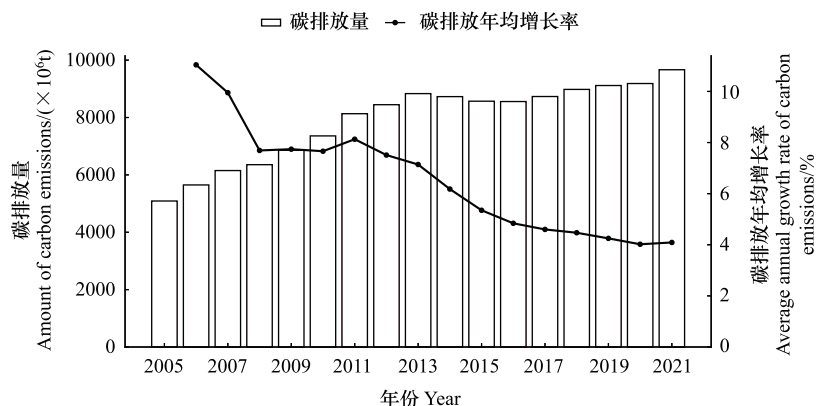


图 1 2005—2021 年中国碳排放量与年均增长率变化

Fig.1 The changes of the carbon emissions and average annual growth rate of carbon emissions in China from 2005 to 2021

期间得到显著优化,同时此阶段可再生能源制氢和新型储能技术等低碳技术得到显著突破,但由于长期以来形成以化石能源为主的高碳能源结构,短时间内难以发生显著变化,碳排放量增长趋势仍将持续。

省际碳排放量整体表现为“东部高,中西部低”的特点,呈现显著空间集聚特征(图2)。河北、山东、江苏、内蒙古、山西、新疆和广东是碳排放活动最活跃的子区域,属于碳排放的核心地带,这种空间格局与它们的人口基数、经济实力和能源消费显著相关,其中,广东2021年GDP占全国的10.85%,遥遥领先其他省份;河北、山东、江苏则是东部重要省份,人口的高密度分布和产业的高度集聚,导致区域碳排放量较高;内蒙古、山西和新疆属于煤炭资源丰富的大省,能源密集型产业较多,因而碳排放量相对较多。在研究期内,碳排放的地域差异并未随着时间的推移发生显著变化,这与经济活动中的关键区域维持了稳定的关系,呈现出显著的空间集聚特征有关。

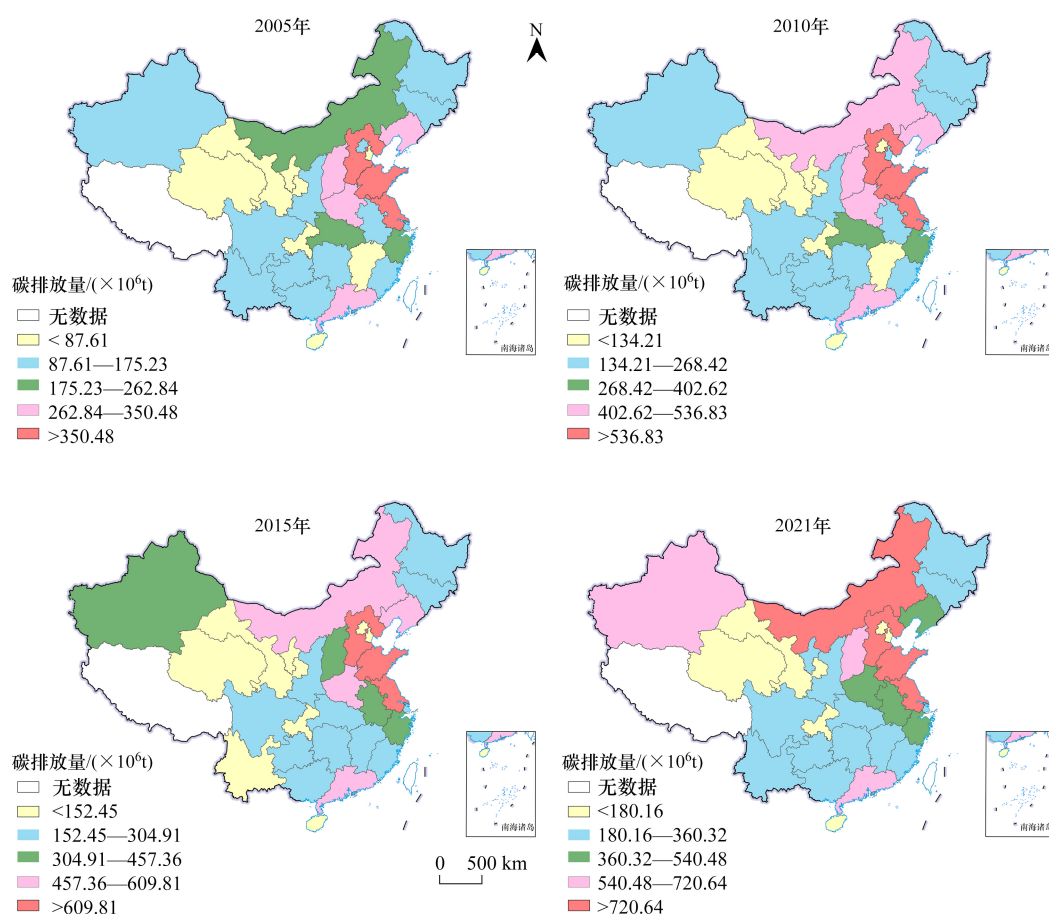


图2 2005—2021年中国省际碳排放量空间分异

Fig.2 Spatial differentiation of provincial carbon emissions in China from 2005 to 2021

2.2 碳汇量空间分布特征

2005—2021年,全国碳汇量呈微增趋势,碳汇量从 $165.79 \times 10^6 \text{ t}$ 上升至 $167.94 \times 10^6 \text{ t}$,年均增长率0.08%(图3)。2005—2010年碳汇量年均增长率为0.18%,到2010—2015年减少到-0.05%,再到2015—2021年增加到0.11%,说明碳吸收量整体呈波动递增态势且增速相对缓慢。其中,研究期内林地碳吸收量最高,约占总碳吸收量的93.63%,成为全国各省份中最主要的碳汇,草地和水域湿地对碳吸收的贡献相对较小。表明近年来各省份稳步有序开展退耕还林还草、优化森林的结构和功能、加大人工针叶纯林改造力度、实施森林保护修复重大工程等措施,促使林地面积逐渐扩大,2021年全国森林覆盖率达到23%,相较2005年增加了12.75%,从而区域的碳汇能力得到加强。



图3 2005—2021年中国碳汇量与年均增长率变化

Fig.3 The changes of the carbon sinks and average annual growth rate of carbon sinks in China from 2005 to 2021

研究期内省际碳汇量空间格局分布较稳定,总体呈现出“中西部高,东部低”的特点(图4)。碳汇功能相对较强的区域集中在东北地区 and 长江流域以南的地区,尤其是四川、云南、广西、黑龙江和内蒙古5个省份长期处于碳汇量的高值区域,这些省份拥有覆盖面积较大的林地、水域湿地和草地等碳汇用地,对碳吸收贡献较大;而东部地区的北京、天津、山东、河北、安徽、江苏和上海碳汇功能较弱,主要由于这些省份作为我国重要的经济大省,城镇化水平和土地利用程度较高,加上相对较少的省份面积,所产生的碳吸收量微弱。随着时间的变化,中西部地区和东北地区的省际碳汇有所提升,全国整体的碳汇能力呈现改善态势。

