

城市群减污降碳协同增效的空间关联网络特征分析

贯君, 刘旭, 关雨薇*, 张少鹏

(东北林业大学经济管理学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 面临生态环境根本好转和“双碳”目标两大战略任务, 协同推进减污降碳成为新发展阶段全面绿色转型的必然选择. 以京津冀、长三角和珠三角城市群为研究对象, 运用耦合协调模型计算 2000~2019 年减污降碳协同增效指数; 基于改进引力模型和社会网络分析方法, 刻画城市群减污降碳协同增效的空间关联网络形态并揭示其宏观格局和微观模式. 结果表明: ①2000~2019 年三大城市群减污降碳的协同效应整体上显著提高, 珠三角城市群的减污降碳协同增效水平整体上优于长三角和京津冀城市群; ②三大城市群在网络中均存在稳定的关联关系, 但城市群网络的内部结构差异明显; ③长三角和珠三角城市群拥有最为完整的板块分布, 京津冀城市群板块分布为双净溢出、一净受益和一“经纪人”; ④网络具有紧密性、连通性和叠加性的特征, 并存在区域间各自为政的“社群效应”现象. 因此, 未来应依托城市群一体化建设统筹资源优化配置, 通过强化区域协作提高板块间联动效应, 以网络化思维促进城市群减污降碳协同增效.

关键词: 城市群; 减污降碳; 协同效应; 空间关联; 耦合协调模型

中图分类号: X321 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2026)03-1595-14 DOI: 10.13227/j.hjkk.202501219

Analysis of Spatial Correlation Network Characteristics of Synergistic Effects in Pollution Reduction and Carbon Mitigation in Urban Agglomerations

GUAN Jun, LIU Xu, GUAN Yu-wei*, ZHANG Shao-peng

(School of Economics and Management, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Facing the dual strategic tasks of fundamental ecological improvement and the “Dual Carbon” goals, synergistic promotion of pollution reduction and carbon mitigation (PRCM) has become an inevitable choice for comprehensive green transformation in the new development stage. The Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration (BTH), Yangtze River Delta urban agglomeration (YRD), and Pearl River Delta urban agglomeration (PRD) were selected as research targets. The coupling coordination degree model between carbon-emission and air-pollution-control systems was established to quantify the synergic index of PRCM from 2000 to 2019. The improved gravity-model-based approach integrated with social network analysis was employed to characterize the spatial correlation network structures of urban-agglomeration-level synergy effects, through which macro-scale spatial configurations and micro-scale interaction patterns were systematically revealed. The results showed that: ① From 2000 to 2019, the synergistic effects of PRCM significantly strengthened across China’s three major urban agglomerations—the BTH, YRD, and PRD—with the PRD outperforming the YRD and BTH in the synergistic effects of PRCM. ② Stable spatial correlations were identified among the urban agglomerations, though their internal network structures differed markedly. ③ The YRD and PRD demonstrated comprehensive sectoral distributions, while the BTH displayed dual net spillover sectors, one net beneficiary sector, and one brokerage sector. ④ The networks exhibited compactness, connectivity, and overlay effects, alongside a “community effect” reflecting fragmented regional governance. In future construction, resource optimization and allocation should be coordinated based on the integrated development of urban agglomerations. Inter-regional cooperation should be strengthened to enhance the linkage effect among different regions, and the network-oriented approach should be adopted to promote the synergistic effects of PRCM in urban agglomerations.

Key words: urban agglomerations; pollution reduction and carbon mitigation; synergistic effects; spatial correlation; coupling coordination degree model

十八大以来, 中国生态文明建设和生态环境保护取得历史性成就, 生态环境质量持续改善, 碳排放强度显著降低^[1]. 但中国经济发展与环境保护的长期矛盾尚未根本缓解, 仍面临经济复苏、生态环境好转和“双碳”目标实现等多重压力^[2]. 中国政府始终高度重视环境污染与气候问题, 党的二十大为新时代建设美丽中国提出了更高要求和战略部署^[3]. 基于环境污染和温室气体排放具有同根、同源和同过程的特征, 协同推进减污降碳成为促进经济社会发展全面绿色低碳转型的重要抓手^[4]. 国家“十四五”规划提出“深入打好污染防治攻坚战, 建立健全环境治理体系, 协同推进减污降碳”, 并在多个重要场合反复重申、强调, 不断规划设计减污降碳发展路径和战略. 城市群作为区域经济协调发展的重要载体, 是基于

交通高度发达、市场深度扩张和要素高度聚集而演化形成的区域经济形态. 随着我国一系列重大区域和空间发展战略的实施, 以城市群为核心的空间发展格局已基本形成^[5]. 但随着城市化和现代化快速发展, 人口和产业在区域内迅速集聚, 各类资源需求激增, 城市群也成为污染和碳排放高度集聚的敏感区域, 跨区域性雾-霾污染和高强度资源消耗即是显著的事实. 因此, 从城市群角度谋划、部署和落实减污降碳协同增效, 剖析减污降碳协同效应的空间关联特征, 对助力推进大气污染控制和实现“双碳”目标

收稿日期: 2025-01-20; 修订日期: 2025-04-29

基金项目: 国家社会科学基金项目(24BGL205); 教育部人文社会科学青年基金项目(23YJC790036)

作者简介: 贯君(1989-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境科学与资源利用, E-mail: guanjun_89@126.com

* 通信作者, E-mail: guanyw0224@163.com

具有重要意义。

在生态环境协同治理的背景下,推进减污降碳协同增效已成为学界研究热点,国内外学者围绕农业^[6]、工业^[7](水泥、钢铁和电力等行业)和交通^[8]等不同部门,以及国家^[9]、省份^[10]或重点城市^[11]等不同尺度开展研究。研究成果主要体现在:一是减污降碳协同效应的整体评估。评估或测算主要包括两种方式,其一,采用一般均衡模型(computable general equilibrium, CGE)对能源、经济和环境复杂系统进行数量建模,以此来展开减污降碳协同效应的综合评估^[12]。由于此模型内部结构复杂且作用机制存在较强的非线性关联,在协同效应评估中,可能引致模型结果对参数设定的敏感性。其二,通过构建耦合协调模型对温室气体与大气污染物间协同潜力展开评估^[13]。这类方法通过降维处理复杂系统的非线性交互过程,在确保计算可行性的同时,能够有效支持多目标协同、政策协同的评估,但由于考虑的因素有限,无法计算协同收益。二是利用空间统计学分析减污降碳协同的空间相关性和异质性。研究方法主要包括空间计量模型^[13]、空间探索分析^[14]和地理加权回归^[15]等模型。采取不同评估指标和流程,评估结果尚未形成一致结论,但减污降碳协同效应的整体格局大致相近,省域呈“东部高,中西低”的梯度差异,且具有显著的集聚特征^[15];市域呈“南-北递减”的分布格局,其空间聚合以城市群集聚为特征^[16]。此外,也有学者从复杂网络视角探究协同减污降碳的空间关联关系,发现区域间碳排放和大气污染物排放不仅具有显著的空间集聚和溢出特征,也存在非线性传导关系和日趋紧密的空间关联^[17]。与此同时,随着区域协同治理研究的不断深入,有学者开始重点围绕城市群尺度下的减污降碳协同效应展开研究^[18]。在此背景下,社会网络分析法作为解构跨区域关联机制的有效工具,逐渐被应用于该领域。

已有研究成果为减污降碳的研究奠定了良好的基础,但仍存在一定拓展空间:首先,已有研究往往关注单区域的目标协同、政策协同和监管主体协同,较少考虑跨区域合作带来的减污降碳协同效应,同时基于复杂网络视角关注城市群层面的减污降碳也十分有限;其次,目前对于减污降碳协同效应测度的研究仍处于探索阶段,现阶段城市群水平的减污降碳协同效应缺乏测度指标,难以对区域减污降碳系统整体的协同程度进行有效评估;最后,既有研究虽已充分证实碳排放和环境污染均呈现出空间关联特征和网络拓扑结构,但对于如何借助空间网络结构捕捉城市群减污降碳的内在关联特征仍不明晰,难以支撑整个区域的一体谋划、部署和考核。鉴于此,本文以中国三大

城市群为研究对象,运用耦合协调模型对碳减排和大气污染物控制系统的协同效应进行评估,继而从复杂网络视角深入考察减污降碳空间关联的宏观网络结构和微观连通模式,以期对相关研究提供理论支撑和方法指导,进而为中国履行大国责任、实现美丽中国建设和“双碳”目标提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究方法

1.1.1 减污降碳协同效应测度

(1)碳排放 鉴于多区域对比分析中,绝对量不具备直接可比性,本文采用碳排放强度衡量碳减排水平。碳排放强度即单位国内生产总值的碳排放量,它反映了能源消耗和GDP间的关系,是评价能源利用和减缓气候变化的重要指标,体现了相对效率的含义。受统计数据和估算方法所限,城市尺度碳排放核算一直是个关键性问题。目前我国尚未有官方发布的二氧化碳排放权威统计数据,学界多根据能耗系数法测算城市碳排放量^[19]。本文选取中国碳核算数据库(CEADs)的城市级碳排放数据核算碳排放强度,单位为 $10^6 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 。该数据集是目前相对完整、全面和精度较高的碳排放数据,经检验该数据集对二氧化碳排放的拟合精度达 $R^2=0.998$,已成为国内外学者开展碳排放研究的重要数据源。GDP数据来源于各年《中国城市统计年鉴》。

