

DOI: 10.20103/j.stxb.202401020005

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. 生态学报, 2024, 44(16): 7036-7050.

Wang Y Q, Zhen W Q. Spatial correlation effect and influencing factors of provincial carbon emission performance in China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7036-7050.

中国省际碳排放绩效空间关联效应及影响因素

王奕淇, 甄雯青*

长安大学经济与管理学院, 西安 710064

摘要: 提高碳排放绩效是促进环境与经济平衡, 推动区域协同可持续发展的关键所在。借助超效率 SBM 模型测算中国 30 个省份 2005—2022 年的碳排放绩效, 并采用修正的引力模型和社会网络分析法对网络的结构特征、相互关系的传递路径、网络效应和网络影响因素进行分析, 结果显示: ①中国碳排放绩效显著增长, 其空间关联网络特征明显, 表现为以“北京—上海”双核为中心的东密西疏格局, 并逐渐形成复杂化、紧密化的网络分布。②网络中板块内的关系数量明显低于板块间, “净溢出”和“净受益”板块间的直接联系和关联程度增强, “双向溢出”和“经纪人”板块的影响作用逐渐减弱。③关联网络的整体和个体结构特征均显著影响碳排放绩效, 提升网络密度、关联关系数、度数中心度、接近中心度和中介中心度, 降低网络效率和网络等级度可以有效提高碳排放绩效。④空间距离缩小, 经济发展、技术创新、对外开放和城镇化水平的差异扩大可以显著提升网络的关联强度, 产业结构、人口密度、环境规制、能源消费强度差异对网络关联强度的影响大小和方向表现出阶段性特征。

关键词: 碳排放绩效; 空间关联网络; 社会网络分析; 网络效应; 影响因素

Spatial correlation effect and influencing factors of provincial carbon emission performance in China

WANG Yiqi, ZHEN Wenqing*

School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract: At the completion of the “1+N” policy system for the “dual-carbon” target, improving carbon performance is a key to promoting balance between the environment and the economy and facilitating synergistic regional sustainability. However, the existing studies mainly focus on the measurement of carbon emission performance, influencing factors and traditional spatial scales, lacking exploration of the spatial correlation strength, network characteristics, and network conditions of various provinces and regions of carbon emission performance, and rarely examining the influencing factors of spatial network relationships from the perspective of spatial networks. Therefore, this article used the super-efficient SBM model to calculate the carbon emission performance of 30 provinces in China from 2005 to 2022. The structural characteristics of the network, transmission paths of interrelationships, network effects, and influencing factors were analyzed using the modified gravity model and social network analysis. The results are as follows: ① China's carbon emission performance increased significantly, the spatial correlation network characteristics were obvious, manifested as a dense in the east and sparse in the west pattern with the “Beijing—Shanghai” double core actors as the center, and gradually formed a complex and compact network distribution form. ② The number of relationships within each sector of the network is significantly lower than between sectors, and the direct connection and correlation between the “net spillover”

基金项目: 国家社会科学基金项目 (23BTJ029); 陕西省创新能力支撑计划软科学项目 (2023-CX-RKX-106); 中央高校基本科研项目 (300102233604)

收稿日期: 2024-01-02; **网络出版日期:** 2024-06-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zwq00462@163.com

#限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台和西藏地区的统计数据。

and “net beneficial” sectors were strengthened. The influence of the “bidirectional spillover” and “broker” sectors has been gradually weakening. ③ The overall and individual structural characteristics of the correlation network significantly affect carbon emission performance. Increasing network density, number of relationships, degree centrality, closeness centrality, and intermediate centrality, decreasing network efficiency and network hierarchy are effective in improving carbon emission performance. ④ Reduced spatial distance and widening differences in levels of economic development, technological innovation, openness to the outside world, and urbanization among different provinces could significantly enhance the strength of network connections. The impact of differences in industrial structure, population density, environmental regulations, and energy consumption on network connection strength showed phasic characteristics. The study puts forward countermeasures and suggestions in terms of enhancing the strength of the carbon emission performance linkage network, giving full play to the network effect, and strengthening the transmission of influencing factors in the network, which have certain reference values for the country and region to improve the overall carbon emission performance and accelerate the synergistic green development in the region.

Key Words: carbon emission performance; spatial association network; social network analysis; network effect; influencing factor

温室气体排放引起的气候变化问题引起全球的高度关注,碳达峰和碳中和已成为世界主要国家关注的重要议题^[1]。2021年10月,国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》,明确提出对于单位国内生产总值二氧化碳碳排放比,2020—2025年要降低18%,2005—2060年要下降65%以上。2022年10月,习近平总书记在二十大报告中提出推进绿色低碳发展,积极稳妥推进碳达峰碳中和,有计划分步骤实施碳达峰行动,积极参与应对气候变化全球治理。在此背景下,改善碳排放绩效成为推动社会经济向低碳转型发展的重要举措,这一举措对于中国实现“双碳”目标、成功进行低碳转型、重塑环境与经济之间的关系起到至关重要的作用。因此,对碳排放绩效展开深入研究,探讨空间关联网络的形成机制和演变特征,找准不同地区的发展定位,对提高环境保护质量,推进中国实现绿色发展具有重要意义。

碳排放绩效是社会发展过程中要素投入与最终产出间关系变化的结果,是揭示环境与经济平衡、可持续发展的重要指标^[2]。碳排放绩效作为环境绩效评估的关键组成部分,现有研究主要围绕碳排放绩效的测算及影响因素展开探讨。对于碳排放绩效的测算,传统DEA方法忽视了非期望产出,可能会导致测算结果出现误差^[3],部分学者在此基础上进行改进,利用DEA-Malmquist^[4]、超效率SBM模型^[5]、非径向方向性距离函数^[6]等方法进行测度。对于碳排放绩效的影响因素,学者们发现技术进步是促进碳排放绩效提高的主要源泉^[7],产业结构与能源结构的优化升级可显著提升碳排放绩效^[8-9],贸易开放为企业引进先进技术和设备,通过利用技术模仿学习效应改善碳排放绩效^[10],同时跨国企业的参与导致国内市场竞争加剧,本土企业基于成本减少研发投入,阻碍了碳排放绩效的提高^[11]。说明从投入产出角度对碳排放绩效进行评价可有效确定资本、劳动、能源等要素的配置调整方向,同时从技术创新、产业结构、能源结构、贸易开放等指标出发深挖其影响因素,可为提升碳排放绩效提供新的视角。

随着空间计量技术的进步及区域协同减排活动的推进,学者们开始从空间视角对碳排放绩效进行探讨。对碳排放绩效空间尺度的研究主要是通过利用核密度估计^[12]、变异系数^[13]、泰尔指数^[14]、空间自相关^[15]、马尔科夫链^[16]、标准差椭圆^[17]、收敛性检验^[18-19]等方法,分析碳排放绩效的空间分异、空间溢出以及空间收敛等问题。在这一过程中,碳排放绩效逐渐突破了传统的地理邻近局限,呈现出复杂的空间关联网络特征^[1]。然而,传统的空间计量方法通常从“属性角度”出发对地理上的相邻关系进行研究,无法揭示碳排放绩效的空间关联网络特征^[20]。部分学者引入社会网络分析法(SNA)对碳排放的空间关联关系进行考察,利用碳排放的“关系数据”刻画其空间关联网络,如张帅等^[21]、李爱等^[22]、Chen等^[23]、方大春和王琳琳^[24]利用社会网络分析法对中国省域、城市群、行业等碳排放的空间关联网络结构进行探讨。但随着社会区域交流日益频繁,缺

少对区域间“关系数据”的识别不利于实现跨区域协同治理,同时目前采用社会网络分析法进行空间层面的研究十分有限,对中国碳排放绩效空间关联网络特征形态讨论不足,不利于制定差别化减排增效政策。