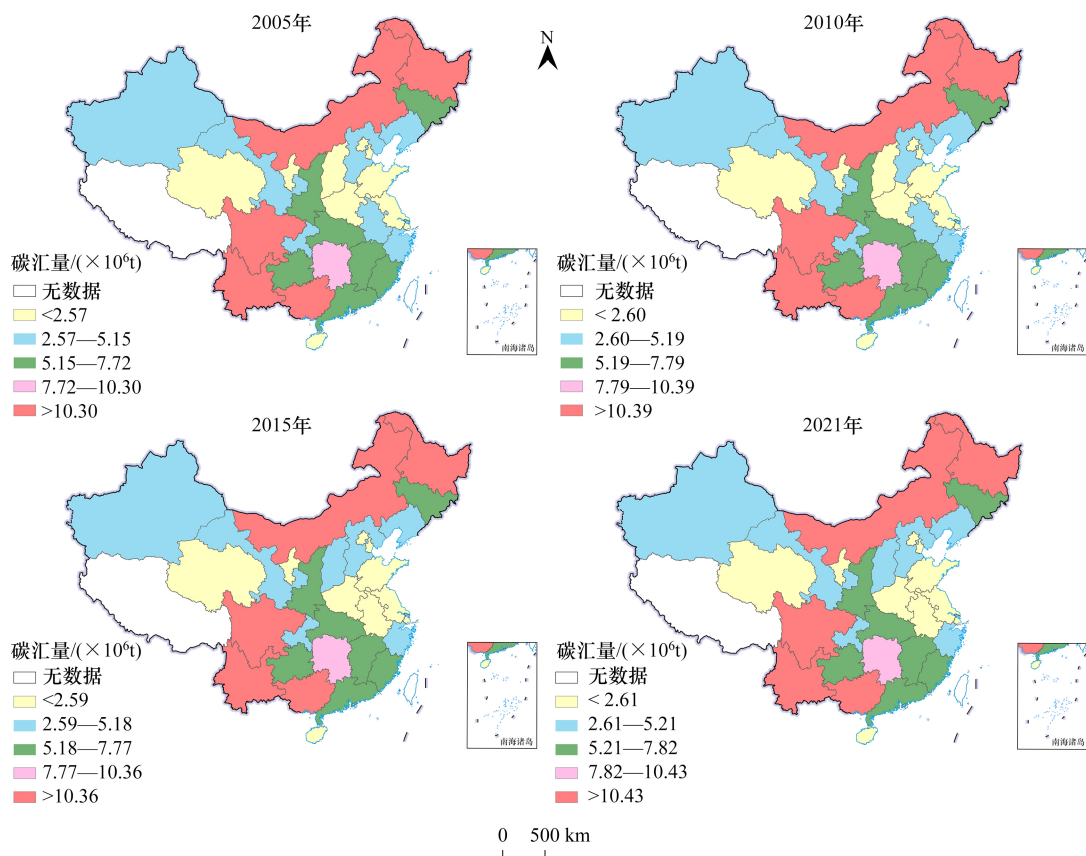


图4 2005—2021年中国省际碳汇量空间分异

Fig.4 Spatial differentiation of provincial carbon sinks in China from 2005 to 2021

2.3 碳平衡能力时空分布特征

2005—2021 年,全国碳平衡能力呈微减趋势,全国 30 省份碳平衡能力均值从 1.29 下降至 1.17,年均增长率为 -0.66% (图 5)。2005—2010 年碳平衡能力年均增长率为 -1.42% ,到 2010—2015 年增加到 0.13% ,再到 2015—2021 年减少到 0.68% 。说明省际碳平衡能力整体呈波动递减态势且递减速度较为缓慢。近 17 年全国 30 省份碳承载系数均值始终大于 1,表明全国平均的碳平衡能力较强,碳补偿率相对较高,全国约 43.33% 的省份的 ESC 始终大于 1,处于碳平衡能力较强的状态。

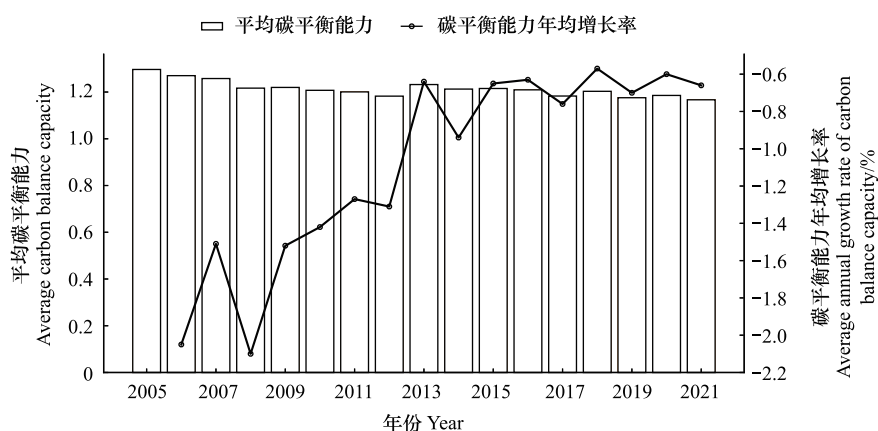


图 5 2005—2021 年中国 30 省份平均碳平衡能力与年均增长率变化

Fig.5 The changes of the carbon balance capacity and average annual growth rate of carbon balance capacity in China from 2005 to 2021

在研究期内,碳平衡能力的时空分布格局变化较小,呈“中部和西南高,东部和西北低”的分布特征(图 6)。碳平衡能力的高值区域主要分布在云南、四川、广西、黑龙江、青海和海南等,主要原因在于这些省份林草资源丰富,生态质量维持在相对较高的水平上,尤其是青海生态系统的固碳总量居全国第一,是巨大的碳汇盈余区,海南蓝色碳汇的发展潜力也十分巨大,因而碳平衡能力较强。低值区域主要分布在北京、天津、河北、上海、广东、新疆、内蒙古等,这些省份大多处于经济较为发达的核心区,人口密集度较高,高污染、高排放的产业活动集聚,如河北的钢铁和焦化等产业、广东的石化化工产业等,这些产业活动产生了大规模的碳排放,此外新疆和内蒙古的碳排放量居全国前列,产业结构重型化和能源结构高碳化特征较为明显,是这些省份碳平衡能力弱的主要原因。

3 中国省际碳排放空间关联分析

3.1 碳排放空间关联强度

为直观了解碳排放的空间关联结构,利用修正后的引力模型绘制 2005 年、2010 年、2015 年和 2021 年省际碳排放关联强度图(图 7),可以发现,随着时间的推移全国碳排放空间联系强度整体在不断加强,省份间碳排放已形成较为复杂化、多线程的网络关联关系,省际碳排放联系的空间格局逐渐清晰。2005—2021 年,碳排放空间联系紧密的省份主要分布在东部沿海地区和环渤海经济圈,以北京、上海、江苏、浙江、天津和广东为代表的节点省份在碳排放空间关联网络中扮演着“主导者”的角色,与其他省份有显著关联关系,这与它们所处地理位置优越、低碳技术先进和交通设施健全有关;西南、西北和东北地区的大部分省域经济发展相对落后,交通便捷性相对较弱,因此辽宁、山西、宁夏和新疆等省际碳排放联系相对较少,全国碳排放空间网络整体呈现出“核心-边缘”的结构特征。