(2)大气污染 着眼于大气污染物排放与碳排放具有较强的空间关联性^[20],本文将“减污”限定于大气污染领域。大气污染物主要包括硫化物(SO_2 、 H_2S 等)、含氮化合物(NO_2 、 NO 等)、含碳化合物(CO 、 VOCs 等)和悬浮颗粒物($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 等)等,根据我国大气污染防治主要目标,并结合数据可得性,文章选取可吸入颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)年均质量浓度衡量大气污染程度,并利用工业 SO_2 排放和 NO_x 排放强度进行稳健性检验。 $\text{PM}_{2.5}$ 即直径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物,是影响大气环境的首要污染物。本文选取 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度作为大气污染的代理变量,其原因在于:① $\text{PM}_{2.5}$ 是“十四五”时期大气污染防治的首要指标;② $\text{PM}_{2.5}$ 构成复杂,包含有机碳、硝酸盐、硫酸盐和铵盐等上百种化学成分,多来自前端污染物化学合成,其中就包括 SO_2 、 NO_x 等化石能源燃烧所释放的有害气体^[21];③ $\text{PM}_{2.5}$ 在大气中停留时间长、传输距离远,使大气污染成为不同于传统环境污染的非局部环境问题,这也导致大气污染具有显著的空间交互特征^[22]。 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据主要包括地面监测数据和卫星遥感数据两大来源。地面监测站点主要集中在城市,站点数量有限且分布存在局限性,不能很好反映地区真实

大气污染水平；而卫星遥感数据时间和空间跨度范围更广，在城市尺度上相比点源数据更能准确反映各地空气污染情况，且全球卫星遥感技术相对客观，能够避免人为因素引起的各种偏误。文章根据加拿大达尔豪斯大学大气成分分析组最新公布的PM_{2.5}质量浓度遥感反演数据，利用 ArcGIS10.6 软件转化、预测和调整，得到2006~2019年覆盖中国全境的PM_{2.5}质量浓度空间栅格数据（栅格精度0.01°×0.01°），结合中国地级行政区划加权平均得到地级城市PM_{2.5}年均质量浓度值。

(3) 减污降碳协同效应 由于大气污染物与二氧化碳排放具有同根同源性，CO₂减排和大气污染控制存在紧密的动态耦合关系，为表征城市减污降碳整体效能，同时反映不同子系统协同发展趋势，文章运用耦合协调模型评价减污降碳协同效应。由于碳排放强度与大气污染程度的量纲不一致，首先需分别进行归一化处理。在此基础上，本文借鉴王淑佳等^[23]的方法对模型进行修正，城市减污降碳协同效应的计算公式如下：

$$C = \frac{2\sqrt{E_{PM_{2.5}} \times E_{CO_2}}}{E_{PM_{2.5}} + E_{CO_2}} = \sqrt{[1 - (E_{CO_2} - E_{PM_{2.5}})] \frac{E_{PM_{2.5}}}{E_{CO_2}}} \quad (1)$$

$$T = \alpha E_{PM_{2.5}} + \beta E_{CO_2} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

式中， $E_{PM_{2.5}}$ 表示城市大气污染控制系统和碳减排系统的水平，采用城市PM_{2.5}年均质量浓度值（单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ）的极差标准化值表示，范围为[0, 1]； E_{CO_2} 表示城市碳减排系统的水平，采用城市碳排放强度（单位为 $\text{t}\cdot\text{万元}^{-1}$ ）的极差标准化值表示，范围为[0, 1]； α 和 β 为二者权重，二者之和为1。同时，本文参考唐湘博等^[13]、刘华军等^[20]和马伟波等^[24]研究，对碳排放和大气污染赋予相同权重反映减污降碳协同水平， $\alpha=\beta=0.5$ 。 C 表示减污系统和降碳系统的耦合度， T 表示综合协调指数； S 表示城市减污降碳系统的耦合协调度，取值范围为[0, 1]。 S 值越接近1，表示减污降碳协调程度越高，协同效应越强； S 值越接近0，表示减污降碳协调程度越低，协同效应越弱。

1.1.2 城市群减污降碳空间关联网络构建——改进引力模型

空间关联关系的确定是社会网络分析的关键。现有研究主要采用Granger因果检验或引力模型刻画空间关联程度。由于Granger因果检验对滞后阶数选择过于敏感，不适用于时间跨度较短数据，而引力模型则能有效将属性数据转换为关系数据，并能综合处理经济、环境和地理等多种因素在空间上的相互作用。但传统引力模型不存在方向性，仅能反映联系

强度大小。因此，本文参考Chen等^[17]、张明斗等^[25]和郑航等^[26]研究对其进行修正，以精确识别减污降碳协同效应的空间传导路径。鉴于城市群空间关联程度并不相等，通过某城市 i 的 S 值占其与关联城市 j 的 S 值之和的比率来修正引力系数 K 。公式如下：

$$F_{ij} = \frac{S_i}{S_i + S_j} \times \frac{\sqrt[3]{P_i \cdot G_i \cdot S_i} \sqrt[3]{P_j \cdot G_j \cdot S_j}}{d_{ij}^2}, \quad (4)$$

$$d_{ij} = \frac{\text{dis}_{ij}}{|g_i - g_j|}$$

式中， F_{ij} 表示城市 i 在减污降碳协同效果提升方面对城市 j 的影响力； P 、 G 和 g 分别表示城市人口、GDP和人均GDP； d_{ij} 和 dis_{ij} 分别表示城市间的“经济距离”和“地理距离”。由式(4)可获得城市群内各城市间减污降碳引力矩阵 F 。同时，将初始引力矩阵 F 转化为二值矩阵 V 。

1.1.3 城市群减污降碳空间关联网络结构特征刻画

(1) 整体网络特征分析 整体网络特征分析网络内部成员之间的关联关系及结构，本文通过网络密度、网络关联度、网络等级度和网络效率这4个指标进行反映。网络密度以网络中实际拥有的关系数与整体网络中最多可能拥有的关系数之比来反映各成员之间关联关系的疏密情况；网络关联度用来衡量关联网络自身的稳健性或脆弱性；网络等级度衡量城市群网络中的等级结构，即是否存在某些城市在减污降碳协同方面比其他城市更具主导性或影响力；网络效率衡量网络在传递信息和资源时的效率。具体计算公式见表1。

(2) 个体网络特征分析 个体网络结构特征通过度数中心度、中介中心度和接近中心度等指标用以反映各节点的地位和作用^[27]。其中，度数中心度用于衡量某个体对其他城市联系力和吸引力，即衡量一个城市在网络中的直接联系数量；接近中心度分为外向接近中心度和内向接近中心度，用于测算网络中个体之间的直接联系，反映该城市在网络中的位置对其与其他城市交流的便捷程度；中介中心度刻画了城市在减污降碳关联网络中发挥的中介传导作用，即该城市在连接其他城市对的最短路径上出现的次数。计算公式参见表1。

(3) 宏观连通模式——块模型分析 块模型主要是将网络中的节点按照“结构对等”原理归类至不同的板块，计算各板块内部及其与板块外部之间的接收（受益）和发出（溢出）的关联关系、各板块内部包含的期望与实际关系比例，并分析和判断各板块在关联网络中的地位、作用和角色，反映各节点的空间聚集特征、各板块的作用机制和传递机制。借鉴相

表 1 减污降碳空间网络指标

Table 1 Spatial network indicators for pollution reduction and carbon mitigation

指标	计算公式	参数说明
整体网络	网络密度 $D = \frac{M}{n(n-1)}$ (5)	M 表示网络中实际拥有的关系数目; n 表示节点城市总数
	网络关联度 $C = \frac{1-V}{n(n-1)}$ (6)	V 表示网络中不可建立联系的节点城市数
	网络等级度 $H = 1 - \frac{T}{\max(T)}$ (7)	T 表示网络中对称可达的节点城市数
	网络效率 $G = 1 - \frac{E}{\max(E)}$ (8)	E 表示网络多余线的总数
个体网络	度数中心度 $RD_i = \sum_{j \in n} X_{ij} / (n-1)$ (9)	若城市 i 与 j 之间存在空间关联, 则记 $X_{ij}=1$, 反之为 0
	接近中心度 $CC_i = (n-1) / \sum_{j=1}^n D_{ij}$ (10)	D_{ij} 表示某城市 i 对其他城市 j 的最短球面距离
	中介中心度 $RB_i = \frac{\sum_{j < k} g_{jk}(i)}{(n-1)(n-2)}$ (11)	g_{jk} 表示城市 j 和 k 间最短路径总数; $g_{jk}(i)$ 表示城市 j 和 k 之间经过城市 i 的最短路径数量

关研究^[28], 依据板块实际内部关系比例和板块接收关系比例划分将板块划分为: 双向溢出板块、净溢出板块、净受益板块和经纪人板块。

(4) 微观连通模式——模体分析 块模型分析主要从宏观层面反映网络的结构功能, 而模体结构分析则侧重从微观层面实现对复杂网络组织特征与结构模式的解读^[29]. 模体 (Motif) 作为复杂网络的子结构, 它们在网络中出现频率明显高于具有相同节点和链接数量的随机网络, 具有弥合微观和宏观结构信息之间差距的实质性能力, 实用意义更强, 能够

从宏观网络到微观模体成分进行逐层分解, 实现自下而上分析复杂网络的组合机制. 因此, 本文通过 MFinder 软件, 从模体特性和组成节点两个层面考察城市群减污降碳网络在微观层面的演化特征.