综上所述,现阶段的研究主要聚焦于碳排放绩效的测算、影响因素及传统空间尺度,仍存在进一步探讨的空间,一是现有碳排放绩效的研究大多是考虑区域的邻近效应,鲜有关注碳排放绩效在全国省域范围内可能形成的空间关联效应;二是基于“属性数据”而非“关系数据”,导致研究结果无法揭示碳排放绩效的空间关联网络特征,也无法明晰各区域在空间关联网络中的地位;三是现阶段对于碳排放绩效影响因素的探讨,主要是使用传统计量方法进行检验,鲜少从空间网络视角考察影响其空间网络关联“关系”的影响因素。鉴于此,本文以中国省域的碳排放绩效为研究对象,在构建超效率 SBM 模型测度碳排放绩效的基础上,利用修正的引力模型和社会网络分析法,对中国碳排放绩效的空间关联网络特征、关联网络效应及其影响因素进行研究。可能的边际贡献在于:一是基于“关系数据”探究中国碳排放绩效的空间关联网络特征和聚类方式,深入剖析各省在网络中的地位与角色;二是对空间关联网络效应进行探讨,厘清网络整体和个体特征对碳排放绩效的影响,为减碳增效提供了区域层面的指导思路;三是利用 QAP 回归模型研究碳排放绩效空间关联网络的影响因素,为优化碳排放绩效空间关联网络、降低区域间的碳排放绩效差异提供参考依据。

1 研究方法数据来源

1.1 碳排放绩效测算

当今社会经济要素与碳排放关系紧密,并对区域低碳协调和绿色均衡发展具有重要意义^[25]。因此,考虑碳排放绩效测算存在非期望产出的实际需求,借鉴杨玉珍等^[26]的研究选取包含非期望产出的超效率 SBM 模型对中国碳排放绩效进行核算。参考于向宇等^[27]、何艳虎等^[28]的研究,从资本、劳动和自然资源三个层面确定碳排放绩效的投入要素,并根据 Khan 等^[29]、徐琼等^[30]的研究,采用经济和社会层面的指标表示期望产出、环境污染层面即二氧化碳排放量表示非期望产出,详见表 1。

表 1 中国碳排放绩效指标体系
Table 1 Indicator system of carbon emission performance in China

类别 Classification	一级指标 First level indicators	二级指标 Second level indicators	三级指标(单位) Third level indicators
投入要素 Input	资本投入	资本存量	永续盘存法计算的资本存量/亿元
	劳动投入	就业水平	各省年末就业总人数/万人
	自然资源投入	能源投入	能源消费总量/万 t 标准煤
期望产出 Expected output	经济效益产出	土地投入	城市建设用地面积/km ²
		经济增长	国内生产总值 GDP/亿元
	社会效益产出	技术进步	专利申请授权量/项
		生活水平	移动电话交换机容量/万户
非期望产出 Undesirable output	环境污染	废气排放	医疗卫生机构数/个
			生活垃圾无害化处理量/t
			二氧化碳排放量/万 t

1.2 修正的引力模型

现有研究对区域间关联关系的确定多采用向量自回归(VAR)模型^[31]和引力模型^[22]。VAR 模型存在对滞后阶数变量的选择过于敏感、无法刻画空间网络演变趋势以及对溢出关系描述的精确性较低等缺点^[32],而引力模型更适合处理总量数据,并且能够考虑经济地理距离因素的综合影响,更适用于对空间关联关系及作用的研究^[33]。因此,借鉴张正峰^[34]的研究,采用修正的引力模型探讨中国碳排放绩效的空间关联关系,公式如下:

$$S_{ij}=k_{ij}\times\frac{\sqrt[3]{CE_iP_iG_i}+\sqrt[3]{CE_jP_jG_j}}{D_{ij}^2},k_{ij}=\frac{CE_i}{CE_i+CE_j},D_{ij}=\frac{dis_{ij}}{pgdp_i-pgdp_j}\tag{1}$$

式中, S_{ij} 表示*i*省份对*j*省份的碳排放绩效空间关联强度, k_{ij} 为*i*和*j*省份的引力系数,反映*i*省份对两省间碳排放绩效关联强度的贡献率, CE 、 P 、 G 、 $pgdp$ 分别为碳排放绩效、年末人口数、国内生产总值和人均国内生产总值, D_{ij} 和 dis_{ij} 分别代表*i*和*j*省份之间的经济地理距离和地理距离。进一步参考魏燕茹^[35]和吉雪强^[1]的做法对矩阵进行二值化处理,以历年引力矩阵的每行引力值均值作为阈值 Q ,当 $S_{ij} \geq Q$ 时,表示*i*省份对*j*省份的碳排放绩效存在空间关联关系,关联度数值记为1;当 $S_{ij} < Q$ 时则表明不存在空间关联关系,关联度数值记为0。

1.3 社会网络分析法

社会网络分析法(SNA)是以“关系”为基本分析单位,通过一系列节点和边构建整个关联网络,分析“关系数据”的网络特征。借鉴赵林^[36]的研究,基于中国碳排放绩效空间关联网络二值矩阵,采用社会网络分析法从整体网络特征、个体网络特征和块模型三个层面对碳排放绩效关联网络结构及聚类特征进行刻画,识别各省份的角色地位与互动发展模式。

1.3.1 整体网络特征

参考王凯^[37]的研究,选取网络密度、网络关联度、网络等级度和网络效率四个指标来表征中国碳排放绩效空间关联网络的整体结构特征。其中,网络密度用来反映各省份在网络中联系的紧密程度,网络密度越大,空间关联程度及各省份间的相互影响能力越强。网络关联度反映网络的稳健性和脆弱性,网络关联度越接近1,说明各省份间存在网络效应且关联关系越稳健。网络等级度反映各省份在网络中的地位差异,当网络等级度升高时,“领导”角色对要素的控制作用更加明显,处于网络边缘地位的省份增多。网络效率表示各省份之间的连接效率,该值越低,网络越稳定,各指标的计算公式参见文献^[1]。

1.3.2 个体网络特征

选取度数中心度、接近中心度和中介中心度对中国碳排放绩效空间关联网络的个体结构网络特征进行探究。度数中心度表示该省份与其他省份之间存在的直接关联关系程度,度数中心度越高,表明直接相连的关联路径越多,距离网络中心位置越近,对其余省份的影响作用也越强;此外,度数中心度可分为点入度和点出度,分别表示该省份的受益水平和外溢影响。接近中心度反映该省份与其他省份快速交流能力与协同的紧密程度,接近中心度越高,说明省份间的最短路径距离越小,越接近中心行动者的地位,能够更快地产生联系并实现相关要素的交流。中介中心度表示该省份对其他省份关联联系建立的重要程度,中介中心度越高,该省份的中介和桥梁作用越显著,各指标的计算公式参见文献^[22]。

1.3.3 块模型分析

块模型是由 White 和 Boorman^[38]提出识别网络位置及角色地位的方法,该方法将各节点聚类划分成不同板块,并根据关联方向分析板块间的相互作用及传递方式,探究网络内部结构状态,揭示各省份在板块内外部转移关系中的地位 and 角色。借鉴方大春^[24]和邵帅^[39]的评价规则,将中国碳排放绩效空间关联网络划分为“净受益”、“净溢出”、“经纪人”和“双向溢出”四种板块类型。其中,“净受益”板块接收来自其他板块的关系明显多于对外的溢出关系,在网络中扮演受益者角色;“净溢出”板块向其他板块的发出关系数多,接收关系及对板块内部的发出关系数较少,具有溢出效应;“经纪人”板块与外部板块之间存在频繁的接收和发出关系,同外部板块的联系更多,在网络中发挥中介作用;“双向溢出”板块与板块内外部均有较多的发出关系,但接收外来关系较少,对板块内外部具有双向溢出效应。