3.2 碳排放空间网络的结构分析

3.2.1 碳排放空间网络的整体结构分析

为分析碳排放空间网络的整体特征,计算研究期内全国各省份碳排放网络密度、网络关联系数、网络等

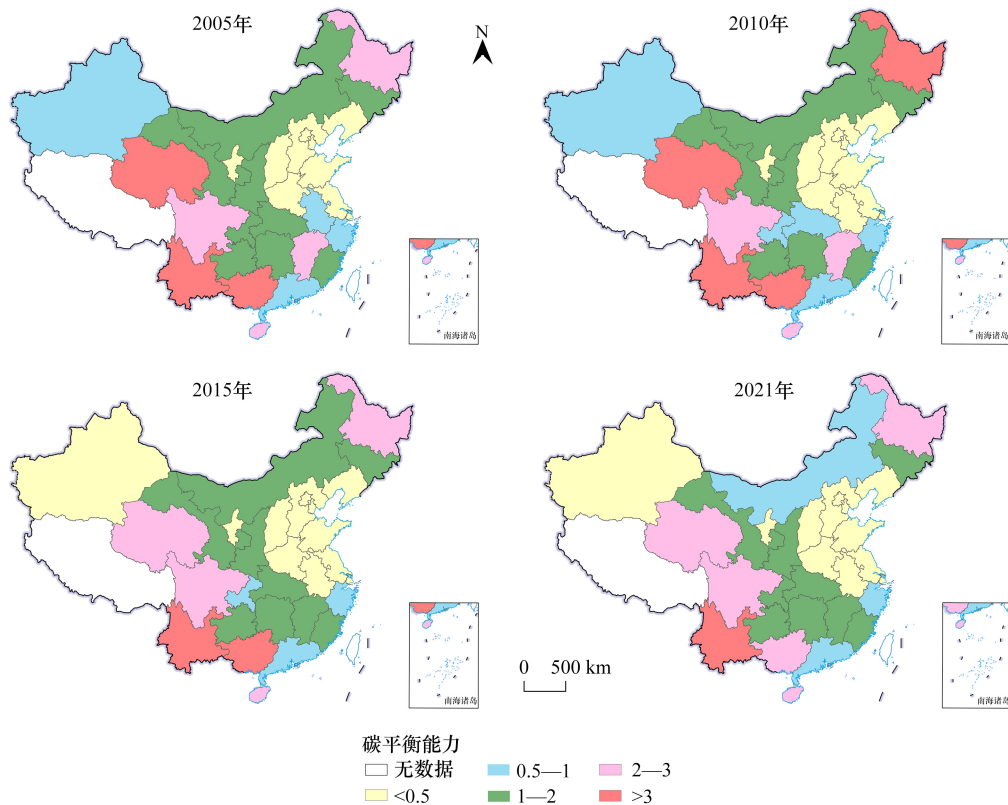


图 6 2005—2021 年中国省际碳平衡能力空间分异

Fig.6 Spatial differentiation of provincial carbon balance capacity in China from 2005 to 2021

级度和网络效率(图 8)。研究期内网络关联度始终为 1,说明碳排放的空间结构具有良好的连通性和稳固性,存在较为显著的空间溢出效应。网络密度整体呈攀升态势,可见碳排放的空间关联性逐步加强。但研究期内网络关联系数达到高峰值的 2015 年也仅有 196 个,远远低于最大可能网络关系数 870,说明中国省际碳排放空间关联程度不够紧密,空间关联网络的紧密程度有待提升。网络密度处于较低水平,在 2015 年达到的最大值 0.225,并未达到网络关联的最优状态。因此,需要加强各省份间低碳发展的交流和合作,同时推动省际间低碳技术、人力资源和资金等的空间优化配置。网络等级度整体呈下降态势,说明阶级森严的网络关联结构逐步弱化,边缘地带和从属位置的省际地位逐渐增强,碳排放网络的空间关联关系逐渐加强。网络效率整体呈现波动下降态势,由 2005 年 0.754 下降至 2021 年 0.705,年均下降 0.36%,说明省份与网络中其他省份之间的联系逐渐密切,网络的稳定性有待强化。

3.2.2 碳排放空间网络的个体结构分析

在测算 2005—2021 年所有节点的中心性指标基础上,发现所有年份各节点中心性指标的数值并没有显著差别,因此以 2021 年的中心性分析来揭示碳排放空间网络结构的个体特征(图 9)。

(1) 度中心度评价

度中心度是根据某个体与其他个体之间的实际联系数量来衡量该个体所处网络中心程度。入度中心度最高的省际主要处于网络的核心区和碳排放的高值区,其中,北京、上海、江苏、浙江、天津等经济较为发达省份的入度中心度排名靠前,它们通常承接大量外部碳排放的溢出关系,属于空间关联网络中的核心地位。这些省份主要位于经济蓬勃发展的东部沿海地区,社会经济的快速发展带来了能源需求总量的持续增长,而自身能源资源短缺,需要进行跨区域的能源资源调配,如北煤南运、西电东送、西气东输等,以满足负荷需求,因此在碳排放空间关联网络中表现为溢出的承接方;同时这些省份由于经济发展水平较高,对于绿色技术的研

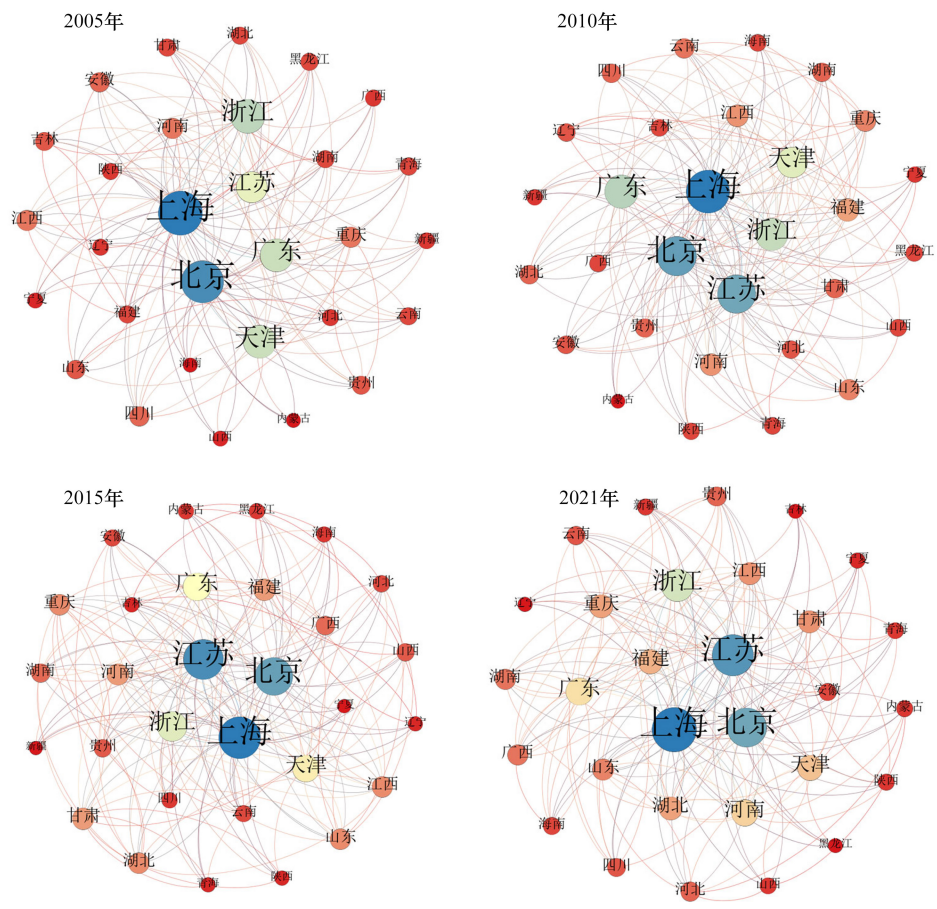


图 7 2005—2021 年中国省际碳排放空间关联网络

Fig.7 Spatial association network of provincial carbon emissions in China from 2005 to 2021

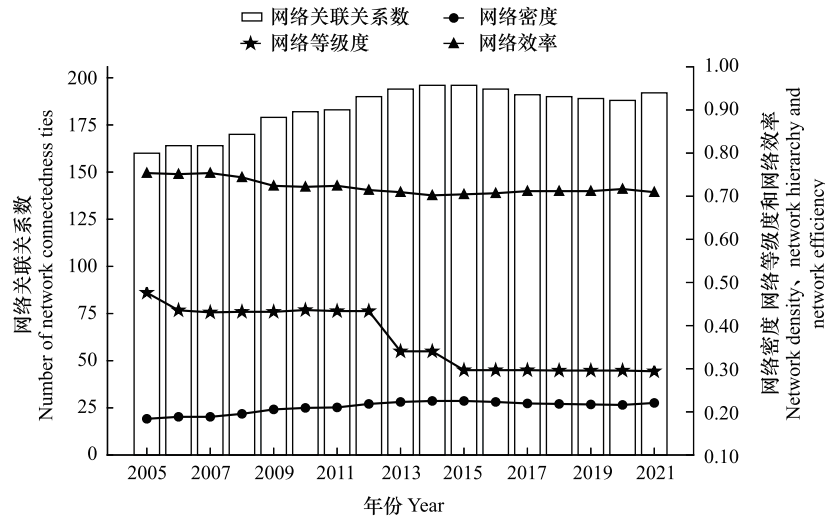


图 8 2005—2021 年中国省际碳排放整体网络特征演变趋势

Fig.8 Evolution trend of overall network of provincial carbon emissions in China from 2005 to 2021