1.2 研究区域概况与数据说明

1.2.1 研究区域概况

本文选取经济活力强劲、开放程度高的京津冀、长三角和珠三角城市群作为研究区域, 系统考察其减污降碳的协同效应及网络特征 (见图 1). 京津冀城市群作为中国的“首都经济圈”, 2020 年京津冀地区

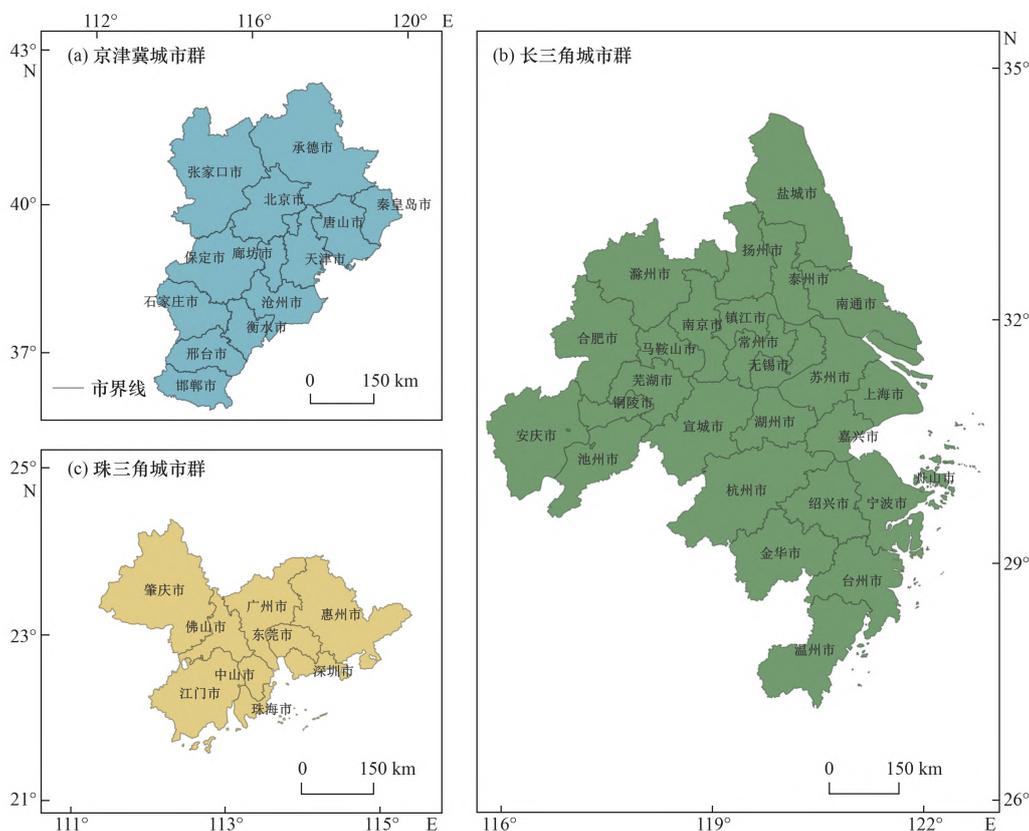


图 1 中国三大城市群研究区位

Fig. 1 Research location of China's three major urban agglomerations

GDP为86 393.17亿元,占全国GDP的8.56%^[30],其经济发展与环境保护的发展取向,对推动地区可持续发展具有重要引领和示范作用;长三角城市群位于“一带一路”与长江经济带重要交汇地带,主要包括上海、苏州和杭州等27个城市,是目前全国低碳试点城市最多的地区,同时也是推动长江经济带生态绿色一体化和加快生态文明建设的核心区域;珠三角城市群为粤港澳大湾区对内辐射的主体区域,是我国城镇化水平较高的地区之一,2022年常住人口13 444.22万人,机动车保有量3 495.1万辆^[31],人口密度高,工业与交通发达,势必导致高强度的地区污染和碳排放。三大城市群地理位置分居北部、中部和南部,是探索区域协调发展路径的重要试验田和中国现代化建设的先行区,能较为全面地表征中国城市群减污降碳的协同特征与转型挑战。

1.2.2 数据说明

基于数据的可得性和连贯性,本文选取2000~2019年中国三大城市群的相关数据作为研究样本,相关原始数据来源于各年《中国城市统计年鉴》、中国碳核算数据库(CEADs)以及加拿大达尔豪斯大学

大气成分分析组提供的卫星遥感数据。为保证数据可比性,本文对所有涉及价格的数据均以2000年为基期进行平减处理。

2 结果与讨论

2.1 城市群减污降碳协同指数测度结果

2000~2019年中国三大城市群污染物浓度和碳排放量均值随时间变化情况如图2所示。从中可知,整个研究期内,京津冀、长三角和珠三角城市群碳排放量均有不同程度的增长,其增幅分别为256%、339%和245%。京津冀城市群在研究期间碳排放量居高不下,与其他两个城市群的碳排放量差距呈现出持续扩大的态势;珠三角城市群碳排放年均增速整体保持在12%左右,呈平稳增长态势。相比之下,三大城市群污染物浓度均呈现倒“W”型的变化趋势,自2014年开始明显下降,其降幅分别为87%、87%和85%,污染物减排效果明显。说明“十二五”以来,我国大气污染防治工作取得显著成效,而碳减排工作总体上没有达到同步效果,这与唐湘博等^[13]的研究结果类似。

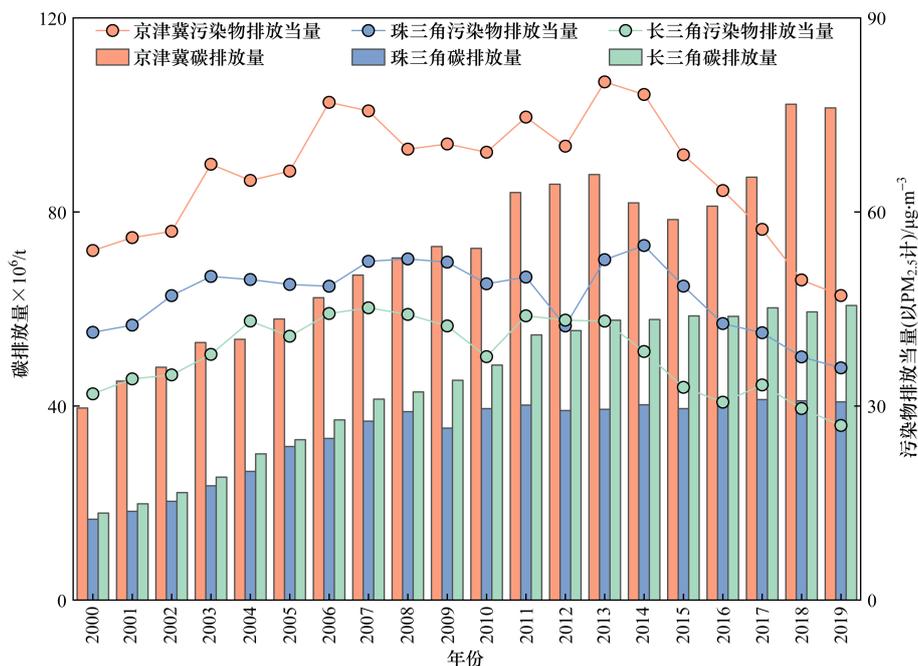


图2 2000~2019年中国三大城市群污染物浓度和碳排放量的时间变化特征

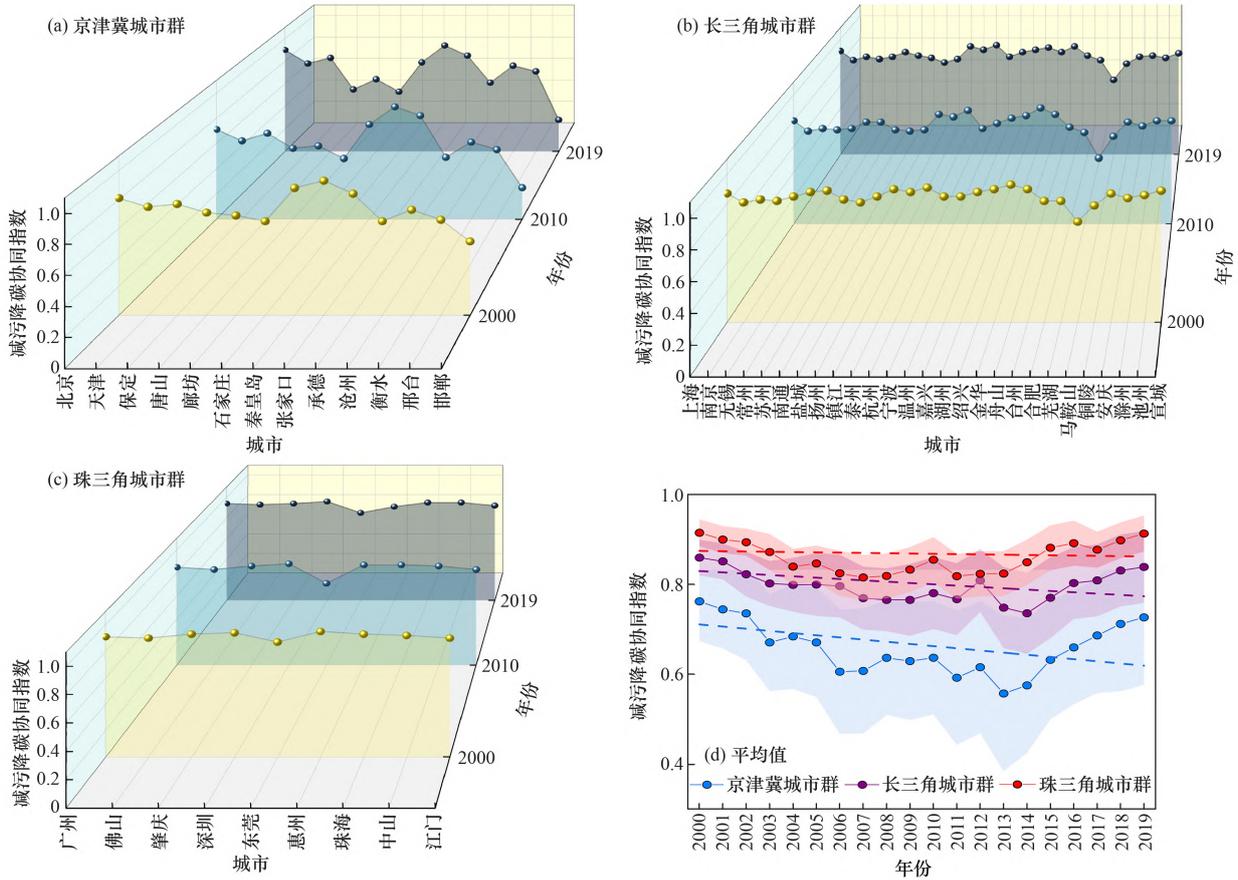
Fig. 2 Temporal variation characteristics of pollutant concentrations and carbon emissions in China's three major urban agglomerations from 2000 to 2019

图3显示了2000~2019年三大城市群减污降碳协同指数的变化情况。从中可知,2000~2019年三大城市群减污降碳协同指数均呈先下降、后上升趋势,说明城市群减污降碳协同增效发展状况整体向好的方向发展,城市经济发展与生态环境保护工作成效正在加速显现。本研究期内,三大城市群的减污降碳协同指数增长速度存在一定差异,珠三角城市群减污降碳

协同指数增长最为迅速,长三角城市群次之,京津冀城市群相对缓慢。可能的原因是珠三角各城市对外开放水平相对较高,人才集聚,不断发展高新技术产业和第三产业,逐步摆脱高能耗和高排放的发展模式^[32],减污降碳协同指数具有较高水平且波动平稳,其中珠海、中山和惠州等地减污降碳协同效应相对较强;长三角城市群能够在发展同时积极响应和落实减

污降碳的相关政策,实现了经济发展与环境改善的良性互动.其中杭州、温州和台州等城市的协同效果最为显著;而京津冀城市群重化工业相对密集,且冬季集中供暖的主要热源是煤炭^[33],能源需求量大,导致京津冀城市群的减污降碳协同发展面临较大压力.总

体来看,三大城市群之间的减污降碳协同指数的差距明显缩小.这主要得益于“十二五”期间,我国密集颁布实施了一系列大气污染防治的政策,在一定程度上促进了我国温室气体减排与大气污染物控制协同效应的增长,该发现与既有研究具有一致性^[34].