1.4 空间关联网络效应及影响因素分析

1.4.1 空间关联网络效应分析

借鉴刘华军^[40]和邓世成^[41]的研究,从碳排放绩效整体和个体网络结构特征两个层面出发,检验空间关联网络对中国碳排放绩效的空间效应。整体网络效应分别以中国碳排放绩效和省际碳排放绩效的标准差作为被解释变量,对四个整体网络特征指标进行 OLS 回归;个体网络效应以各省的碳排放绩效作为被解释变量,利用个体网络结构特征指标作为解释变量,结合 Hausman 检验结果进行回归分析,公式如下:

$$\begin{cases} \ln CE' = \alpha_f + \beta_f \ln ZT, ZT = X_1, X_2, X_3, X_4 \\ \ln CE'' = \alpha_g + \beta_g \ln ZT, ZT = X_1, X_2, X_3, X_4 \\ \ln CE''' = \alpha_o + \beta_o \ln GT, GT = G_1, G_2, G_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中, CE' 、 CE'' 、 CE''' 分别为中国碳排放绩效、省际碳排放绩效的标准差和各省的碳排放绩效; α_f 、 α_g 、 α_o 为回归方程的常数项; ZT 和 GT 分别表示整体和个体网络特征指标, 其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为网络密度、网络效率、网络等级度、关联关系数, G_1 、 G_2 、 G_3 则分别表示度数中心度、接近中心度和中介中心度。

1.4.2 QAP 模型

对碳排放绩效空间关联网络的影响因素进行探究, 由于各变量均为关系数据, 可能存在多重共线性, 与传统多元线性回归分析的前提假设相悖, 继续沿用传统统计检验方法会影响估计结果, 而二次指派程序 (QAP) 模型作为一种不需要变量独立性与正态分布假定的非参数方法, 可以更稳健地分析多个矩阵与某一矩阵间的回归关系。参考已有研究^[23, 42-43], 将 QAP 模型设定如下:

$$\text{Net} = F(\text{Ad}, \text{Pgdp}, \text{Inds}, \text{Tech}, \text{Pd}, \text{Gov}, \text{En}, \text{Open}, \text{Urb}) \quad (3)$$

式中, 所有变量均通过差异关系矩阵进行度量, 其中 Net 为碳排放绩效空间相关性, 用前文测算得到的碳排放绩效空间关联网络表示; Ad 是各省之间的空间距离关系, 使用相邻关系矩阵测度, 两省相邻赋值为 1, 反之则记为 0; Pgdp 为经济发展水平差异, 用各省人均 GDP 差值来表示; Inds 为产业结构差异, 用第二产业与第三产业增加值的比值差值表示; Tech 为技术创新水平差异, 用国内发明专利申请授权量差值衡量; Pd 为人口密度, 用人口总数与面积的比值差值表示; Gov 表示环境规制差异, 用工业污染治理投资总额差值衡量; En 为能源消费强度差异, 用能源消费总量与 GDP 的比值差值表示; Open 为对外开放水平差异, 用进出口总额与 GDP 的比值差值表示; Urb 表示城镇化水平, 用城镇人口与年末常住人口数量的比值差值衡量。

1.5 数据来源及说明

本文选取中国 30 个省市自治区 2005—2022 年的相关数据作为研究样本。碳排放数据来源于 CEADs 发布的数据; 碳排放绩效测度的社会经济相关指标数据来自国家统计局、《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》以及各省统计年鉴 (2006—2023 年)。同时, 以 2005 年为基期对 GDP 和人均 GDP 进行不变价处理, 并对缺失数据采用线性插值法补全。

2 中国碳排放绩效的空间关联网络

2.1 中国碳排放绩效时空演变特征

为探究中国区域碳排放绩效的变化趋势和空间分布, 采用超效率 SBM 模型对中国 30 个省份 2005—2022 年的碳排放绩效进行测算, 选取 2005、2010、2015 和 2022 年的数据进行可视化处理, 并依据张正峰^[34]的研究利用自然断点法划分为五个等级。如图 1 所示, 2005—2022 年中国碳排放绩效增长态势显著, 区域差异显现。从整体看, 全国碳排放绩效均值由 0.230 提高到 0.611, 其中 2005—2016 年涨幅为 69.11%, 处于增长速度较低的波动增长阶段; 2016—2022 年较 2005 年平均增长了 139.63%, 处于高速增长阶段。这主要缘于“十三五”和“十四五”阶段国家对环境保护和治理问题的持续关注, 对协调和转变经济发展方式做出更严苛的要求, 同时随着高耗能企业的转型升级, 碳排放绩效得到有效提高。

具体来看, 中国碳排放绩效形成了由东部沿海地区向中西部邻近省份递减的空间形态。其中, 东部地区的碳排放绩效由 0.330 上升至 0.835, 上升趋势明显, 且大于全国均值; 中西部地区的碳排放绩效有所提升, 但仍为主要低值区, 与东部地区差距逐年扩大。这是由于东部省份在构建绿色高效工业结构方面取得显著成效, 碳排放绩效稳步提升; 中部地区存在技术滞后, 产业结构升级难度大、周期长的问题, 碳排放绩效低且增长缓慢; 西部省份碳排放绩效低但增长速度最快, 涨幅呈现出西部 > 全国均值 > 东部 > 中部的空间特征。

2.2 网络结构特征

2.2.1 整体网络特征

为揭示各省份碳排放绩效的联系强度及空间演化路径, 选取 2005 和 2022 年的数据绘制空间关联网络

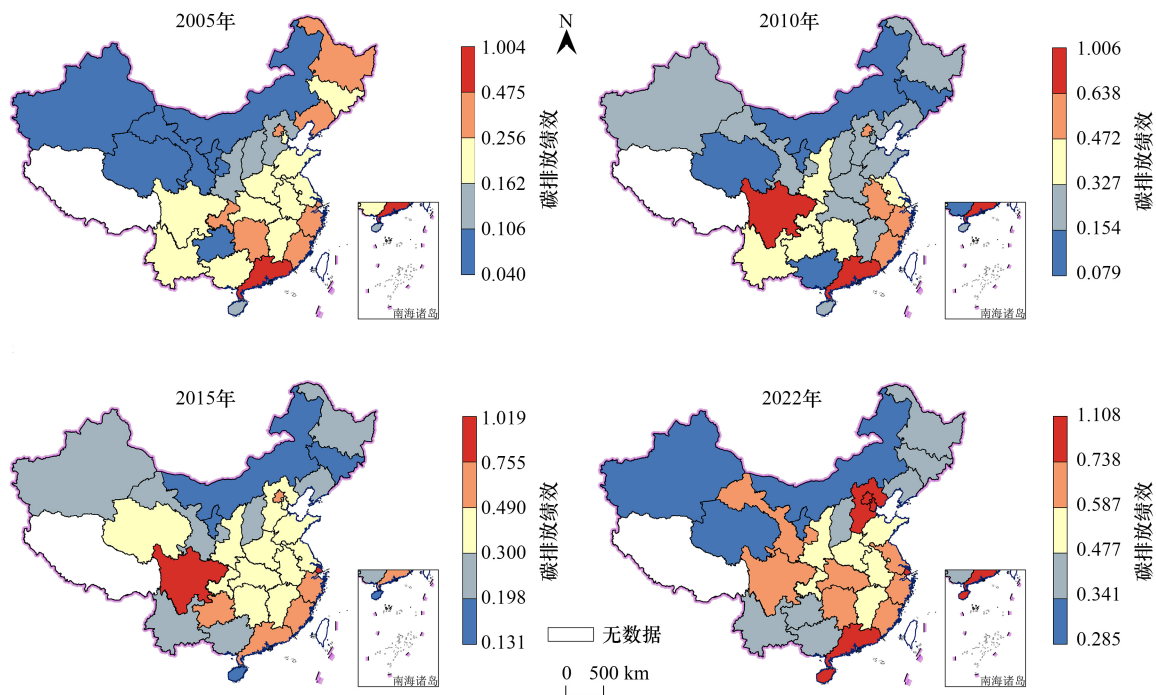


图1 中国碳排放绩效

Fig.1 China's carbon emission performance

图,并以关联系数为依据,将各省份在网络中分为核心、次核心、次边缘和边缘地位。由图2可知,中国碳排放绩效的空间关联网络特征明显,网络趋于稠密化和纵深化,并逐渐形成以“北京-上海”双核为中心的东密西疏、相互交织的网络形态。2005年网络中的关联数为162个,北京、天津、上海、江苏、浙江、广东占据空间关联网络的核心位置,与其他省份的联系紧密,在网络中具有较强的支配和控制能力;山东处于次核心地位,影响和辐射范围有限,在网络中作为连接核心和边缘地区的桥梁;网络次边缘和边缘地位的省份集中分布在中西部地区,与其他省份的关联关系系数明显减少,在网络中处于弱势。2022年网络关联数上升为194个,位于核心地位的省份缩减为北京和上海,天津、江苏、浙江、福建、广东和重庆转变为网络的次核心地位,中西部有较多省份转变为次边缘地位,说明网络的中介作用增强,网络整体复杂、多线程、多流向程度增加,网络的等级分化逐渐体现。