发投入也远远高于其他省份,获得的绿色专利授权数量也遥遥领先,处于绿色技术创新的重点地区,能够通过绿色技术外溢,与其他省份保持密切联系。而出度中心度较高的省际主要位于邻近碳排放量较大的集聚区,

其中,广东、甘肃、湖北、重庆和贵州等为首的中西部核心地区的出度中心度始终高于均值,可能原因是这些省份大多能源资源富裕,经济发展相对缓慢,自身产业结构偏向重化工业,能够通过能源资源外溢,与其他省份形成显著的扩散和溢出效应,在空间网络中始终表现出强烈的溢出势力。

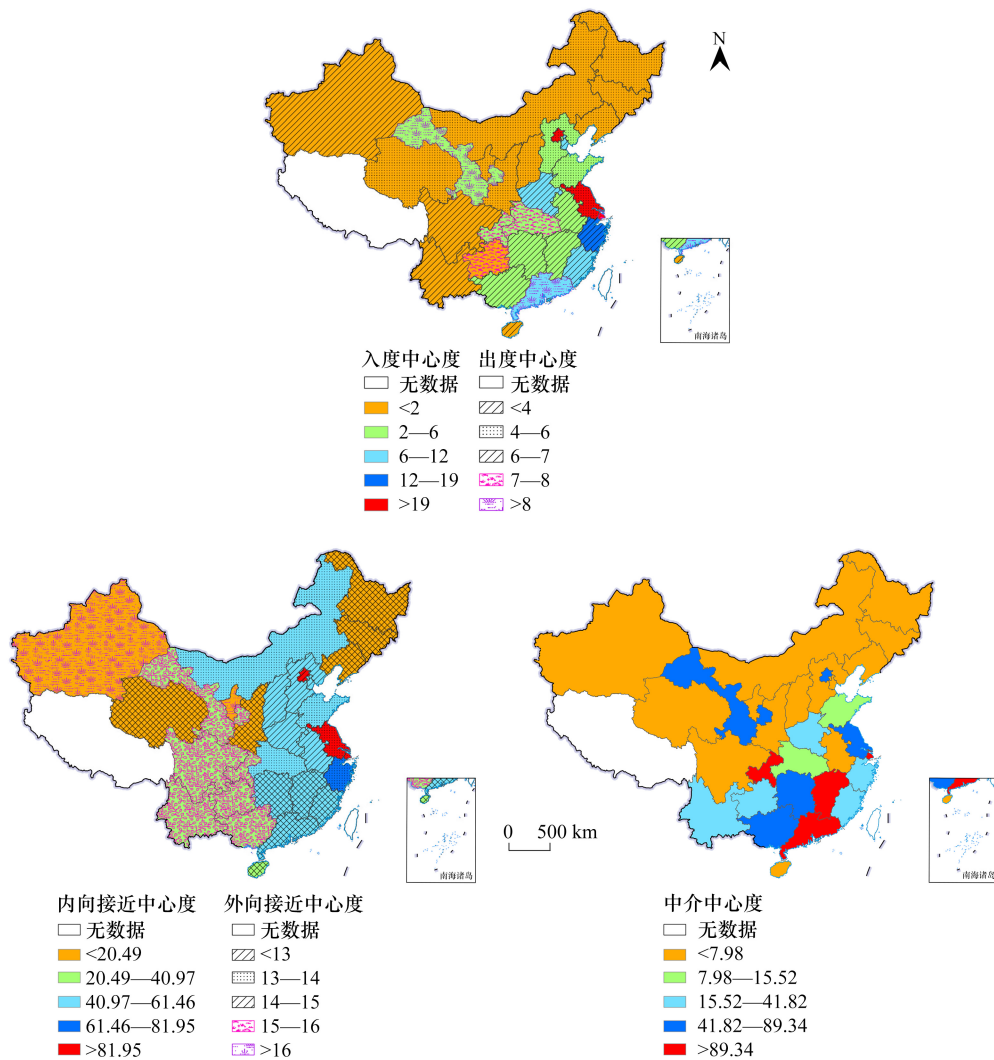


图9 2021年中国省际碳排放空间关联网络的中心性分析

Fig.9 Centrality analysis of provincial carbon emissions spatial association network in China in 2021

(2) 中介中心度评价

中介中心性表示某节点在连通其他两两关联节点间起到的“桥梁”作用,对其他节点关联关系的控制程度。中介中心度高于平均水平的省份有广东、上海、江西、重庆、北京、甘肃、江苏、广西、湖南、福建,表明这些省份在碳排放网络中显著扮演着“中介”和“枢纽”角色,能显著控制其他省份之间碳排放的关联关系。以广东、上海、重庆、北京、福建为代表的东中部核心省份,对低碳发展所需的研发人才、科技投入、产业转移以及低碳技术等重要资源要素的流动具有较强的掌控力,易与其他省份建立密切的合作联系,整体碳排放量和流动量较高,处于碳排放权交易试点建设的重点地区,影响其他省份碳排放交流的能力较强。而囿于地理位置偏僻、基础设施落后以及人口规模小等因素,吉林、宁夏和新疆排名靠后,中介中心度均为0,难以对其他省份的碳排放起到传递和控制作用。

(3) 接近中心度评价

接近中心度是根据某个体与其他个体之间产生联系的平均距离来衡量该个体与其他个体关联密切程度

的指标。内向接近中心度的高值集聚于东中部地区,这些省份普遍存在将全国最好的政策制度、经济资源、科技文化、公共设施等集中于一体的现象,处于科技创新、人口流动和经济中心。因此,这类省份碳排放行为的改变能快速影响其他省际的碳排放行为,在碳排放空间网络中扮演“中心行动者”角色,典型的内向接近中心度高值省域有上海、江苏、北京、浙江、天津、河北等。而外向接近中心度高值区基本分散于东北地区和西部地区,说明这些省份获取技术、信息、资本、人力等要素的能力较弱,同时受其他省份碳排放行为的拉动效果不明显,在空间网络中扮演“被动者”角色,此类特征较为明显的省份有新疆、宁夏、青海、黑龙江、广西、贵州等。

3.2.3 碳排放空间网络的整体与个体结构分析的区别与联系

总而言之,中国省际碳排放空间关联网络的整体与个体结构分析之间既存在区别又存在联系。两者的区别在于,整体结构分析(网络密度,网络关联度,网络等级度,网络效率)基于整体视角反映中国省际碳排放网络的关联程度和等级体系,个体结构分析(度中心度,中介中心度,接近中心度)则基于个体视角反映节点省份在碳排放网络中扮演的角色和发挥的作用。两者的联系在于,整体和个体结构的改变均会影响中国省际的碳排放量,且两者相互依存、互相影响。具体分析:提升度中心度意味着北京、上海、江苏、浙江等省份的核心辐射扩散能力增强,通过人才集聚、科技创新等资源优势产生“虹吸现象”及低碳技术溢出效应,易与其他省份保持密切的合作联系,进而提升网络的通达性和稳定性。提升接近中心度意味着上海、北京、江苏、浙江、河北等省份能快速与其他省份建立互动交流渠道,推动绿色产业、科技人才、低碳技术及清洁能源等资源要素的流通性和集聚性,降低欠发达地区的资源配置成本和技术创新成本,强化了碳排放网络的空间联动效应。提升中介中心性意味着整体网络中的节点省份与其他节点省份的“自主性”越强,广东、上海、重庆、北京、福建等省份在网络中起到“中介”和“桥梁”的作用越显著,产业转移、能源输送、技术溢出等方式的“便捷”渠道增多,通过联动周边省份进而实现了更广泛的区域协同发展和资源要素共享,从而推动空间关联关系的日益深入并逐渐往复杂化方向发展。因此,只有深入分析整体和个体网络结构,才能制定行之有效的差异化减排策略。