(d)中阴影部分表示减污降碳协同指数的波动范围,虚线为线性拟合趋势线

图3 2000~2019年三大城市群减污降碳协同指数

Fig. 3 Synergic index and mean values of pollution reduction and carbon mitigation for the three major urban agglomerations from 2000 to 2019

2.2 整体网络特征分析

基于修正引力模型测算结果,本文以2000年和2019年为例,绘制减污降碳协同效应的空间关联网络图.由图4可知,三大城市群均呈现出明显复杂网络结构特征,关联强度整体提升,网络的转移惰性与路径依赖有所弱化.具体而言,2000年,京津冀城市群中北京和天津空间关联性最强,对邻近城市空间联系产生较大影响,而石家庄和唐山等城市因经济发展和能源转型相对滞后,位于网络边缘地区;长三角城市群的南京、杭州、苏州和上海等城市依托优越的区位条件、科教以及先进制造业优势,拥有较强的影响力^[35];珠三角城市群则以广州和江门为核心,佛山和东莞位于次核心位置.2019年,京津冀城市群仍以北京和天津两个核心城市为主导,空间联系有所加强,但整体提升相对较小.长三角和珠三角城市群的网络关联性明显增强,核心城市的协同辐射作用

更为显著.其中珠三角城市群逐渐形成了以“广-佛-莞”为轴心的新型空间关联格局,佛山取代江门成为网络的关键节点.综合来看,随着减污降碳协同增效机制日益完善、跨区域合作深化以及污染物和CO₂协同减排工作的持续推进^[36],三大城市群关联强度呈上升趋势,城市群减污降碳协同网络趋于复杂化和稳定化.

为进一步把握城市群减污降碳整体网络特征^[37],分别对网络密度、网络效率和网络等级度这三个指标值的变化进行考察(图5):①网络密度.长三角和珠三角城市群两大城市群均呈波动上升趋势,其中珠三角城市群从2000年的0.278上升至2019年的0.319,增幅最为显著,主要由于珠三角城市群在研究期内重点发展金融、科技和现代商贸物流等服务业和战略性新兴产业,使得网络结构越来越紧密.②网络等级.京津冀城市群的网络等级度处于较低

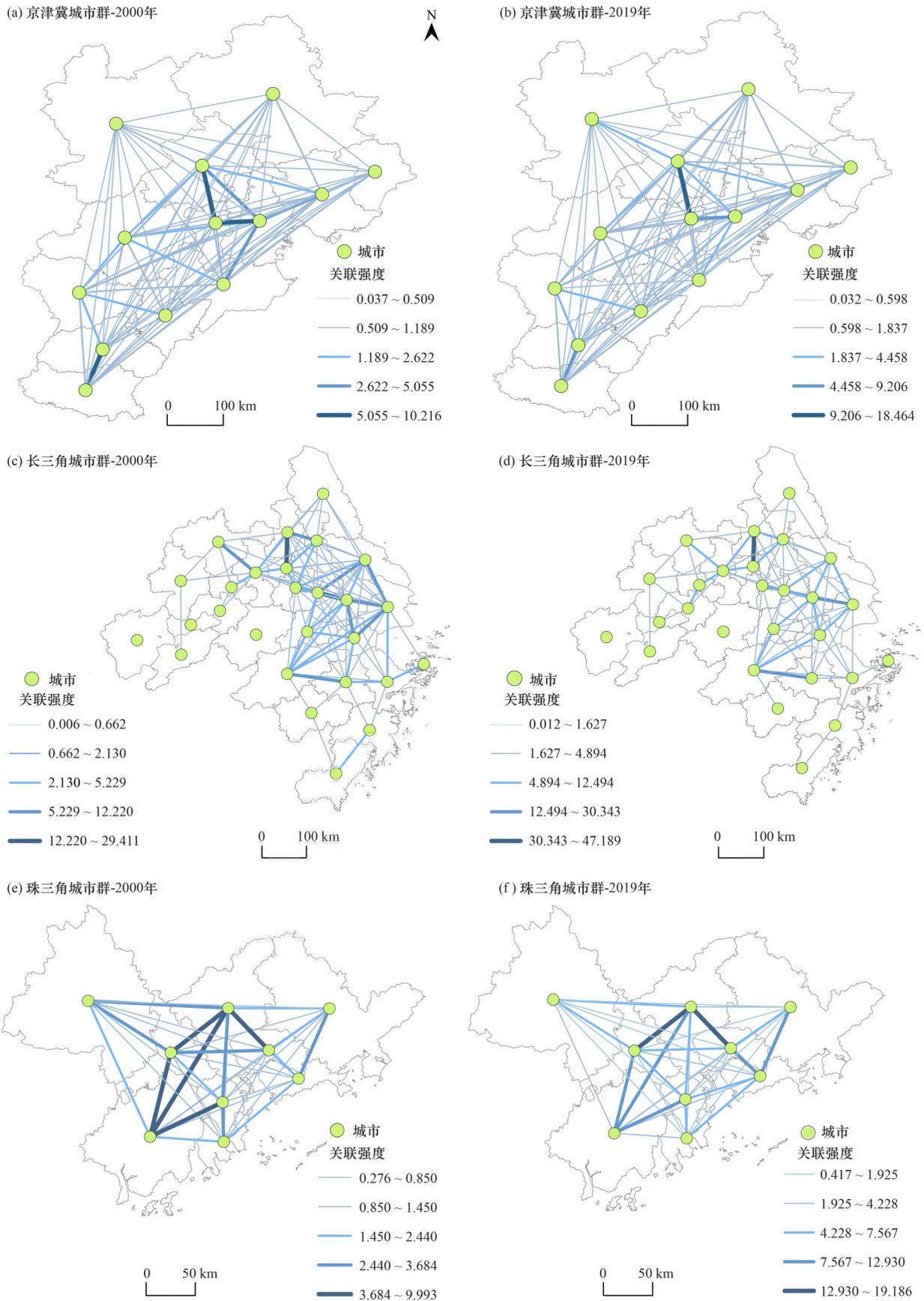


图4 2000和2019年三大城市群减污降碳协同增效空间关联网络

Fig. 4 Spatial correlation network of pollution reduction and carbon mitigation in the three major urban agglomerations in 2000 and 2019

水平,且自2006年以来一直稳定在0.267,表明网络结构是趋于扁平化,未呈现秩序鲜明的等级结构,究

其原因,历经10a的京津冀协同发展战略助推了城际间的交流与合作^[38],加快了各城市对绿色先进技术

的研发与吸收,信息交互联系未受到行政壁垒的影响.③网络效率.本研究时期内,长三角和珠三角城市群的网络效率均呈现一定程度下降趋势,意味着这两个城市群的空间关联网络连线增多,整体稳定

性得到提升.值得注意的是,珠三角城市群表现出更为明显的下降特征,在空间网络中可能存在更多的冗余关系数和叠加的溢出渠道,表明其减污降碳空间网络仍存在较大的发展空间.

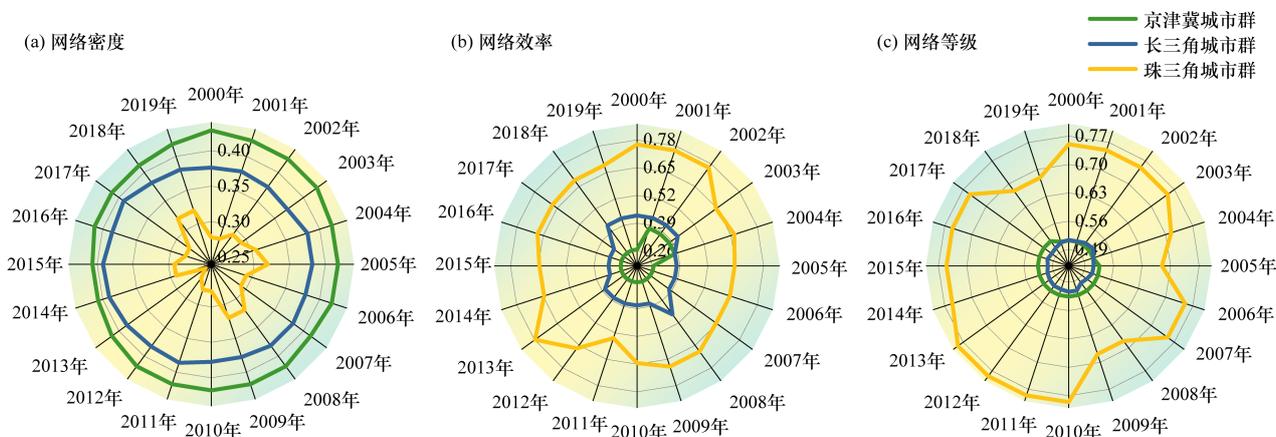


图5 三大城市群网络密度、网络效率和网络等级的时序演化

Fig. 5 Spatial correlation patterns of pollution reduction and carbon mitigation within and among the Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta, and Pearl River Delta urban agglomerations

2.3 个体网络特征分析

为了考察各城市在城市群减污降碳空间关联网络中的地位及其演变趋势,本文通过测度点度中心度、接近中心度和中介中心度对各城市群的网络中心性进行分析.