为探究中国碳排放绩效空间关联网络的整体网络特征,采用Ucinet 6.0计算网络密度、网络等级度、网络关联度和网络效率,结果如图3所示。网络密度呈波动上升趋势,由2005年的0.186上升至2022年的0.223,各省份的空间关联更加密切,但网络密度均值为0.205,仍处于较低水平,说明区域间碳排放绩效的相互联系、协同互动程度还有待加强。网络等级度呈现出先上升后下降的变化趋势,由2005年的0.549上升至2009年的0.590,此后下降并一直低于0.500,直到2022年回升至0.513,说明网络中森严的等级结构逐渐被打破,网络结构趋于扁平,但随着东部和中西部省份碳排放绩效差异逐步扩大,近年来核心省份的支配控制作用有所增强。网络关联度始终为1,表明所有省份通过直接或间接的联系融入到整体网络中,这是因为随着基础设施的完善、交通系统的建立与生产要素市场化的推进,各省份之间的交易成本降低,要素流动频繁,碳排放绩效在省际间具有普遍且稳定的空间关联和溢出效应。网络效率由2005年的0.737降至2022年的0.680,说明网络的稳定性有所提高,但由于均值为0.709,仍处于较高水平,说明整体网络中的冗余连线较少,相互关联路径比较单一,网络的稳定性较差,这是因为受社会经济发展和能源结构调整的影响,一些关联路径减少或失效,从而呈现出网络效率整体较高并缓慢下降的趋势。

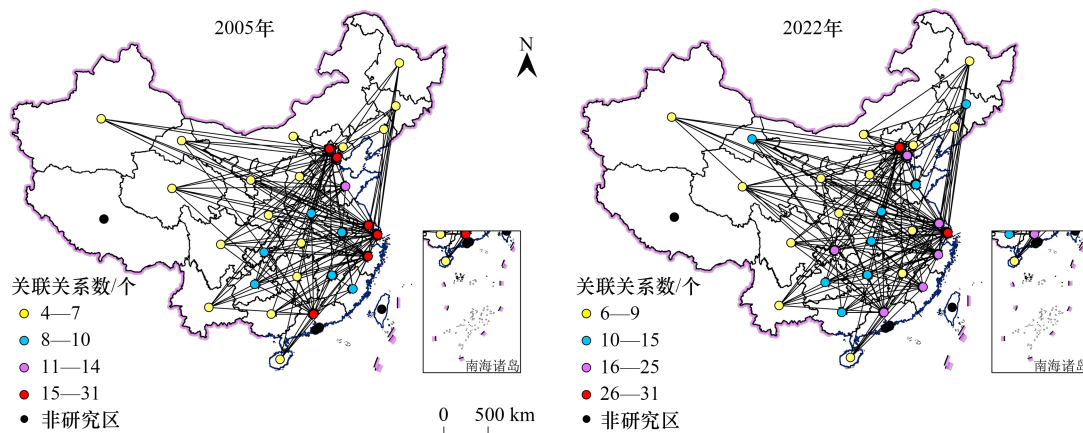


图2 中国碳排放绩效空间关联网络

Fig.2 Spatial correlation network of China's carbon emission performance

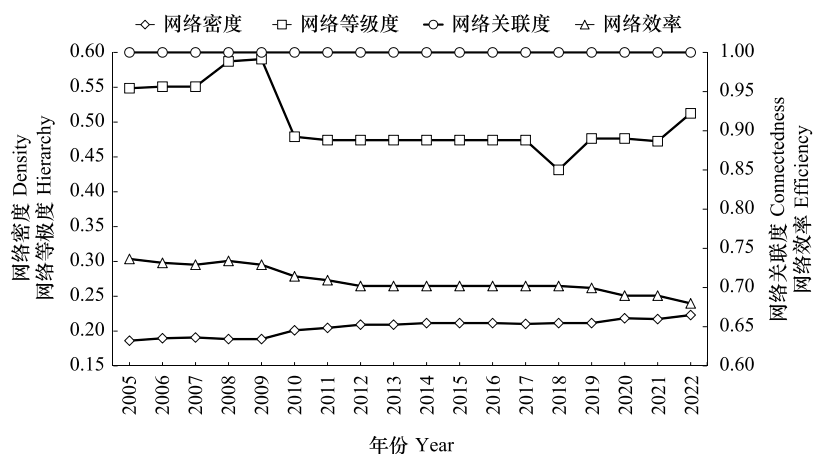


图3 整体网络结构特征

Fig.3 Overall network structure characteristics

2.2.2 个体网络特征

利用点出度、点入度、度数中心度、接近中心度和中介中心度等指标对中国碳排放绩效的个体网络特征进行探究,并选取 2005 和 2022 年的测算数据进行可视化处理(图 4—7)。由图 4 可知,研究期内点出度与点入度的均值由 5.400 上升至 6.467,各省份的点出度均不为 0,说明网络中的溢出主体增加,各省份间溢出效应增强;点入度为 0 的省份减少,大于均值的省份增加,说明网络中的受益主体增加,各省份间的接收关系增强。对比点出度和点入度,2005 年点入度大于点出度的省份为安徽、北京、广东、江苏、山东、上海、天津和浙江,多位于东部沿海地区,在网络中产生较强的极化作用,但由于接收关系系数远远大于溢出关系系数,“虹吸效应”明显强于“涓滴效应”,空间辐射带动能力不足;新疆、青海、四川、云南等中西部省份的点出度大于点入度,是网络中的“溢出高地”。2022 年点入度大于点出度的省份增加了福建和河北,成为主要受益者,河南则转变为点入度等于点出度的平衡水平。综合而言,东部沿海地区对其他省份生产要素的吸引和能源溢出作用较强,中部尤其是西部地区能源依赖程度更高,不仅向核心省份输送资源,也会产生负外部性影响。

如图 5 所示,2005 年度数中心度的全国均值为 31.264,大于均值的省份依次为上海、北京、江苏、浙江、天津、广东、山东,均位于东部沿海地区,与其他省份关联紧密,在网络中具有核心地位;低值区集中分布在新疆、内蒙古、山西、黑龙江等省份。2022 年度数中心度全国均值为 36.552,较 2005 年上涨 16.91%,大于均值的省