3.3 块模型分析

以 2021 年为例,为深入分析网络中各节点角色,利用 Ucient 中的 CONCOR 模块,将 30 个省份划分为 4 个板块,见表 2。2021 年碳排放空间关联网络共存在 192 个关联关系,其中 28 个关联关系存在于板块内部,占总关系数的 14.58%,164 个存在于板块外部,占总关系数的 85.42%,说明内部关联关系较弱,存在明显的溢出效应。板块一期望内部关系比例 10.35%小于实际内部关系比例 16.67%,外部省份碳排放流入强度大于板块内省份向外流入强度,属于“净收益板块”,主要包括北京、上海、天津、江苏 4 个省份。板块二期望内部关系比例 6.90%大于实际内部关系比例 0%,同其他省份存在较多的关联关系,但其内部省份间没有关联关系,属于“经纪人板块”主要包括福建、浙江、广东 3 个省份。板块三期望内部关系比例 31.04%大于实际内部关系比例 10.29%,板块四期望内部关系比例 41.38%大于实际内部关系比例 21.52%,板块内省份碳排放向外部的流出强度远大于外部省份的流入强度,因此均属于“净溢出板块”,主要包括云南、四川、贵州、新疆、海南等 23 个省份。

表 2 中国省际碳排放空间关联网络板块间的溢出效应

Table 2 Spillover effects between the blocks of spatial correlation network of provincial carbon emissions in China

板块 Plate	省份个数 Number of provinces	接收关系数 Number of relationships received		溢出关系数 Number of overflow relationships		期望内部 关系比例/% Expected internal relationship	实际内部 关系比例/% Actual internal relationships	板块类型 Plate type
		板块内 Inside plate	板块外 Outside plate	板块内 Inside plate	板块外 Outside plate	ratio	ratio	
板块一 Plate1	4	4	85	4	20	10.345	16.667	净收益板块
板块二 Plate2	3	0	35	0	21	6.897	0.000	经纪人板块
板块三 Plate3	10	7	25	7	61	31.034	10.294	净溢出板块
板块四 Plate4	13	17	19	17	62	41.379	21.519	净溢出板块

为了深入研究板块间的溢出关系,通过计算网络的密度矩阵和像矩阵识别板块间的传导机制,见表3。同时,通过板块间互动交流图更能明晰板块间的溢出关系(图10),图中箭头指向代表板块间溢出关系的流向。整体网络在2021年的碳排放网络密度是0.221,因此,把30个省份分成的四个板块之间的网络密度进行赋值,大于网络密度0.221的赋值为1,低于网络密度0.221的赋值为0,最终将密度矩阵转化为像矩阵。由表3可知,板块内部关联关系较为松散,溢出关系较为显著。其中,板块一借助自身条件的优越性,接收来自板块一内部、板块二、板块三和板块四的溢出关系,板块二在网络中同时存在外部的溢出关系和接收关系,发挥“枢纽”作用,板块三和板块四均存在外部溢出关系。总体来说,中国省际碳排放空间网络中四个板块间的关联关系不够密切,未来应注重板块间的联动,协同实现低碳绿色发展。

表3 中国省际碳排放空间关联网络板块的密度矩阵和像矩阵

Table 3 Density matrix and image matrix of spatial correlation network plate of provincial carbon emissions in China

板块 Plate	密度矩阵 Density matrix				像矩阵 Image matrix			
	板块一 Plate1	板块二 Plate2	板块三 Plate3	板块四 Plate4	板块一 Plate1	板块二 Plate2	板块三 Plate3	板块四 Plate4
板块一 Plate1	0.333	0.167	0.150	0.231	1	0	0	1
板块二 Plate2	0.500	0.000	0.433	0.051	1	0	1	0
板块三 Plate3	0.750	0.867	0.078	0.038	1	1	0	0
板块四 Plate4	0.942	0.179	0.046	0.109	1	0	0	0

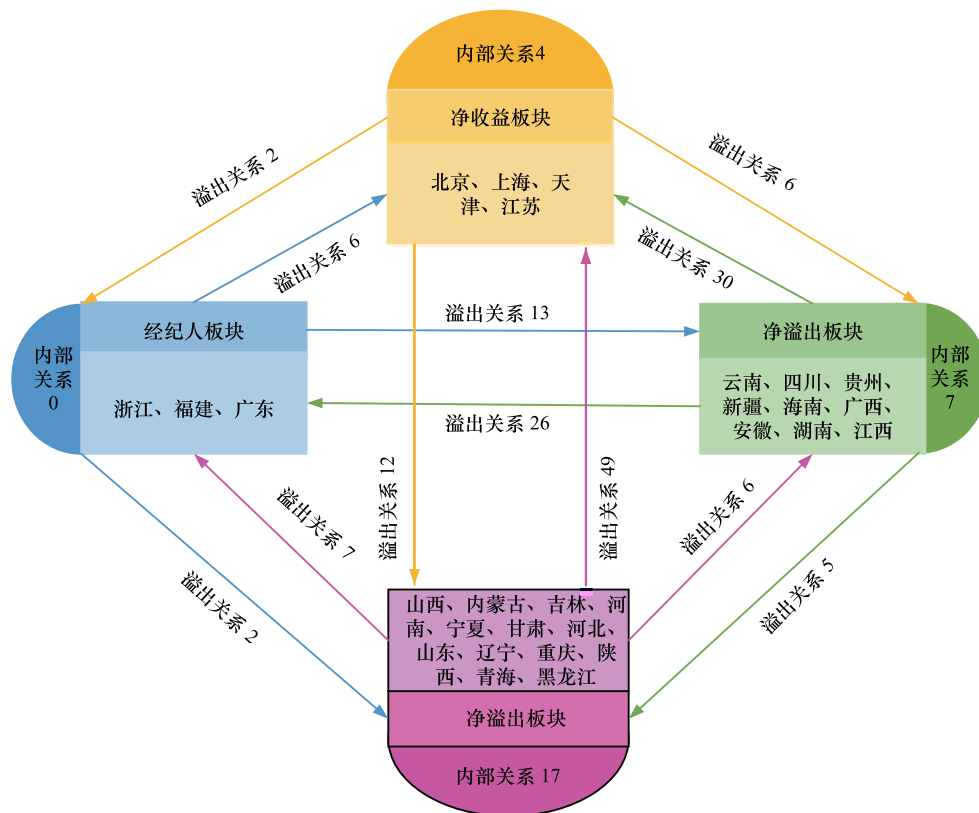


图10 中国省际碳排放空间关联网络四大板块成员构成及互动关系

Fig.10 Composition and interaction of the four blocks of spatial correlation network of provincial carbon emissions in China

4 中国省际碳平衡分区空间优化

4.1 碳平衡分区及区域特征分析

首先确定碳平衡大区,基于对碳生态承载系数的计算,将中国省际划分为2类区域:总体碳汇区和总体碳

排区。再叠加局部空间自相关的空间集聚性和碳排放空间网络关联模块的实证结果,将碳平衡大区划分为6类碳平衡分区(图 11),即:集中碳汇区、局部调节区、核心-联动碳排区、核心-联动孤岛区、一般-联动碳排区、一般-孤岛碳排区。碳平衡分区的划定依据和特征如表 4。