京津冀城市群.由图6可知,京津冀城市群各城市中心性指数趋势向好,减污降碳协同网络整体呈现多中心结构.一方面,邯郸、北京、石家庄、唐山和张家口这5个城市度数中心度达到7以上,在空间网络中处于核心地位.究其原因,以上城市主要为京津冀地区的中心城市或副中心城市^[39],通过加大工业污染源防治力度、注重节能减排和资源综合利用及推动低碳技术等举措,有效吸收其他城市绿色资源要素,巩固其在空间关联网络中的核心地位.另一方面,从接近中心度来看,大部分城市的内接近中心度(除沧州、衡水和廊坊市)均大于50,主要得益于京津冀协同发展战略的实施^[40],互联互通的综合交通网络加速了城市间的要素流动,京津冀1 h交通圈助推城际间的沟通与交流,与上文整体网络研究结果形成了有力印证.而沧州、衡水和廊坊等地受地理位置、产业基础以及交通网络等因素限制^[41,42],未能掌握技术、资金或政策话语权处于明显的弱势地位.

长三角城市群.由图7可知,长三角城市群减污降碳协同网络分布呈现出沪甬双核结构.一方面,从度数中心度来看,上海和温州都远超同期其他城市,达到21以上.表明上海和温州在关联网络中与其他城市联系紧密,处于核心位置.这可能是由于两地采取了更为严格的环境治理力度,凭借产业高度关联

性迅速整合绿色技术、信息和数据等要素,辐射带动其他城市^[17].另一方面,从中介中心度来看,温州、台州、宁波、合肥和上海这5个城市跻身前列,以上城市主要位于“沪宁合产业带”和“温台沿海产业带”的交汇区域^[43],并且通过大力推进节能减排协同增效,将绿色发展理念逐渐融入城市建设规划中,现已成为长三角城市群联结绿色技术、资本和劳动力等生产要素的主要中转站.此外,长三角城市群内接近中心度与度数中心度空间分布具有一致性,均呈现东高西低的分布格局.说明了上海、台州和温州等东部城市在网络中作为中心行动者,依托港口优势、技术溢出效应和网络规模效应,推动了其他城市减污降碳协同增效进程.

珠三角城市群.由图8可知,珠三角减污降碳协同网络呈现典型的一主多次的主导型结构.一方面深圳是珠三角减污降碳协同网络的绝对核心,其度数中心度远高于其他城市,表明深圳作为区位和政策优势双重叠加的核心城市^[44],拥有较强的技术革新和资源利用能力.尤其大湾区战略的实施,拓宽了深圳绿色技术和新能源产业等多领域交流与合作的渠道,极大地促进了深圳的资源和信息流动效率,经济结构绿色转型加快,在区域环境治理协同发展中发挥着引领作用;另一方面,从接近中心度较高的城市来看,目前已经形成以深圳为大枢纽,以广州、肇庆、江门和东莞等城市为重要节点的减污降碳协同体系.相较而言,中山、惠州和佛山等“边缘地带”在减污降碳协同能力方面相对更弱,亦难接受来自发达地区的辐射与扩散效应,原因在于,以上城市地理

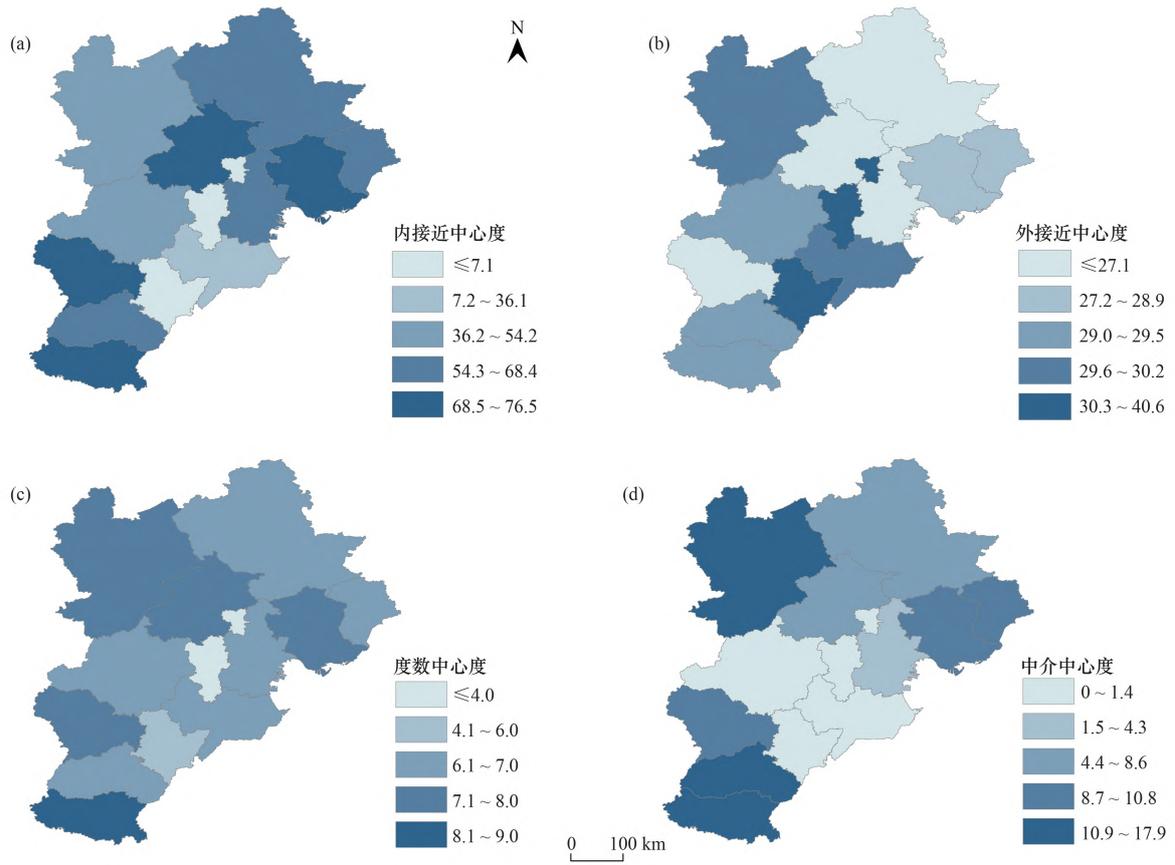


图6 京津冀城市群减污降碳空间网络中心性分析

Fig. 6 Analysis of spatial network centrality for pollution reduction and carbon mitigation in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

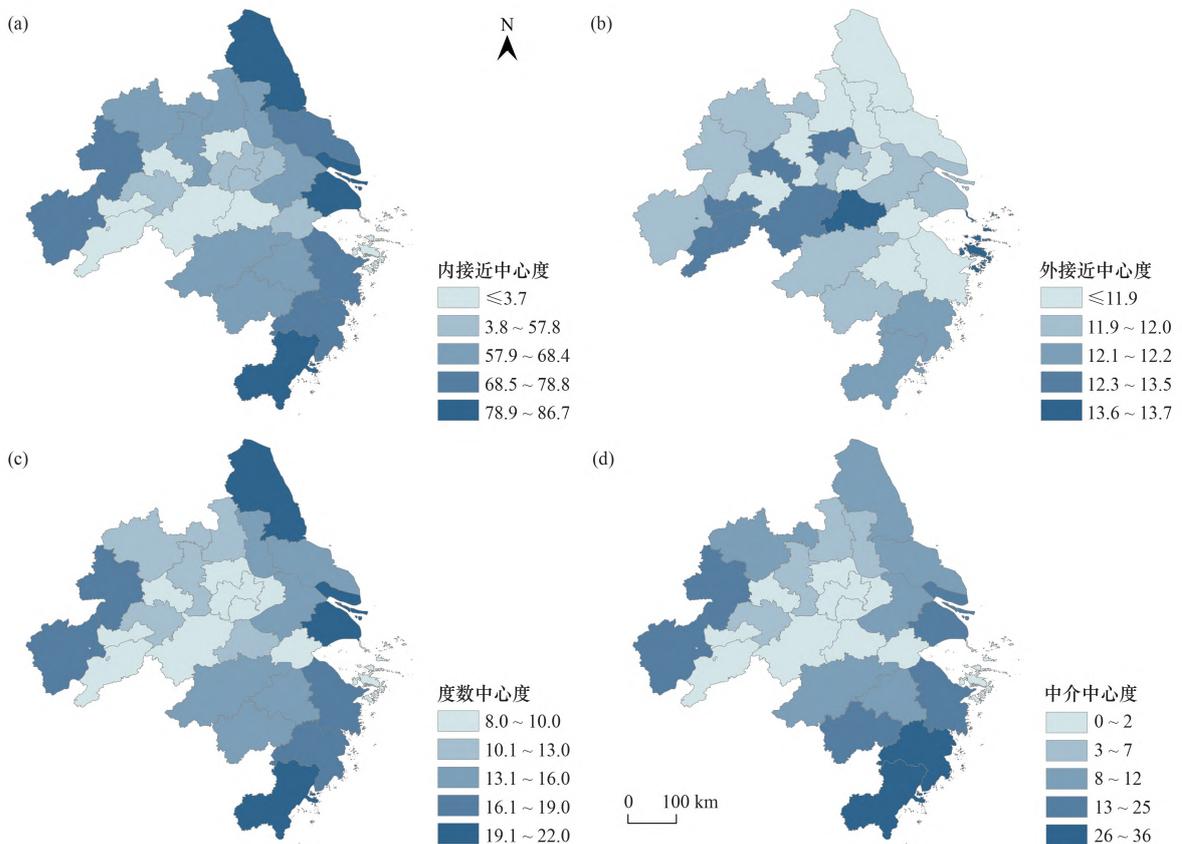


图7 长三角城市群减污降碳空间网络中心性分析

Fig. 7 Analysis of spatial network centrality for pollution reduction and carbon mitigation in the Yangtze River Delta urban agglomeration