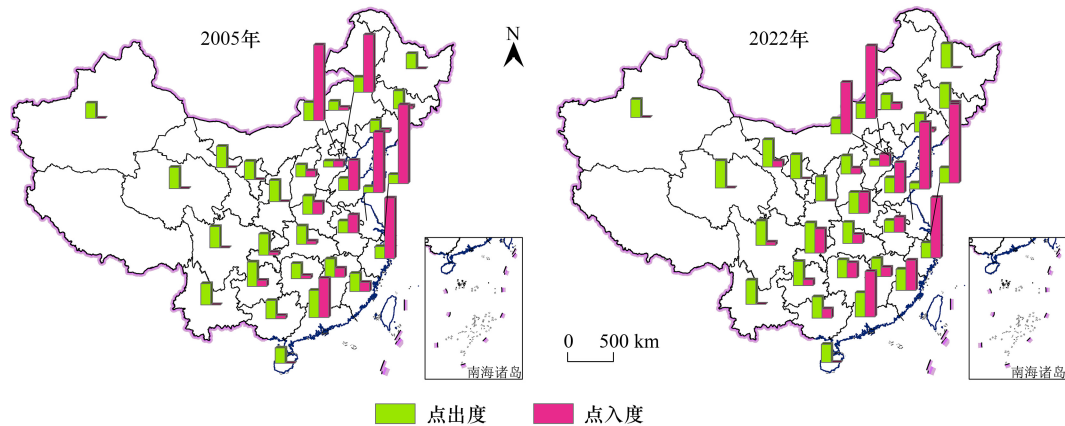


图4 点出度和点入度

Fig.4 Out-degree and in-degree

份增加了福建和重庆,邻近中西部省份增长趋势显著,是全国的重要增长极;低值区增加了安徽、江西和广西,这些省份的要素流动慢,对其他省份的影响能力有限,在网络中处于边缘地位。综上,度数中心度形成了以东部为主导,中西部为从属的空间关联格局。这是由于中西部地区逐步形成兰西、成渝、宁夏沿黄及关中城市群,省域间的交通更加便利,与其他省份直接连接的阻碍减少,关联强度提升,而东部省份由于雄厚的发展基础具有较高的关联基数,随着技术改革和政策调整,虽仍保持网络中的核心地位,但支配能力的增长趋于平缓。

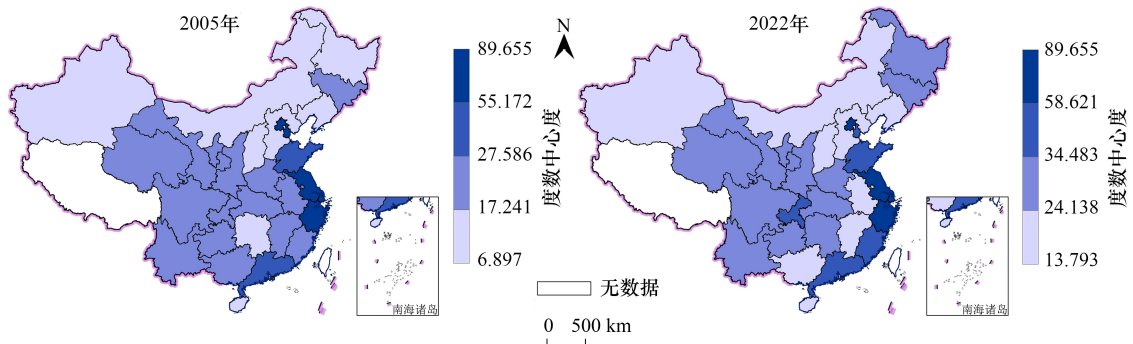


图5 度数中心度

Fig.5 Degree centrality

如图6所示,2005年接近中心度的全国均值为60.176,大于均值的省份为北京、上海、江苏、天津、浙江、广东和山东,说明这些省份能够快速与其他省份产生关联,具有要素可得性高的优势,是网络的中心行动者;同时,内蒙古、山西、河北、辽宁为低值区,被动连接作用较弱,是网络中的边缘行动者。2022年接近中心度的均值为62.051,较2005年上涨3.12%,大于均值的省份新增了福建和重庆,低值区新增了新疆、广西、江西和安徽,全国逐渐呈现出显著的两极分化格局。综上,接近中心度逐步形成了由东部省份作为主要高值区向中西部低值区递减的集中分布格局。产生上述现象是由于低值区省份与其他省份的距离较远,不能快速实现相关要素的交流,并且东部高值区省份发展基础较好,具有产业和人才聚集效应,一定程度上对中西部省份在能源、技术及人才等方面发生挤兑。因此,西部省份可以通过向中部输送经济或非经济的要素资源,提升中西部地区碳排放绩效协同发展水平。

由图7所示,2005年中介中心度的均值为2.488,大于均值的省份有北京、上海、天津、江苏、浙江、广东,

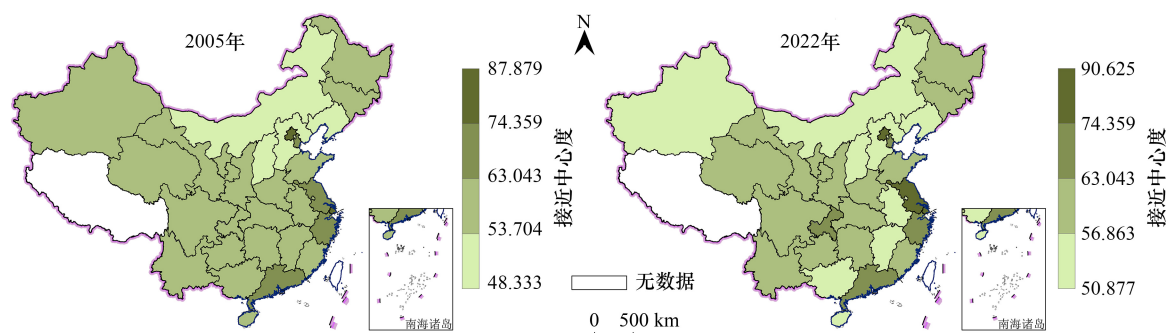


图6 接近中心度

Fig.6 Closeness centrality

这些省份与其余省份具有较强的关联关系,起到重要的纽带和桥梁作用;中介中心度较低的地区聚集在中西部省份,这些省份的中介中心度大多都接近0,对其他省份提高碳排放绩效的中介作用极低,处于被支配的边缘化地位。2022年中介中心度的均值为2.291,较2005年下降7.92%,高于全国均值的省份新增了福建,同时北京、天津、上海的降幅最大,说明东部核心省份的影响作用明显减弱,福建、重庆的增幅最大,说明其中介作用增强,有助于促进中西部省份碳排放绩效提高。综上,网络中各省份间的中介中心度整体水平降低且区域差异显著,这是因为受低碳政策的推行和减污降碳的多重限制,东部核心和次核心省份的引导和调节作用逐渐被各省份间的直接连接替代,区域发展向同质化演进。

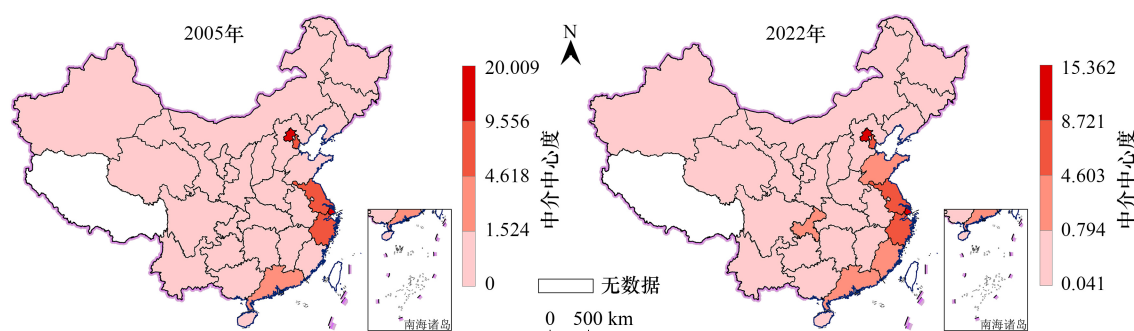


图7 中介中心度

Fig.7 Intermediate centrality

2.3 块模型分析

为进一步刻画网络的空间聚类特征和节点互动关系,以2005和2022年的数据为例,采用Ucinet中的CONCOR方法,设置最大切分深度为2,收敛标准为0.2,将网络划分为4个板块(表2)。可知2005年网络中的关联总数为162个,板块内外分别为19和143个,关联作用多发生在板块间,板块内联系的紧密程度明显弱于各板块间的交互影响,呈现全局关联特征。2022年关联总数增加至194个,板块内外的关联数量调整为16和178个,板块间关系数量的占比上升,板块内各省份间的协同增效能力仍有待提升。