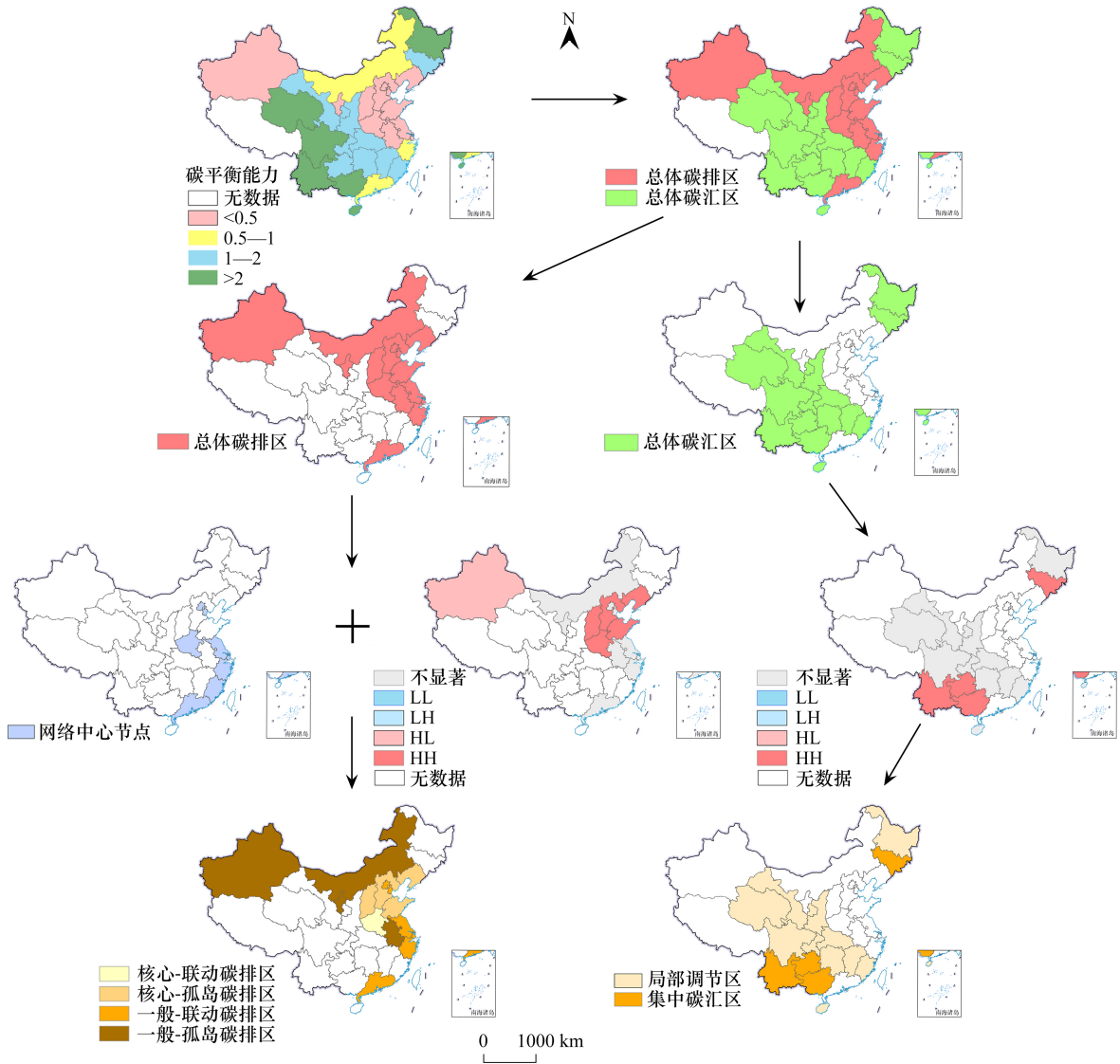


图 11 中国省际碳平衡分区划定过程
Fig.11 Delineation process of carbon balance zoning in China

4.2 碳平衡分区关键省域识别

为强调省际碳排放的空间公平性,利用中心性分析和块模型分析对碳排放网络中的关键省域进行识别,有利于明晰“双碳”目标驱动下各省份需要担负的减排责任。中国碳平衡分区的关键省域被划分为 3 种类型,即核心省域、桥梁省域和行动省域(表 5)。

4.3 碳平衡分区管控方案及建议

基于对中国省际单元碳排放量、碳汇量、碳生态承载系数、碳排放空间网络关联模型和探索性空间分析方法等相关研究,最终,中国 30 个省(自治区、直辖市)被划分为 6 种碳平衡功能区和 3 种关键省域(图 12)。

碳平衡分区侧重于以低碳发展为导向,为推动中国省际深度协同创新发展提供借鉴参考。因此针对碳平衡功能区的特点,确定各个分区未来的优化方向,从而提出区域间的科学地协同减排方案。

表 4 碳平衡分区划分依据及特征

Table 4 Identification criteria and characteristics of carbon balance zoning

碳平衡大区 Carbon balanced region	碳平衡功能区 Carbon balance functional region	区域划分依据 Regionalization basis	区域特征 Regional characteristics
总体碳汇区 Overall carbon sink area	集中碳汇区	ESC>1,且属于碳汇量的 HH 聚类区	面积占整体区域的 11.70%,该区域碳汇量相对较高,碳汇功能较碳排功能显著突出,属于碳汇高值集聚区
	局部调节区	ESC>1,且属于碳汇量的 HH 聚类区以外的区域	面积占整体区域的 37.37%,该区域碳汇功能相对较强,但是碳汇绝对量较为有限,且未形成集中连片区
总体碳排区 Overall carbon emission area	核心-联动碳排区	ESC<1,碳排量的 HH 聚类区,且属于网络的核心节点	面积较小,占整个区域的 1.99%,该区域碳排功能相对较强,碳排放的空间集聚性和关联性十分显著,属于碳排放活动最密集、最活跃的地区
	核心-孤岛碳排区	ESC<1,碳排量的 HH 聚类区,且不属于网络的核心节点	面积占整个区域的 7.66%,该区域仍是碳排放的集中高值区,碳排放功能仍然相对较强,与其他省份的碳排放活动有一定关联关系,但不处于网络中的核心位置。
	分散-联动碳排区	ESC<1,碳排量的 LL 聚类区,且属于网络的核心节点	本研究中不存在此类型区域
	分散-孤岛碳排区	ESC<1,碳排量的 LL 聚类区,且不属于网络的核心节点	本研究中不存在此类型区域
	一般-联动碳排区	ESC<1,不属于碳排量的 HH 或 LL 聚类区,且属于网络的核心节点	面积占整个区域的 4.99%,该区域碳排放活动没有明显的集聚特征,但与其他省域之间碳排放活动的关联较为密切
	一般-孤岛碳排区	ESC<1,不属于碳排量的 HH 或 LL 聚类区,且不属于网络的核心节点	面积占整个区域的 36.30%,该区域既没有碳排放活动的集聚效应,也没有融入碳排放网络的核心区,因而难以感知其他省域碳排放行为的改变,自主减排能力微弱

表 5 中国省际碳排放网络关键省域识别及特征

Table 5 Key provincial identification criteria and characteristics of county carbon emission network in China

省域类型 Province type	识别依据 Identification Basis	区域特征 Regional characteristics
核心省域 Core provinces	入度中心度较高且属于网络中的核心节点的省域	处于碳排放网络中的核心位置,具有显著影响网络中其他省域碳排放行为的能力
桥梁省域 Bridges provincial	中介中心度较高且属于网络中“经纪人板块”的省域	在沟通碳排放网络核心和边缘区之间发挥着枢纽作用,对维持整个网络的稳定性具有重要意义
行动省域 Action provinces	内向接近中心度较高属于网络中“净溢出板块”的省域	在网络中与其他省域间有距离最短的联系,可更快地影响网络中其他省域的碳排放行为