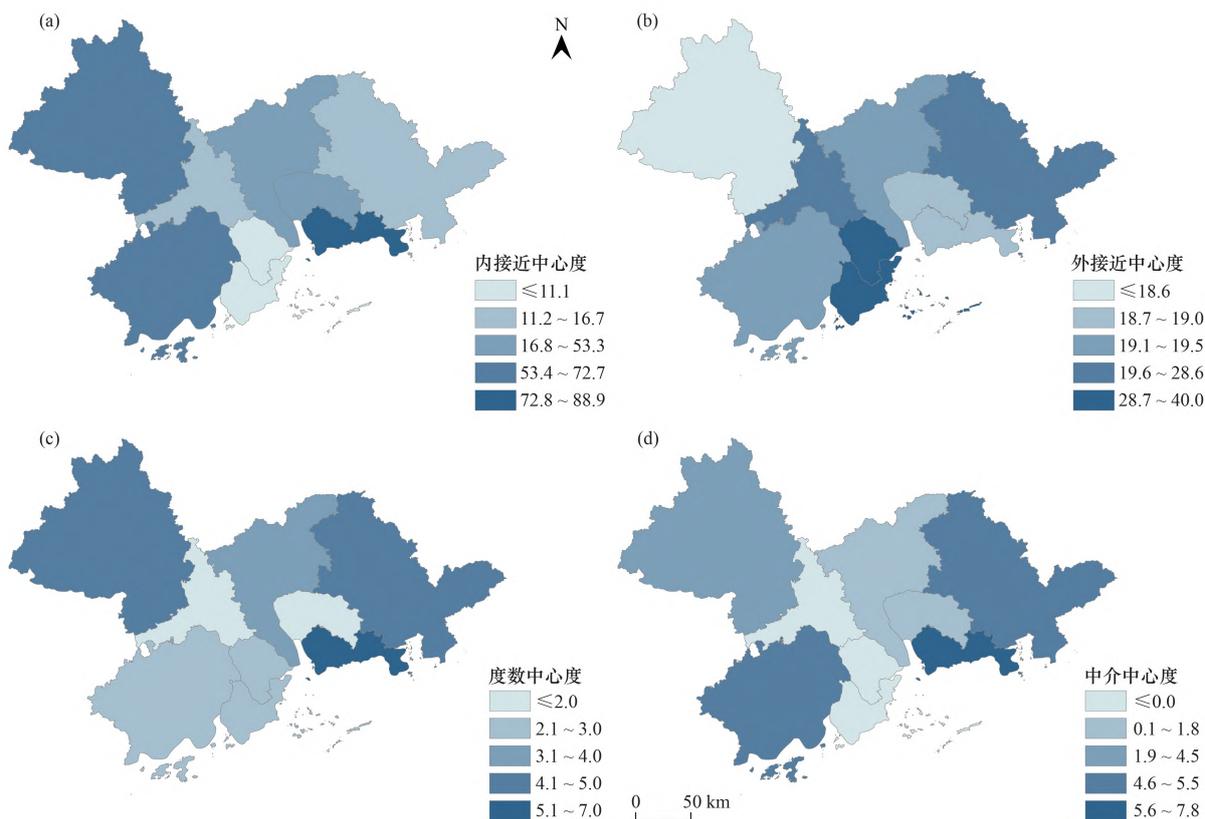


图 8 珠三角城市群减污降碳空间网络中心性分析

Fig. 8 Analysis of spatial network centrality for pollution reduction and carbon mitigation in the Pearl River Delta urban agglomeration

位置偏远限制了其协同能力溢出^[45]. 因此, 如何加强网络核心城市和边缘城市之间的生态环境协调治理要素流动, 是推进珠三角城市群减污降碳协同发展的关键.

2.4 不同板块在减污降碳空间关联网络中的角色及关联模式

为识别城市群减污降碳空间关联网络的“板块”结构, 运用Ucinet软件中的CONCOR方法对三大城市群 2000~2019 年均减污降碳空间关联网络进行板块划分(表 2), 并利用弦图(见图 9)分析板块内部和板

块间的空间关联效应, 其中某一区域所对应的扇形越宽、纽带越长, 表明该区域在网络中的地位越重要.

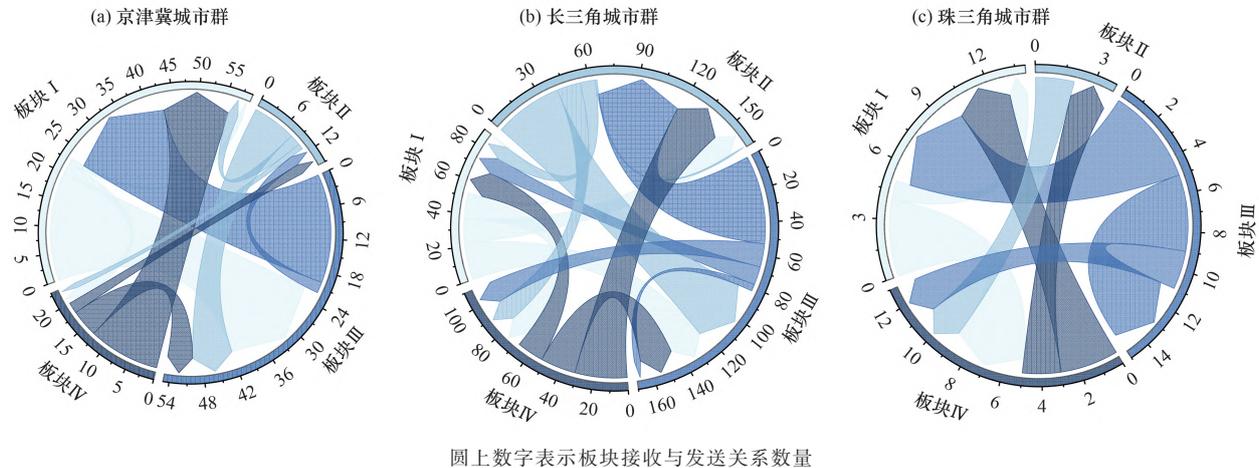
由图 9 可知, 本研究期内, 城市群板块类型及其成员构成有以下特点: ①北京、杭州和江门等城市所在板块接收端纽带弧长远大于发出端纽带弧长, 且该板块的发出端纽带弧长较短, 主要接收来自其他板块地区的溢出效应, 在空间关联网络中获益. ②上海、苏州、广州和深圳等城市对外溢出与接收溢出数都较大, 内部成员间的联系频繁, 以上地区能够凭借自身优势与其他板块建立联系, 推动其他地区的发

表 2 三大城市群减污降碳空间关联网络的板块关联关系

城市群	板块	板块成员	成员数量	板块特征
京津冀城市群	I	北京、天津、承德、唐山和秦皇岛	5	净受益板块
	II	张家口和廊坊	2	净溢出板块
	III	邢台、石家庄和邯郸	3	经纪人板块
	IV	保定、衡水和沧州	3	净溢出板块
长三角城市群	I	上海、湖州、舟山、苏州和嘉兴	5	净溢出板块
	II	金华、绍兴、温州、台州、杭州和宁波	6	净受益板块
	III	泰州、盐城、扬州、镇江、无锡、常州、南京、南通和滁州	9	双向溢出板块
	IV	合肥、芜湖、铜陵、安庆、马鞍山、池州和宣城	7	经纪人板块
珠三角城市群	I	广州和深圳	2	双向溢出板块
	II	东莞	1	经纪人板块
	III	珠海、中山、佛山和惠州	4	净溢出板块
	IV	肇庆和江门	2	净受益板块

展. ③保定、合肥和中山等城市属于城市群承接产业转移的前沿地带,其相对宽松的减污降排目标客观上增加了对高能耗和高排放产业的吸引力,催生了以上区域的“污-碳避难所”效应,这与邵帅等^[28]的研究结论相符.以上地区通过输出污-碳密集型产

品^[46],实质上形成了对周边地区的环境压力转嫁,表现出显著的污-碳溢出效应.总体来说,研究期间各板块内部成员分布相对较为稳定,存在“俱乐部”式的抱团现象,表现为处于相同板块的城市间具有较多的减污降碳关联效应,具有地理近邻性特征.



圆上数字表示板块接收与发送关系数量

图9 京津冀城市群、长三角城市群和珠三角城市群板块内部与板块间的减污降碳空间关联模式

Fig. 5 Spatial correlation patterns of pollution reduction and carbon mitigation within and among the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, Yangtze River Delta urban agglomeration, and Pearl River Delta urban agglomeration

2.5 减污降碳空间关联网络的微观连通模式

本节将采用MFinder软件对2000年、2009年和2019年中国三大城市群减污降碳空间关联网络中的微观连通模式进行考察,并沿用MFinder的模体编号,选取频率排名前5位的模体,结果见表3.具体来看,京津冀城市群的模体78、74和6在空间关联网络显著存在且出现频率最高最多,是减污降碳协同空间关联网络形成的关键因素.这一发现与前文提到京津冀城市群存在显著非平衡特征提供了印证,再次说明京津冀城市群协同能力强的城市偏好以强控制效应影响空间关联网络,部分城市仅是空间网络中的被控制者.而这种网络结构可能会阻碍区域间的协同治理与信息共享的进程^[47],从而掣肘资源配置效率的提升.长三角城市群的模体74、78和36出现频率最多,但模体36在统计上并不显著.产生上述结果可能在于长三角城市群以“组团”的方式参与减污降碳的空间关联“活动”濒临失效,空间组织向分布式结构演替.要实现区域环境治理一体化的目标^[48],长三角城市群仍需加大对绿色要素的投入与持续健康政策环境的营造.珠三角城市群出现频次最高的模体依次为36、74和78,其中仅模体78具有显著影响.说明尽管模体36和74出现次数较多,但其对网络结构的影响较小.出现这一现象的原因可能是,模体36和74中各城市节点之间的交互关系较弱或不能形成互联互通的三角传导网络,导致区域间的减污降碳协同增效陷入“囚徒困境”.总体来说,

三大城市群减污降碳空间关联网络均以链式结构为主导,表明市场分割和“以邻为壑”的非合作博弈发展策略降低了城市间开展合作减污降碳的可能性,阻碍了各城市群减污降碳形成共同体的关联模式,从而使得“一体化”式的关联模式(即其3个顶点均存在双向的出发线和接收线)在网络中并未出现.同时也意味着在减污降碳空间关联网络中各城市群存在各自为政的“社群效应”,即只在特定的区域间才具有产生减污降碳协同关系的可能.