具体而言,2005年,板块Ⅰ接收外部关系有12个,溢出关系有88个,溢出关系远远大于接收关系,并且实际内部关系比例(6.38%)明显低于期望内部关系比例(48.28%),为典型的“净溢出”板块。板块Ⅱ有9个接收外部关系,33个溢出关系,期望内部关系比例(24.14%)大于实际内部关系比例(5.71%),板块内外均有溢出效应,为“双向溢出”板块。板块Ⅲ的接收来自外部的关系数为48个,溢出关系有9个,接收关系大于溢出关系,板块内外部的关联关系数较多,且以板块间的关系为主,在网络中担任了桥梁和中介角色,为“经纪

人”板块。板块Ⅳ的溢出关系为 13 个,接收外部关系 74 个,受到其余板块的溢出影响最为显著,属于“净受益”板块。2022 年,“净溢出”与“净受益”板块的接收和溢出关系均显著提升,伴随的溢出与受益效应也明显增强;“双向溢出”板块的接收与溢出关系不断趋近,但总数减少,在网络中起到的双向溢出影响降低;“经纪人”板块的内部关系下降为 0,中介角色特征减弱。

表 2 中国碳排放绩效空间关联板块的溢出效应

Table 2 Spillover effects of spatially related sectors of China's carbon emission performance

年份 Year	板块 Sector	省份个数 Number of provinces	接收关系数/个 Received connection		溢出关系数/个 Issued connection		期望内部 关系比例/%	实际内部 关系比例/%	板块类型 Sector type
			板块内 Inside	板块外 Outside	板块内 Inside	板块外 Outside	Expected internal relationship ratio	Actual internal relationship ratio	
2005	S I	15	6	12	6	88	48.28	6.38	净溢出
	S II	8	2	9	2	33	24.14	5.71	双向溢出
	S III	3	6	48	6	9	6.90	40.00	经纪人
	S IV	4	5	74	5	13	10.34	27.78	净受益
2022	S I	16	2	29	2	113	51.72	1.74	净溢出
	S II	6	8	13	8	24	17.24	25.00	双向溢出
	S III	3	0	33	0	25	6.90	0.00	经纪人
	S IV	5	6	103	6	16	13.79	27.27	净受益

S I: 板块 I Sector I; S II: 板块 II Sector II; S III: 板块 III Sector III; S IV: 板块 IV Sector IV

为揭示网络中板块活动的活跃路径及演变趋势,考察四个板块之间的相关关系,以表 2 为依据绘制四大板块的互动关系图(图 8),并计算板块内和板块间的密度矩阵,分别与前文所测算的 2005 年(0.186)及 2022 年(0.223)整体网络密度相比较,若板块密度大则赋值为 1,反之记为 0,得到碳排放绩效空间关联板块的像矩阵(表 3)。

表 3 密度矩阵与像矩阵

Table 3 Density matrix and image matrix

年份 Year	板块 Sector	密度矩阵 Density matrix				像矩阵 Image matrix			
		S I	S II	S III	S IV	S I	S II	S III	S IV
2005	S I	0.029	0.000	0.689	0.950	0	0	1	1
	S II	0.000	0.036	0.708	0.500	0	0	1	1
	S III	0.022	0.292	1.000	0.083	0	1	1	0
	S IV	0.183	0.063	0.000	0.417	0	0	0	1
2022	S I	0.008	0.063	0.688	0.925	0	0	1	1
	S II	0.000	0.267	0.000	0.800	0	1	0	1
	S III	0.417	0.000	0.000	0.333	1	0	0	1
	S IV	0.112	0.233	0.000	0.300	0	1	0	1

由图 8 可知,2005 年板块 I 包括安徽、江西、福建等 15 个省份,这些省份在该时期经济发展水平相对滞后但资源充足,是向“净受益”板块提供溢出关系的重要省份,也是网络中的边缘和亏损方;板块 II 由黑龙江、内蒙古、辽宁等 8 个省份构成,这些省份所在的呼包鄂榆经济区与环渤海、中原经济区地理位置远,内部联系较弱;板块 III 包括北京、天津、山东 3 个省份,具有经济发展水平和行政力量优势,对连接碳排放绩效西部低值区和东部高值区具有强有力的支撑作用;板块 IV 的省份有上海、广东、浙江、江苏 4 个省份,这些省份为发展势头强劲的地区,是网络的受益主体。2022 年,板块间均发生省份跃迁行为,具体表现为“净溢出”板块中的福建和重庆转变为“经纪人”板块成员,黑龙江、河南、新疆从“双向溢出”板块进入“净溢出”板块,板块 III 仍是成员数最少的板块,山东进入了“双向溢出”板块,北京、天津与“净受益”板块的广东进行了交换。