(1)集中碳汇区(广西、云南、贵州、吉林):此类区域林地和草地面积较大,社会生产活动强度较弱,生态压力较小,碳汇功能较为突出,并且对其他地区的碳溢出具有吸收作用,有利于缓解全省碳压力。因此,该区域未来发展要重点提升生态涵养功能,注重保护和增加森林和草原的范围,严格界定区域开发边界,划定生态保护区;同时依托当地丰富的自然资源,推动发展生态旅游业,催生环境友好型的新产业新模式。

(2)局部调节区(重庆、福建、甘肃、四川、陕西、青海、江西、湖南、湖北、黑龙江、海南):这类区域蕴藏着相对丰富的能源资源,可为能源依存度较高的地区输送能源,在碳排放网络中表现出空间溢出效应,一定程度上能起到联动作用。此外,该区域还接收经济发达地区转移的高耗能高污染产业,生态压力相对较高。因此,该区域应提高对高碳产业的准入门槛,与发达地区的技术、人力等生产要素,以及研发、制造等生产性服务业形成密切互动,引入新的低碳技术和生产方式等,努力降低由于接收资源密集型和高载能产业带来的影响;同时积极开发太阳能、水能、风能等可再生清洁能源,从而不断向北京、上海、天津、江苏等因自身资源禀赋无法满

足经济发展的省份输送可再生能源。

(3) 核心-联动碳排区(河南):该区域经济发展较快,人口密集,工业化、城镇化程度高,导致碳排放总量高、强度大,当地碳汇资源远不能抵消碳排放,造成严重的生态赤字。此外在碳排放网络中处于较中心位置,辐射影响能力较强。因此,该区域应重点关注和积极调节其经济发展模式,基于低碳发展理念,重新调整过度拥挤的产业布局,并加强对重点行业实施减排措施;同时利用自身辐射能力,鼓励开展碳交易试点工作、提升能源利用效率和低碳清洁能源替代行动,带动周边地区碳排放行为的改变。

(4) 核心-孤岛碳排区(山西、山东、河北、辽宁):该区域经济发展基础较好,能源资源拥有量较高,通常以能耗显著、效率次优的重工业为主,工业基础雄厚,整体碳排放量较大。此外,它们地处北京、天津、江苏等发达地区的周围,承担着东西部地区之间碳排放要素资源的输送,在关联网络中处于网络枢纽的位置。因此,该区域应以产业转型绿色发展为导向,调整能耗结构,积极提升能耗效率和功能集约化生产,加快实现产业转型升级;同时发挥地区间协同减排的中介作用,促进低碳技术的流通速度。

(5) 一般-联动碳排区(北京、上海、天津、浙江、江苏、广东):在碳排放网络中,该区域对其他地区的劳动力、信息技术、资金等要素的流入具有虹吸效应,成为空间关联网络中的受益方,并且在网络中居于主导位置,与其他地区存在较多的关联关系。因此,该区域应积极调整产业结构优化升级,大力发展第三产业和高新技术产业,减少高能耗高污染产业的发展,多发展以低碳技术为依托的生产性服务业和制造业等;同时有效利用北京、天津、上海等核心节点的影响力和经济辐射,加强减排降碳和能源结构转型的先进示范作用,鼓励率先应用成熟的绿色低碳技术、经验和制度设计,带动边缘省份的低碳发展,实现区域有效同步推进协同减排。

(6) 一般-孤岛碳排区(安徽、新疆、宁夏、内蒙古):该区域大多能源富足而经济落后,地理位置较为偏僻,交通基础设施不太健全,与其他省份的互动交流较少,受到其他省份的溢出效应较弱,在碳排放空间网络中处于“被支配”的边缘位置。因此,该区域需要上级政府提供一定的财政、技术支持,帮助其引进先进的能源和低碳技术,引导其建立和完善碳交易市场;同时给予适当的优惠支持政策,重点建立不同经济发展水平地区之间的技术、能源、产业合作渠道,加强地区之间的空间关联。

同时,根据中国省际碳排放网络关键省域识别及特征,尝试提出相关的低碳优化建议:

(1) 核心省域(北京、上海、江苏、浙江、天津、广东):该类省域未来适合在创新层面发力,以具有根本性、引领性和原创性影响的开发、研究、设计等方向为导向,充分发挥低碳转型引领作用。如设立“双碳”技术创新试验区、碳源碳汇立体监测示范区等。

(2) 桥梁省域(浙江、广东、福建)该类省域未来适合在传输层发力,充分利用自身的地理位置和制度政策交流等优势,以及地区之间所形成的比较优势,加快比较优势较强省份人才、技术和资金的输出,强化比较优势较弱省份能源的高质量输送,构建地区之间交流合作的渠道,以减少碳排放在网络中的转移。

(3) 行动省域(河北、河南、山东、湖南、湖北、江西、安徽、山西、内蒙古):该类省域未来适合在应用层发力,积极将绿色低碳技术、高端技术人才和资本等资源要素应用到提高能源利用率等路径上来,同时依托自身优势资源开发风电、光伏等清洁能源,提高碳排放的经济效益。

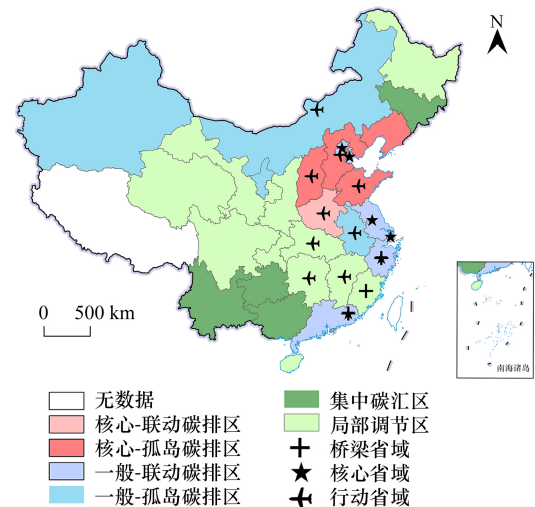


图 12 中国省际碳平衡分区与关键省域空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of provincial carbon balance zones and key provinces in China

5 结论与讨论

在测算中国省际碳排放、碳汇和碳平衡能力的基础上,基于修正后的引力模型构建碳排放空间关联矩阵,利用社会网络分析方法揭示中国省际碳排放网络的结构特征,并划分碳平衡分区以及试图提出低碳发展策略。研究结论主要如下:

(1) 2005—2021 年中国省际碳排放量总体呈攀升态势,碳汇量呈波动微增趋势,但年均增长率均表现为下降趋势。整体来看,碳排放量呈现“东部高,中西部低”的空间分布特征,碳汇量呈“中西部高,东部低”的特点。研究期内碳平衡能力呈微减趋势,但碳补偿率相对较高,全国约 43.33% 的省份处于碳平衡较强的状态。

(2) 研究期内中国省际碳排放空间关联关系紧密且规模较大,空间网络的关联性和稳定性持续提升,空间分布格局逐渐清晰,呈现“核心-边缘”式递减趋势,北京、上海、江苏、浙江、天津和广东位于网络中的核心领导地位。

(3) 碳平衡功能区以碳生态承载系数、碳排放空间关联网络和探索性空间数据分析为依据,将中国省际细分为集中碳汇区、局部协调区、核心-联动碳排区、核心-孤岛碳排区、一般-联动碳排区和一般-孤岛碳排区 6 种区域类型,同时识别了核心省域、行动省域和桥梁省域等 18 个关键省域,并试图提出协同减排的区域化对策建议。

但本文还存在一定局限性,需要在后续研究加以解决。第一,在碳排放估算方面,本文选取的是 30 个省份的化石能源消费碳排放数据,如果后期的研究能准确获取化石能源消费、工业生产活动、农业生产活动、土地利用变化、废弃物处理和生物呼吸作用这 6 个方面的碳排放数据,这样计算出的碳排放总量与实际排放量基本一致;第二,在碳排放空间网络的构建中,各省份之间的碳排放要素难以恰当量化,这也是后期研究的一个方向;第三,碳平衡分区聚焦于我国各个省份,涉及到的碳平衡分区是基于省级层面,随着数据资料的可获得性和完整性,可以考虑以市域甚至是县域为单位进行碳平衡分区的研究,那么会更有利于区域协同减排的实现。