3 建议

(1)基于网络化全局视角,探寻长效机制.本研究发现,城市群减污降碳空间关联网络具有非均衡性特征,整体网络等级和各项中心度均呈现“长三角城市群>京津冀城市群>珠三角城市群”的态势.因此,应突破传统的仅局限于邻近城市间的协同减排降污,从空间上统筹把握碳-污的流动和传导机制,实现“强者恒强”与“能者居之”的互补,探寻中国城市群减污降碳协同发展的长效机制.

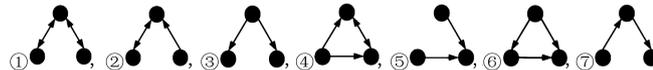
(2)重视城市群减污降碳协同增效的空间联动效应,根据各城市的角色地位和分布特征,实现减污降碳责任的区域合理分解.具体而言,首先应该充分发挥如上海、深圳和保定等净溢出板块和双向溢出板块的领航者作用.其次,还应该适度强化合肥、东莞和石家庄等经纪人板块的减污降碳责任,为其绿色技术创新营造良好的制度环境,激励更多经纪人

表3 三大城市群减污降碳空间关联网络的模体分析¹⁾

Table 3 Motif analysis of the spatial correlation network for pollution reduction and carbon mitigation in the three major urban agglomerations

城市群	2000年			2009年			2019年		
	编号	模体结构 ²⁾	频次	编号	模体结构	频次	编号	模体结构	频次
京津冀城市群	78	①	35.52***	78	①	34.92***	78	①	31.23***
	74	②	27.03***	74	②	28.17***	74	②	28.06***
	6	③	11.97***	6	③	11.90***	6	③	11.86***
	108	④	6.95	36	⑤	6.75	36	⑤	7.91
	36	⑤	6.18	108	④	6.75	108	④	7.51
长三角城市群	74	②	28.16***	74	②	28.26***	74	②	29.06***
	78	①	21.59***	78	①	21.74***	78	①	21.11***
	36	⑤	16.19	36	⑤	15.68	36	⑤	15.45
	108	④	9.78	108	④	9.70	108	④	9.74
	6	③	7.87***	6	③	7.95***	6	③	8.45***
珠三角城市群	36	⑤	32.35	74	②	28.57	74	②	28.57
	74	②	32.35	36	⑤	23.81	36	⑤	23.81
	78	①	11.76***	78	①	11.90***	78	①	11.90***
	108	④	11.76	38	⑥	7.14	12	⑦	7.14
	6	③	5.88	12	⑦	7.14	108	④	7.14

1)***表示在1%的显著性水平下通过t检验; 2)



板块来助力减污降碳协同增效的发挥。此外,应该加强宁波、江门和唐山等净受益板块的生态敏感区的保护工作,合理规划其土地利用方式,强化排放标准的监测与执法,综合源头预防和末端治理等多种措施,以通过大气污染物减少带动碳排放的显著降低。

(3)基于城市群区域差异,制定差异化的减污降碳协同增效策略。具体地,京津冀城市群面对生态协同需求,需要对唐山、邯郸和石家庄等传统工业城市的能源体系进行深度变革,提升能源利用效率、控制能源消费总量和优化能源消费结构,实现减污降碳协同增效;长三角城市群网络空间格局较为稳定,未来应利用其产业高度关联性和核心城市的带动作用,通过“腾笼换鸟”淘汰低端和老旧产业并充分发挥核心城市的“涓滴效应”,积极引导资源要素集聚于优势产业,创造更多减污降碳协同增效关联通道;珠三角城市群应加大对网络边缘地带城市的扶持,同时按照国家粤港澳大湾区战略部署,从更高的国家战略角度提升深圳的辐射能力,以资金流为主,推动技术流、人流和知识流等生态环境协调治理要素流动,加强中心城市与边缘城市的互联互通。

4 结论

(1)本研究期间,中国三大城市群空气污染控制的有效性较碳排放控制更显著,碳减排工作总体上没有达到同步效果;减污降碳协同指数自2003年呈显著上升趋势,珠三角城市群的减污降碳协同增效综合水平整体上优于长三角和京津冀城市群,城市

群内部各城市间减污降碳协同效应差异显著。

(2)城市群减污降碳协同增效空间关系保持稳定,具有地理邻近性、中心城市性和协同性特征。同时,板块内部的关联关系较多,呈现出较为明显的“局部关联”特征,相较于板块内部成员间的减污降碳空间关联效应,板块间的空间关联效应更为明显,是城市群减污降碳协同空间关联网络的主要诱发因素。

(3)模体结构方面,城市群减污降碳协同增效关联网络的微观连通模式集聚特征显著,主要表现为各区域偏好于以“组团”的方式参与减污降碳协同空间关联活动,同时空间关联效应也存在区域间各自为政的“社群效应”现象。

参考文献:

- [1] 袁晓玲, 郗继宏, 钟楚潮, 等. 中国城市“减污降碳”协同驱动因素及实现路径研究[J]. 管理科学, 2023, 36(4): 26-46.
Yuan X L, Xi J H, Zhong C C, et al. Research on the collaborative driving factors and implementation paths of “pollution reduction and carbon reduction” in China[J]. Journal of Management, 2023, 36(4): 26-46.
- [2] 陆敏, 徐好, 陈福兴. “双碳”背景下碳排放交易机制的减污降碳效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11): 121-133.
Lu M, Xu H, Chen F X. Pollution and carbon reduction effects of the carbon emissions trading mechanism in the context of the ‘dual carbon’ goals[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(11): 121-133.
- [3] 刘华军, 郭立祥, 乔列成. 减污降碳协同效应的量化评估研究——基于边际减排成本视角[J]. 统计研究, 2023, 40(4): 19-33.
Liu H J, Guo L X, Qiao L C. Quantitative evaluation of co-benefits of air pollution reduction and carbon emission reduction: based on marginal abatement cost[J]. Statistical Research, 2023, 40(4): 19-33.
- [4] 赵曼仪, 王科. 减污降碳协同效应综合评估的研究综述与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(2): 58-69.
Zhao M Y, Wang K. Comprehensive evaluations of the synergistic effects of carbon emission reduction and air pollution control: a literature review[J]. China Population, Resources and Environment, 2024, 34(2): 58-69.