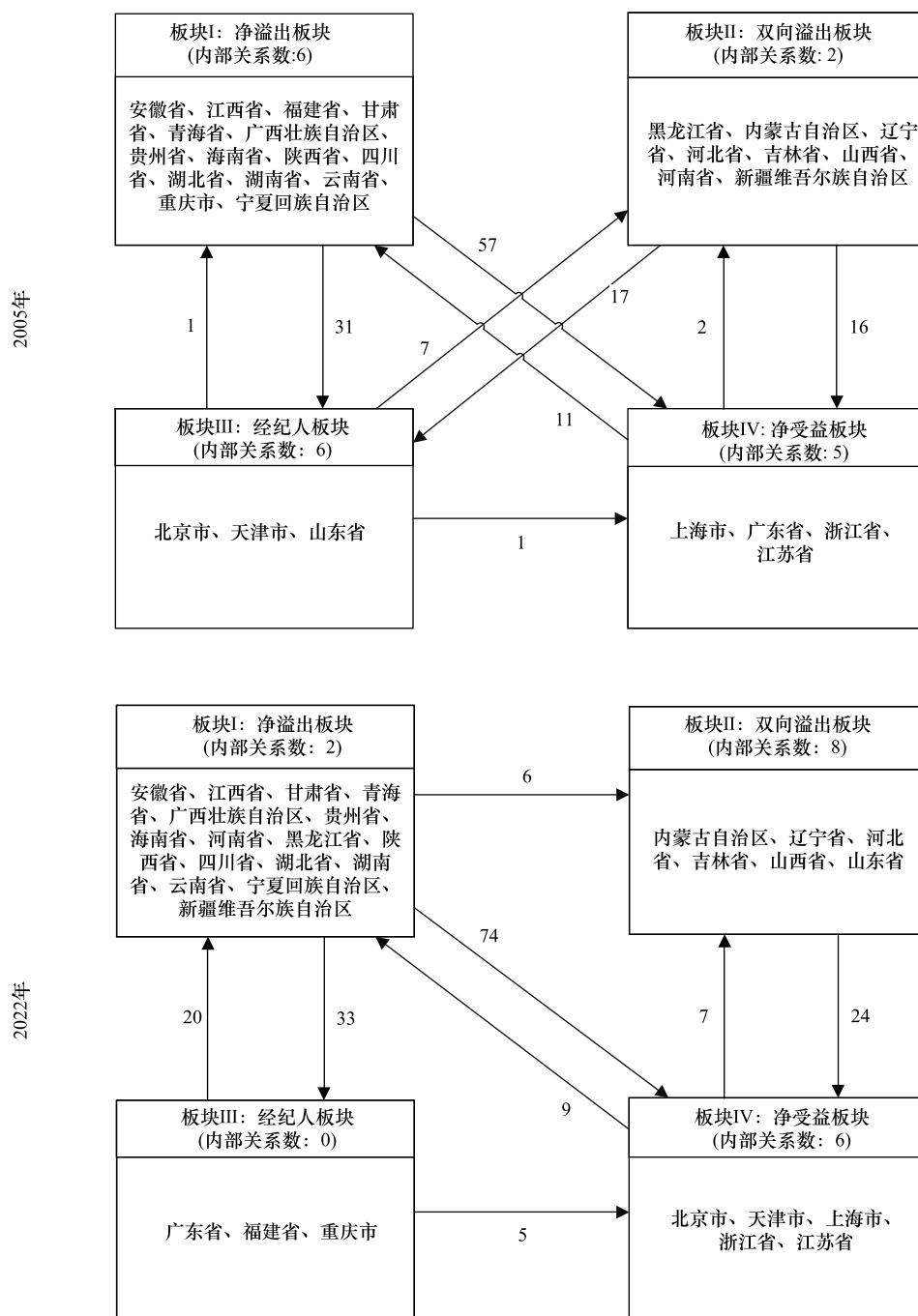


图8 中国碳排放绩效板块之间的关联关系

Fig.8 Correlation between China's carbon emission performance sectors

结合表3对碳排放绩效的基础效应和传递机制进行分析,2005年板块I作为“净溢出”板块是网络的发动机,对板块III和板块IV具有较强的直接溢出效应,2022年对板块IV的溢出效应显著增强,形成“净溢出—净受益”专项传导机制格局,说明板块I和板块IV的联系更加紧密。2005年板块II对板块IV具有溢出效应,对板块III具有溢出和接收双重效应,2022年双重效应转嫁于板块IV,板块II的内部关联作用增强。2005年板块III不仅接收板块I和II的溢出关系,也向板块II发出连接,中介效应显著,但由于板块I和板块II之间的直接联系增加,2022年板块III的中介作用仅体现在“净溢出—经纪人—净受益”传导路径中,中介作用减弱。板块IV对板块II的溢出作用增强,说明板块IV作为主要受益者,逐步发挥其主导作用,带动邻近中部省份提高能源

利用效率,实现低碳发展目标。

3 碳排放绩效空间关联网络效应及影响因素分析

3.1 碳排放绩效空间关联网络效应

3.1.1 整体网络效应

表 4 报告了中国碳排放绩效空间关联网络整体网络效应的回归结果。根据 Model1—4 的结果可知,网络密度、网络效率、网络等级度和关联关系系数均在 1%的水平上显著,网络密度和关联关系系数增加、网络效率和网络等级度下降都会使全国碳排放绩效显著上升,且降低网络效率对全国的减排增效作用最大。Model 5—8 为整体关联网络对省际碳排放绩效差异的影响,差异越小,网络中各省份的碳排放绩效分布越公平。结果显示网络密度和关联关系系数在 10%的水平上对省际碳排放绩效差异具有显著的正向影响,网络效率在 5%的水平上具有显著的负向影响,网络等级度具有负向影响,即网络密度和关联关系系数下降、网络效率和网络等级度上升,能够缩小各省间的碳排放绩效差异,促进区域均衡发展。

表 4 整体网络效应回归结果

Table 4 Overall network effect regression results

变量 Variable	全国碳排放绩效 National carbon performance				省际碳排放绩效的标准差 Standard deviation of provincial carbon emission performance			
	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3	模型 4 Model 4	模型 5 Model 5	模型 6 Model 6	模型 7 Model 7	模型 8 Model 8
网络密度 Density	4.928 *** (0.769)	—	—	—	1.301 * (0.666)	—	—	—
网络效率 Efficiency	—	-12.329 *** (1.462)	—	—	—	-3.456 ** (1.355)	—	—
网络等级度 Hierarchy	—	—	-2.340 *** (0.727)	—	—	—	-0.651 (0.545)	—
关联关系数 Number of relationships	—	—	—	4.929 *** (0.768)	—	—	—	1.300 * (0.666)
常数项 Constant	6.885 *** (1.198)	-5.176 *** (0.522)	-2.559 *** (0.539)	-26.474 *** (4.002)	0.526 (1.044)	-2.727 *** (0.480)	-1.990 *** (0.397)	-8.275 ** (3.466)
R^2	0.813	0.859	0.436	0.813	0.204	0.244	0.122	0.204

R^2 :拟合系数 Coefficient of determination; *, **, *** 分别代表在 10%、5%、1%的统计水平上显著,系数下方括号内数值为其标准误

3.1.2 个体网络效应

表 5 为碳排放绩效个体网络效应的回归及模型 Hausman 检验结果,其中 Model1—3 均支持固定效应。表 5 显示,度数中心度、接近中心度和中介中心度的系数分别为 1.105、4.444 和 0.140,均在 1%的水平上显著为正,说明各省份中心性的上升对提升碳排放绩效具有显著的促进作用。其中,接近中心度的促进效应最强,其次是度数中心度和中介中心度。这是因为提高接近中心度可以增加中西部地区与东部地区的连接效率,增强碳排放绩效低值区在网络中的话语权,从而提升碳排放绩效。

表 5 个体网络效应回归结果

Table 5 Individual network effect regression results

变量 Variable	模型 1 Model 1	模型 2 Model 2	模型 3 Model 3
度数中心度 Degree centrality	1.105 *** (0.141)	—	—
接近中心度 Closeness centrality	—	4.444 *** (0.888)	—
中介中心度 Betweenness centrality	—	—	0.140 *** (0.045)
常数项 Constant	-4.785 *** (0.476)	-19.296 *** (3.644)	-0.979 *** (0.033)
R^2	0.107	0.047	0.019
固定/随机效应 Fixed/Random effect	固定效应	固定效应	固定效应

制差异整体上显著为正,说明严格的环境规制迫使企业摆脱对自然资源的依赖,通过对外交流合作实现协同发展,加强区域间的沟通作用。④能源消费强度差异对网络的作用方向总体为正但影响效果微弱。这是因为部分发达地区能源消费强度较高,环境污染向能源供应地转嫁,发展模式和关联关系不利于能源供应省份提升碳排放绩效,降低了联系强度。

4 结论与建议

本文采用修正的引力模型和社会网络分析法,在测度碳排放绩效的基础上建立空间关联网络,对整体和个体网络结构特征指标进行探讨,解析各省份在网络中的影响地位和传导机制,最后对网络效应进行探究,并剖析空间关联网络的影响因素,研究结论如下:

(1)研究期间内中国整体碳排放绩效显著提升,形成了以“北京—上海”双核为中心的空间关联网络。整体网络密度波动上升,网络关联度和网络效率较高,但在提高网络紧密程度、增强连接稳定性、加大中部地区中介作用等方面仍具有较大的发展潜力。

(2)网络中板块内的关系数量明显低于板块间,“净溢出”板块主要位于中西部发展相对滞后的地区,“净受益”板块和“经纪人”板块均为经济较发达的地区,“双向溢出”板块集中在辽宁、河北、吉林等省份。网络中受益和溢出主体的直接关联关系数增多,中介作用减弱。

(3)碳排放绩效空间关联网络的整体和个体结构特征均显著影响碳排放绩效。提升网络密度、关联关系数、度数中心度、接近中心度和中介中心度,降低网络效率和网络等级度可以有效提高碳排放绩效。

(4)空间距离关系、经济发展水平、技术创新水平、对外开放水平和城镇化水平差异是提高碳排放绩效空间关联网络关联强度的重要影响因素。

根据上述研究结果,提出相应的政策建议:

一是增强各省碳排放绩效空间关联网络关系强度。一方面,由于江西和安徽等中部省份的中介作用减弱,为增强网络关联强度和稳定性,需要促进中部与东西部地区之间的交通基础设施建设,发挥“承东启西”的地理优势,减少运输成本,大力发展旅游、新能源、新材料等高附加值的产业,提升中部地区的中介作用。另一方面,网络内部交流不足说明区域聚集合作成果不显著,应充分发挥政策宏观调控作用,加大西部经济区、城市群的要害流通、保证协同发展战略在各个层面得到实施。

二是充分发挥网络效应对提升碳排放绩效的积极作用。一方面,要紧跟“西气东输”、“北煤南运”等资源调度项目,增加要素跨区域配置的连接通路,增强整体网络密度,同时加快建立健全碳排放交易市场,缩小碳排放绩效的区域差异,降低网络效率和等级度,更好实现均衡减排。另一方面,东部省份应通过成果共享和转移性支付继续发挥其辐射带动作用,其余省份通过增加清洁能源利用占比、能源开发低碳化转型等方式向核心省份靠拢,减少由于地理距离、技术屏障等问题对碳排放绩效增长的拖拽作用。