参考文献 (References):

- [1] 甘畅,王凯. 中国省际服务业碳排放空间网络结构及其驱动因素. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2264-2272.
- [2] 吴传清,邓明亮. 数字经济发展对中国工业碳生产率的影响研究. 中国软科学, 2023(11): 189-200.
- [3] 孙兴,刘熙. 中国城市碳排放效率的时空演变及影响因素——基于异质性空间随机前沿模型. 地理研究, 2023, 42(12): 3182-3201.
- [4] Wang Z Y, Zhang J X, Luo P J, Sun D Q, Li J M. Revealing the spatio-temporal characteristics and impact mechanism of carbon emission in China's urban agglomerations. Urban Climate, 2023, 52: 101733.
- [5] Wang J J, Wei J J, Zhang W R, Liu Z S, Du X L, Liu W X, Pan K. High-resolution temporal and spatial evolution of carbon emissions from building operations in Beijing. Journal of Cleaner Production, 2022, 376: 134272.
- [6] 胡宗义,李好,刘佳琦,何冰洋. 中国地方政府环境责任履行水平测度及其时空演变. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(10): 1-14.
- [7] 高威,李强,蒲雨池,吕军骁,江婉婷. 中国生态用地碳汇时空演进及综合分区研究. 生态环境学报, 2023, 32(9): 1537-1551.
- [8] Gui D W, He H G, Liu C M, Han S S. Spatio-temporal dynamic evolution of carbon emissions from land use change in Guangdong Province, China, 2000-2020. Ecological Indicators, 2023, 156: 111131.
- [9] 朱嘉豪,许章华,李诗涵,陈秋霞,林中原,凌金瑶,王琳,刘智才. 福州都市圈能源消费碳排放空间网络结构演化及其影响因素研究. 地理与地理信息科学, 2023, 39(6): 75-83.
- [10] 张苗,刘璇,彭山桂,张玉臻,陈银蓉,文兰娇. 中国省域土地利用碳排放效率的空间关联网络演变特征与形成机制. 中国土地科学, 2023, 37(10): 91-101.
- [11] 高煜昕,高明. 城市生活垃圾碳排放效率空间关联网络及影响因素. 中国环境科学, 2023, 43(11): 5900-5912.
- [12] Rong T Q, Zhang P Y, Li G H, Wang Q X, Zheng H T, Chang Y H, Zhang Y. Spatial correlation evolution and prediction scenario of land use carbon emissions in the Yellow River Basin. Ecological Indicators, 2023, 154: 110701.
- [13] 张正峰,张栋. 基于社会网络分析的京津冀地区碳排放空间关联与碳平衡分区. 中国环境科学, 2023, 43(4): 2057-2068.
- [14] Zhou W W, Cao X M, Dong X F, Zhen X. The effects of carbon-related news on carbon emissions and carbon transfer from a global perspective:

- evidence from an extended STIRPAT model. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 425: 138974.
- [15] Jiang S, Li E X, Wei Y M, Yan X X, He R F, Banny E T, Xin Z. Measurement and influencing factors of carbon emission efficiency based on the dual perspectives of water pollution and carbon neutrality. *The Science of the Total Environment*, 2024, 911: 168662.
- [16] 赵凡, 许佩. 长江经济带能源消费碳排放强度时空演变及影响因素. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(11): 2225-2236.
- [17] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3847-3856.
- [18] Lee C C, Zhao Y N. Heterogeneity analysis of factors influencing CO₂ emissions: the role of human capital, urbanization, and FDI. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 185: 113644.
- [19] 姚成胜, 钱双双, 毛跃华, 李政通. 中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解及空间分异. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 10-19.
- [20] Xin L, Li S N, Rene E R, Lun X X, Zhang P Y, Ma W F. Prediction of carbon emissions peak and carbon neutrality based on life cycle CO₂ emissions in megacity building sector: dynamic scenario simulations of Beijing. *Environmental Research*, 2023, 238(Pt 1): 117160.
- [21] 方涵潇, 刘灿, 蒋康, 肖怀亮, 唐运. 湖南省交通运输领域碳排放达峰路径研究. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(4): 61-69.
- [22] Zhang J J, Yan Z F, Bi W B, Ni P G, Lei F M, Yao S S, Lang J C. Prediction and scenario simulation of the carbon emissions of public buildings in the operation stage based on an energy audit in Xi'an, China. *Energy Policy*, 2023, 173: 113396.
- [23] 顾汉龙, 马天骏, 钱凤魁, 蔡玉梅. 基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 288-296.
- [24] Zhou S, Gu A L, Tong Q, Guo Y F, Wei X Y. Multi-scenario simulation on reducing CO₂ emissions from China's major manufacturing industries targeting 2060. *Journal of Industrial Ecology*, 2022, 26(3): 850-861.
- [25] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 董红敏, 张称意, 王长科, 朱建华, 高庆先, 方双喜, 潘学标, 郑循华. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读. *环境工程*, 2019, 37(8): 1-11.
- [26] 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.
- [27] 刘志华, 徐军委. “双碳”目标下中国省域碳排放公平性及其影响因素. *地理科学*, 2023, 43(1): 92-100.
- [28] 孔凡斌, 曹露丹, 徐彩瑶. 县域碳收支核算与碳综合补偿类型分区——以钱塘江流域为例. *经济地理*, 2023, 43(3): 150-161.
- [29] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [30] 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.
- [31] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, Li Y, Meng J, Mi Z F, Liu Z, Zhang Q. China CO₂ emission accounts 1997-2015. *Scientific data*, 2018, 5(1): 1-14.
- [32] 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 吕乐婷. 中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局. *生态学报*, 2020, 40(2): 447-458.
- [33] Cheng J, Huang C B, Gan X T, Peng C H, Deng L. Can forest carbon sequestration offset industrial CO₂ emissions? A case study of Hubei Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426: 139147.
- [34] 闫丰, 庞娇, 安晓明, 徐佳音, 代鹏宇, 刘鑫, 申琳, 陈永霞, 陈亚恒. 基于修正碳账户的京津冀县域生态补偿量化及优先级分区. *生态学报*, 2023, 43(20): 8332-8343.
- [35] 周姝含, 曹永强, 么嘉棋, 王菲, 常志冬. 东北三省碳源/汇和碳盈亏时空分布与影响因素. *生态学报*, 2023, 43(22): 9266-9280.
- [36] Shen W R, Liang H W, Dong L, Ren J Z, Wang G J. Synergistic CO₂ reduction effects in Chinese urban agglomerations: perspectives from social network analysis. *The Science of the Total Environment*, 2021, 798: 149352.
- [37] Liu S N, Chevallier J, Xiao Q T. Identifying influential countries in air pollution control technologies: a social network analysis approach. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 389: 136018.
- [38] 邵帅, 徐俐俐, 杨莉莉. 千里“碳缘”一线牵: 中国区域碳排放空间关联网络的结构特征与形成机制. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(4): 958-983.
- [39] 孟德友, 陆玉麒. 基于引力模型的江苏区域经济联系强度与方向. *地理科学进展*, 2009, 28(5): 697-704.
- [40] Bai C Q, Zhou L, Xia M L, Feng C. Analysis of the spatial association network structure of China's transportation carbon emissions and its driving factors. *Journal of Environmental Management*, 2020, 253: 109765.
- [41] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区. *生态学报*, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [42] 吕倩, 刘海滨. 基于夜间灯光数据的黄河流域能源消费碳排放时空演变多尺度分析. *经济地理*, 2020, 40(12): 12-21.
- [43] Zhang D H, Zhou C S, He B J. Spatial and temporal heterogeneity of urban land area and PM_{2.5} concentration in China. *Urban Climate*, 2022, 45: 101268.