- [5] 陈小龙, 狄乾斌, 吴洪宇. 中国沿海城市群减污降碳协同增效时空演变及影响因素[J]. 热带地理, 2023, 43(11): 2060-2074.
Chen X L, Di Q B, Wu H Y. Spatial-temporal evolution and influencing factors of synergy in pollution and carbon reduction in China's coastal urban agglomerations[J]. Tropical Geography, 2023, 43(11): 2060-2074.
- [6] 刘爽, 刘畅. 中国农业减污降碳协同效应及其影响机制研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(7): 1109-1121.
Liu S, Liu C. Synergistic effect of agricultural pollution reduction and carbon reduction and its influence mechanism in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(7): 1109-1121.
- [7] 陈晓红, 张嘉敏, 唐湘博. 中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(12): 2387-2398.
Chen X H, Zhang J M, Tang X B. Synergistic effect of industrial air pollution and carbon emission reduction in China and influencing mechanism [J]. Resources Science, 2022, 44(12): 2387-2398.
- [8] Zeng Q H, He L Y. Study on the synergistic effect of air pollution prevention and carbon emission reduction in the context of "dual carbon": evidence from China's transport sector[J]. Energy Policy, 2023, 173, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113370.
- [9] Burtraw D, Krupnick A, Palmer K, et al. Ancillary benefits of reduced air pollution in the US from moderate greenhouse gas mitigation policies in the electricity sector[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2003, 45(3): 650-673.
- [10] 孙世达, 张改革, 孙露娜, 等. 河北省 2013-2020 年大气污染治理进程中的减污降碳协同效益[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5431-5442.
Sun S D, Zhang G G, Sun L N, et al. Synergistic benefits of pollution and carbon reduction from air pollution control in Hebei province from 2013 to 2020 [J]. Environmental Science, 2023, 44(10): 5431-5442.
- [11] 杨滕, 李智成. "双碳"目标下政府减污降碳协同治理结构及生成路径研究——以北京市为例[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2024, 24(3): 73-82.
Yang M, Li Z C. A study on the structure and generation paths of government coordinated governance for pollution reduction and carbon emission reduction under the "dual carbon" target—a case study of Beijing[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2024, 24(3): 73-82.
- [12] Zhang W W, Zhao B, Jiang Y Q, et al. Co-benefits of regionally-differentiated carbon pricing policies across China[J]. Climate Policy, 2024, 24(1): 57-70.
- [13] 唐湘博, 张野, 曹利珍, 等. 中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2252-2263.
Tang X B, Zhang Y, Cao L Z, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing mechanism of synergistic effect of pollution and carbon emission reduction in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(10): 2252-2263.
- [14] 原伟鹏, 孙慧, 王晶, 等. 中国城市减污降碳协同的时空演化及驱动力探析[J]. 经济地理, 2022, 42(10): 72-82.
Yuan W P, Sun H, Wang J, et al. Spatial-temporal evolution and driving forces of urban pollution and carbon reduction in China [J]. Economic Geography, 2022, 42(10): 72-82.
- [15] 尹碧波, 邝萍, 欧阳昕彤, 等. 中国减污降碳与扩绿增长耦合协调度的时空特征及其驱动因素[J]. 经济地理, 2024, 44(11): 122-131.
Yin B B, Kuang P, Ouyang X T, et al. Spatio-temporal characteristics and driving factors of the coupling coordination degree between the pollution-carbon reduction, and the green expansion and economic growth in China[J]. Economic Geography, 2024, 44(11): 122-131.
- [16] Zha Q F, Liu Z, Wang J. Spatial pattern and driving factors of synergistic governance efficiency in pollution reduction and carbon reduction in Chinese cities[J]. Ecological Indicators, 2023, 156, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.111198.
- [17] Chen X L, Di Q B, Jia W H, et al. Spatial correlation network of pollution and carbon emission reductions coupled with high-quality economic development in three Chinese urban agglomerations[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 94, doi: 10.1016/j.scs.2023.104552.
- [18] 狄乾斌, 陈小龙, 侯智文. "双碳"目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1155-1167.
Di Q B, Chen X L, Hou Z W. Regional differences and key pathway identification of the coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China under the "Double-Carbon" targets[J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1155-1167.
- [19] 张国兴, 樊萌萌, 马睿琨, 等. 碳交易政策的协同减排效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(3): 1-10.
Zhang G X, Fan M M, Ma R K, et al. Effects of the carbon emission trading policy on collaborative emission reduction [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(3): 1-10.
- [20] 刘华军, 裴延峰. 经济发展与中国城市雾霾污染——基于空间关联网络情形下的考察[J]. 城市与环境研究, 2018, (3): 15-41.
Liu H J, Pei Y F. Economic development and urban haze pollution in China: an investigation based on the spatial association network [J]. Urban and Environmental Studies, 2018, (3): 15-41.
- [21] 吴昊玥, 陈锐, 何艳秋, 等. 中国农业减污降碳协同效应量化及时空特征: 基于减排绩效视角[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 6828-6838.
Wu H Y, Chen R, He Y Q, et al. Estimation and spatiotemporal characteristics of the co-abatement effect of pollution and carbon emissions of agriculture in China: based on the emission mitigation performance [J]. Environmental Science, 2025, 46(11): 6828-6838.
- [22] Chen S Y, Tan Z X, Mu S Y, et al. Synergy level of pollution and carbon reduction in the Yangtze River Economic belt: spatial-temporal evolution characteristics and driving factors[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 98, doi: 10.1016/j.scs.2023.104859.
- [23] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.
Wang S J, Kong W, Ren L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793-810.
- [24] 马伟波, 赵立君, 王楠, 等. 长三角城市群减污降碳驱动因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1273-1281.
Ma W B, Zhao L J, Wang N, et al. Study on driving factors of pollution and carbon reduction in the Yangtze River delta urban agglomerations [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(10): 1273-1281.
- [25] 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[J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2353-2373.
Zhang M D, Weng A H. Spatial correlation network and its formation mechanism of urban water utilization efficiency in the Yangtze River economic belt[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(9): 2353-2373.
- [26] 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[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2413-2422.
Zheng H, Ye A Z. Spatial correlation network structure and influencing factors of carbon emission in urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2022, 42(5): 2413-2422.
- [27] 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[J]. 中国工业经济, 2015, (5): 83-95.
Liu H J, Liu C M, Sun Y N. Spatial correlation network structure of energy consumption and its effect in China [J]. China Industrial Economics, 2015, (5): 83-95.
- [28] 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[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(4): 958-983.
Shao S, Xu L L, Yang L L. Structural characteristics and formation mechanism of carbon emission spatial association networks within China [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2023, 43(4): 958-983.
- [29] Milo R, Shen-Orr S, Itzkovitz S, et al. Network motifs: simple building blocks of complex networks[J]. Science, 2002, 298(5594): 824-827.
- [30] 邓昊键, 刘凯. 京津冀地区城市韧性时空演变及空间溢出效应研究[J]. 地域研究与开发, 2024, 43(3): 70-76.
Deng H J, Liu K. Spatiotemporal evolution and spatial spillover effect of urban resilience in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Areal Research and Development, 2024, 43(3): 70-76.
- [31] 韩冬日, 丁丽鑫, 董会忠, 等. 组态视角下全过程治理驱动减污降碳协同的路径选择[J]. 环境科学研究, 2024, 37(9): 1867-1876.
Han D R, Ding L X, Dong H Z, et al. Path selection of whole process governance driving collaboration of pollution control and carbon reduction from configuration perspective[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(9): 1867-1876.
- [32] 刘明亮, 尹晶晶, 李华清, 等. 减污降碳协同效率时空演化特征及驱动机制研究——基于中国三大城市群[J]. 生态经济, 2024, 40(7): 174-183.
Liu M L, Yin J J, Li H Q, et al. Study on the spatial-temporal evolution characteristics of the synergistic efficiency of reducing pollution and carbon and the driving mechanism: based on the three major urban agglomerations in China[J]. Ecological Economy, 2024, 40(7): 174-183.
- [33] 那会, 霍晓谦. 中国县域减污降碳协同增效的时空演变及影响因素[J]. 中国环境科学, 2025, 45(3): 1657-1673.
Xing H, Huo X Q. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors

- of synergistic reduction of pollution and carbon emissions in Chinese counties [J]. *China Environmental Science*, 2025, **45**(3): 1657-1673.
- [34] 崔连标, 李晓, 段宏波. 长三角地区减污降碳协同效应评估[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, **34**(6): 21-32.
Cui L B, Li X, Duan H B. Synergistic effects of reducing pollution and carbon emissions in the Yangtze River Delta [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2024, **34**(6): 21-32.
- [35] 韩刚, 唐乐, 刘志敏, 等. 耦合网络视角下长三角地区紧凑性的演化特征[J]. *地理科学进展*, 2022, **41**(11): 2018-2029.
Han G, Tang L, Liu Z M, *et al.* Evolution characteristics of compactness in the Yangtze River Delta from the perspective of coupled network [J]. *Progress in Geography*, 2022, **41**(11): 2018-2029.
- [36] 俞洁, 张勇, 李清瑶. 长三角碳排放空间关联网络结构特征及演化机制[J]. *自然资源学报*, 2024, **39**(2): 372-391.
Yu J, Zhang Y, Li Q Y. Structural characteristics and evolutionary mechanism of spatial correlation network of carbon emissions in the Yangtze River delta [J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, **39**(2): 372-391.
- [37] 韩冬日, 刁燕霞, 王心娟. 黄河流域减污降碳协同治理效率空间网络关联特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2025, **46**(6): 3592-3603.
Han D R, Diao Y X, Wang X J. Correlation characteristics and driving factors of spatial network of collaborative governance efficiency of pollution reduction and carbon reduction in the Yellow River basin [J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(6): 3592-3603.
- [38] Sun X S, Li M R, Hou S Y, *et al.* Research on the spatial network characteristics, synergistic emission reduction effects and mechanisms of carbon emission in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Sustainability*, 2023, **15**(10), doi: 10.3390/su15108176.
- [39] 赵宸, 崔妮, 王明利. 京津冀地区农业减污降碳增效协同: 时空演变及影响因素研究[J/OL]. *中国农业资源与区划*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20241128.1047.006.html>, 2025-06-10.
Zhao C, Cui N, Wang M L. Synergy of agricultural pollution reduction and carbon reduction in Beijing-Tianjin-Hebei region: temporal and spatial evolution and influencing factors [J/OL]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20241128.1047.006.html>, 2025-06-10.
- [40] 张莹, 黄颖利. 中国减污降碳协同治理成本的时空特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2025, **46**(12): 6839-6850.
Zhang Y, Huang Y L. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of the coordinated treatment cost of pollution reduction and carbon reduction in China [J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(12): 6839-6850.
- [41] Shi W, Wang W J, Tang W W, *et al.* How environmental regulation affects pollution reduction and carbon reduction synergies—an empirical analysis based on Chinese provincial data [J]. *Sustainability*, 2024, **16**(13), doi: 10.3390/su16135331.
- [42] 岳文慧, 张丽君, 秦耀辰, 等. 黄河流域高碳制造业减污降碳协同效应及其影响因素[J]. *环境科学*, 2025, **46**(9): 5566-5576.
Yue W H, Zhang L J, Qin Y C, *et al.* Synergistic effect of pollution reduction and carbon emission reduction in high-carbon manufacturing industries in the Yellow River basin and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(9): 5566-5576.
- [43] Fan M J, Wang Y, Ye S, *et al.* The spatial network characteristics of the coupling coordination degree between pollution and carbon reduction and high-quality development in the Yangtze River economic belt [J]. *Land*, 2024, **13**(12), doi: 10.3390/land13122102.
- [44] Chen Y, Zhao Z H, Yi W, *et al.* Has China achieved synergistic reduction of carbon emissions and air pollution? Evidence from 283 Chinese cities [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, **103**, doi: 10.1016/j.eiar.2023.107277.
- [45] 韩冬日, 吕晓丽, 董会忠, 等. 数字技术对降碳减污协同增效的门槛效应[J]. *资源科学*, 2023, **45**(11): 2130-2143.
Han D R, Lv X L, Dong H Z, *et al.* Threshold effect of digital technology on the synergy of carbon reduction and pollution reduction [J]. *Resources Science*, 2023, **45**(11): 2130-2143.
- [46] Zhu J P, Wu S H, Xu J B. Synergy between pollution control and carbon reduction: China's evidence [J]. *Energy Economics*, 2023, **119**, doi: 10.1016/j.eneco.2023.106541.
- [47] Gao X W, Liu N, Hua Y J. Environmental Protection Tax Law on the synergy of pollution reduction and carbon reduction in China: Evidence from a panel data of 107 cities [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, **33**: 425-437.
- [48] 王雅楠, 李冰迅, 张艺蕊, 等. 中国减污降碳协同效应时空特征与影响因素[J]. *环境科学*, 2024, **45**(9): 4993-5002.
Wang Y N, Li B X, Zhang Y X, *et al.* Spatiotemporal characteristics and influencing factors of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in China [J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(9): 4993-5002.