三是强化影响因素在碳排放绩效空间关联网络中的传导作用。一方面,中西部地区应顺应“一带一路”的号召,提高对外开放、经济发展和技术创新效率,促进中西部地区摆脱技术依赖与传输瓶颈,在提升省域碳排放绩效的基础上也有利于降低更小行政单元之间的碳排放绩效差异。另一方面,东部地区应通过环境规制的要求和限制促进错位分工的绿色协调发展格局,增强碳脱钩强度,降低对中西部省份的排放溢出或转嫁,建立多元网络核心,提升整体碳排放绩效和网络紧密程度。

参考文献(References):

- [1] 吉雪强,张跃松.长江经济带种植业碳排放效率空间关联网络结构及动因.自然资源学报,2023,38(3):675-693.
- [2] 王少剑,王泽宏,方创琳.中国城市碳排放绩效的演变特征及驱动因素.中国科学:地球科学,2022,52(8):1613-1626.
- [3] 王兆峰,王梓琰.长江中游城市群环境规制对旅游产业生态效率的影响及空间分异研究.生态学报,2021,41(10):3917-3928.
- [4] 韩晶,王赞,陈超凡.中国工业碳排放绩效的区域差异及影响因素研究——基于省域数据的空间计量分析.经济社会体制比较,2015(1):113-124.
- [5] Wang Q Y, Zhao C Y. Regional difference and driving factors of industrial carbon emissions performance in China. Alexandria Engineering Journal,

- 2021, 60(1): 301-309.
- [6] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察. 管理世界, 2022, 38(2): 46-69, 4-10.
- [7] 谢波, 李松月. 贸易开放、技术创新对我国西部制造业碳排放绩效影响研究. 科技管理研究, 2018, 38(9): 84-90.
- [8] Chen Y, Wang M Y, Feng C P, Zhou H D, Wang K. Total factor energy efficiency in Chinese manufacturing industry under industry and regional heterogeneities. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 168: 105255.
- [9] 查建平, 范莉莉, 高敏. 中国工业碳排放经济绩效及其影响因素研究. 软科学, 2014, 28(11): 30-34.
- [10] 王惠, 卞艺杰, 王树乔. 出口贸易、工业碳排放效率动态演进与空间溢出. 数量经济技术经济研究, 2016, 33(1): 3-19.
- [11] Perkins R, Neumayer E. Transnational linkages and the spillover of environment-efficiency into developing countries. Global Environmental Change, 2009, 19(3): 375-383.
- [12] 马大来, 武文丽, 董子铭. 中国工业碳排放绩效及其影响因素——基于空间面板数据模型的实证研究. 中国经济问题, 2017(1): 121-135.
- [13] Liu Q F, Song J P, Dai T Q, Shi A, Xu J H, Wang E R. Spatio-temporal dynamic evolution of carbon emission intensity and the effectiveness of carbon emission reduction at county level based on nighttime light data. Journal of Cleaner Production, 2022, 362: 132301.
- [14] 张悦, 王晶晶, 程钰. 中国工业碳排放绩效时空特征及技术创新影响机制. 资源科学, 2022, 44(7): 1435-1448.
- [15] Sun X Y, Lian W W, Gao T M, Chen Z Z, Duan H M. Spatial-temporal characteristics of carbon emission intensity in electricity generation and spatial spillover effects of driving factors across China's provinces. Journal of Cleaner Production, 2023, 405: 136908.
- [16] 王少剑, 高爽, 黄永源, 史晨怡. 基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测. 地理学报, 2020, 75(6): 1316-1330.
- [17] Wang H, Gu K Y, Sun H, Xiao H Y. Reconfirmation of the symbiosis on carbon emissions and air pollution: a spatial spillover perspective. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159906.
- [18] 朱洪革, 曹博, 赵文铖. 中国农业全要素碳排放绩效时序演进及空间收敛特征. 统计与决策, 2022, 38(9): 63-68.
- [19] 高鸣, 宋洪远. 中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异——基于 Malmquist-luenberger 指数与空间计量的实证分析. 经济地理, 2015, 35(4): 142-148, 185.
- [20] 张明斗, 翁爱华. 长江经济带城市水资源利用效率的空间关联网络及形成机制. 地理学报, 2022, 77(9): 2353-2373.
- [21] 张帅, 袁长伟, 赵小曼. 中国交通运输碳排放空间聚类与关联网络结构分析. 经济地理, 2019, 39(1): 122-129.
- [22] 李爱, 王雅楠, 李梦, 王博文, 陈伟. 碳排放的空间关联网络结构特征与影响因素研究: 以中国三大城市群为例. 环境科学与技术, 2021, 44(6): 186-193.
- [23] Chen X L, Di Q B, Jia W H, Hou Z W. Spatial correlation network of pollution and carbon emission reductions coupled with high-quality economic development in three Chinese urban agglomerations. Sustainable Cities and Society, 2023, 94: 104552.
- [24] 方大春, 王琳琳. 我国碳排放空间关联的网络特征及其影响因素研究. 长江流域资源与环境, 2023, 32(3): 571-581.
- [25] 杨青林, 赵荣钦, 胡月明, 肖连刚, 谢志祥, 揣小伟, 谢英凯. 京津冀地区经济社会要素与碳排放的时空耦合关系. 生态学报, 2023, 43(9): 3458-3472.
- [26] 杨玉珍, 闫佳笑, 杨洋, 杨阳. 黄河流域旅游生态效率时空演变及空间溢出效应——基于 73 个城市数据的分析. 生态学报, 2022, 42(20): 8202-8212.
- [27] 于向宇, 陈会英, 李跃. 基于合成控制法的碳交易机制对碳绩效的影响. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(4): 51-61.
- [28] 何艳虎, 龚镇杰, 吴海彬, 蔡宴朋, 杨志峰, 陈晓宏. 粤港澳大湾区城市生态效率时空演变及影响因素. 生态环境学报, 2023, 32(3): 469-480.
- [29] Khan S U, Cui Y, Khan A A, Ali M A S, Khan A, Xia X L, Liu G B, Zhao M J. Tracking sustainable development efficiency with human-environmental system relationship: an application of DPSIR and super efficiency SBM model. Science of the Total Environment, 2021, 783: 146959.
- [30] 徐琼, 程慧, 钟美瑞. 中国旅游业碳排放效率趋同演变及其趋势预测. 生态学报, 2023, 43(9): 3417-3429.
- [31] 孙才志, 李晓玮. 中国沿海地区海洋经济效率与社会资本的交互响应关系. 资源科学, 2022, 44(6): 1238-1251.
- [32] 王小华, 杨玉琪, 罗新雨, 温涛. 中国经济高质量发展的空间关联网络及其作用机制. 地理学报, 2022, 77(8): 1920-1936.
- [33] 孙中瑞, 樊杰, 孙勇, 刘汉初. 中国绿色科技创新效率空间关联网络结构特征及影响因素. 经济地理, 2022, 42(3): 33-43.
- [34] 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.
- [35] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性及其碳平衡分区. 生态学报, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [36] 赵林, 高晓彤, 刘焱序, 韩增林. 中国包容性绿色效率空间关联网络结构演变特征分析. 经济地理, 2021, 41(9): 69-78, 90.
- [37] 王凯, 余芳芳, 胡奕, 甘畅. 中国旅游业碳减排潜力的空间关联网络结构及其影响因素. 地理科学, 2022, 42(6): 1034-1043.
- [38] White H C, Boorman S A, Breiger R L. Social structure from multiple networks. I. blockmodels of roles and positions. American Journal of Sociology, 1976, 81(4): 730-780.
- [39] 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.
- [40] 刘华军, 刘传明, 孙亚男. 中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究. 中国工业经济, 2015(5): 83-95.
- [41] 邓世成, 吴玉鸣. 城市群绿色技术创新的空间网络结构特征及其效应研究——以成渝地区双城经济圈为例. 管理学报, 2022, 19(12): 1756-1765.
- [42] 李敬, 陈澍, 万广华, 付陈梅. 中国区域经济增长的空间关联及其解释——基于网络分析方法. 经济研究, 2014, 49(11): 4-16.
- [43] 郑航, 叶阿忠. 城市群碳排放空间关联网络结构及其影响因素. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2413-2422.