汪振双,王宇飞,汪 涛,等.建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络特征及驱动机制 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):4064-4079.
Wang Z S, Wang Y F, Wang T, et al. Spatial correlation network characteristics and drivers of carbon reduction-construction waste control-green expansion-economic growth synergy effect in construction industry [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):4064-4079.

建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络特征及驱动机制

汪振双[1],王宇飞[1],汪 涛[2*],赵 宁[3] (1.东北财经大学投资工程管理学院,辽宁 大连 116025；2.重庆大学公共管理学院,重庆 400044；3.东北财经大学金融学院,辽宁 大连 116025)

摘要：本文利用熵值法、耦合协调度模型、社会网络分析和指数随机图模型方法,对 2010~2020 年中国省域建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应演变趋势、空间关联网络特征和驱动机制进行研究.结果表明,建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应从 0.51 上升至 0.60,从勉强失调逐步过渡到初级协调状态,具有显著的空间异质性;协同效应空间关联网络呈现"核心-边缘"分布特征,网络密度呈上升趋势,2020 年达到 0.2287.网络对核心区域的依赖性较弱,但网络状态尚未达到最佳,仍然存在较大的提升空间;河南、湖南、陕西和新疆等省份具有明显的"马太效应",而河北、安徽、江西和河南等省份表现出显著的"虹吸效应",黑龙江、吉林和辽宁等省在网络中担任边缘行动者的角色;大部分网络关联关系都集中在板块内部,东部发达区域主要为"净收益"板块,中西部区域为"双向溢出"板块.湖南、陕西和湖北等省占据网络结构洞位置,在建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应建设中具有明显优势;建筑业产值占 GDP 比重因素强化建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联关系,地理位置邻近性有助于促进协同效应网络的形成.因此,应结合区域的特点,制定针对性的建筑业降碳-减污-扩绿-增长政策,推动区域建筑业高质量可持续发展.

关键词：建筑业；协同效应；耦合协调度模型；熵值法；社会网络；指数随机图模型
中图分类号：X322 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-4064-16

Spatial correlation network characteristics and drivers of carbon reduction-construction waste control-green expansion-economic growth synergy effect in construction industry. WANG Zhen-shuang[1], WANG Yu-fei[1], WANG Tao[2*], ZHAO Ning[3] (1.School of Investment and Construction Management, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China；2.School of Public Policy and Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China；3.School of Finance, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：4064~4079

Abstract：The research explored the evolution trend, spatial correlation network characteristics and driving mechanism of the synergistic effects on carbon reduction, construction waste control, green expansion, and economic growth among different provinces in construction industry from 2010 to 2020 by entropy method, coupling coordination degree model, social network analysis method, and exponential random graph model. The results showed that: The synergistic effect of carbon reduction, construction waste control, green expansion, and economic growth in the construction industry increased from 0.51 to 0.60, gradually transitioning from a barely imbalanced state to a primary coordinated state, with significant spatial heterogeneity. The synergistic effect spatial correlation network presented a "Core-edge" distribution characteristic, and the network density showed an increasing trend, reaching 0.2287 in 2020. The network's dependence on the core region was weak, but the network state had not yet reached optimal state, and there was still significant for improvement, such as Henan, Hunan, Shaanxi, and Xinjiang were in a dominant position in the internet and had apparent "Matthew effect". Hebei, Anhui, Jiangxi, and Henan provinces had shown significant "Siphon effect". Heilongjiang, Jilin, Liaoning and other provinces played the role of peripheral actors in the network. Most of the spatial correlations of the synergistic effects of carbon reduction, construction waste control, green expansion, and economic growth in the construction industry were concentrated within blocks rather than between blocks. The developed eastern region was mainly the "Net profit" block, while the central and western regions were the "Two-way spillover" blocks. Hunan, Shaanxi, Hubei and other provinces occupied the network structure holes position and had obvious advantages in the construction of synergistic effects. The significant driving force of endogenous network structure was the formation process of the synergistic effect network. The factor of the proportion of construction industry output value/GDP strengthened the spatial correlation between the synergistic effects. The proximity of

收稿日期：2024-12-12
基金项目：教育部人文社会科学研究规划项目(24YJAZH148);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(72001035);教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(21JZD029);国家自然科学基金面上项目(72074034)
* 责任作者, 教授, wangtaothu@163.com

geographical locations helped to promote the formation of a basin collaborative governance network. Thus, targeted policies for carbon reduction, construction waste control, green expansion, and economic growth in the construction industry should be formulated based on the characteristics of different regions to promote high-quality development of the regional construction industry.

Key words: construction industry; synergy effect; coupling coordination degree model; entropy method; social network; exponential random graph model

据统计,建筑业消耗 40%的能源[1],排放 38%的温室气体[2],产生 30%的废弃物[3].协同推进降碳、减污、扩绿与经济增长是建筑业高质量发展的客观要求[4],旨在将建筑业发展方式由传统粗放式增长向可持续发展转型[5],是实现生态文明与建筑业高质量发展的必然路径.现有建筑业降碳-减污-扩绿-增长主要集中在建筑业碳排放和建筑废弃物排放等环境污染物排放和经济增长之间的关系,以及建筑业碳排放效率和减污减碳效率的研究[6-9].已有研究采用 Kaya 恒等式[6],LMDI 分解[8],EKC[9]等方法探讨不同空间尺度下建筑碳排放和废弃物排放与经济增长之间的关系和影响因素.此外,国内外研究人员采用投入产出分析方法[7],构建 DEA 模型[8]、SBM 模型[9],三阶段 SBM-DEA 模型[10]等对不同空间尺度下的建筑业碳排放效率和减污降碳效率进行测算.尽管区域环境治理已取得重大进展,但各省域资源禀赋,生产力水平等因素差异,建筑业经济发展与区域生态环境之间仍存在明显发展不平衡,呈现空间差异性[11].早期研究中,大部分学者采用探索性空间分析方法研究国家、省域和城市尺度上建筑业碳排放、碳排放效率和废弃物排放的空间格局,利用变异系数,泰尔系数和锡尔系数等来揭示建筑业碳排放[10]、碳排放效率[11]、废弃物排放[12]区域差异性和不均衡性.例如,已有研究分别采用标准差椭圆分析方法和核密度分析方法等对建筑业碳排放、碳排放效率和废弃物排放的时空分布的演化特征和规律进行分析[7,9,13].后期的研究中,国内外研究者多基于空间模型识别区域建筑业碳排放、碳排放效率、废弃物排放的空间依赖关系和空间集聚现象[14-16].空间聚集与收敛分析主要借助空间计量模型探讨建筑业碳排放、碳排放效率、废弃物排放是否存在空间效应[16-17].也有研究采用地理加权回归模型等空间计量经济学模型对其影响因素空间异质性进行分析[18-20].

由于产业关联、贸易往来和生产活动等社会经济要素的空间集聚和扩散效应,形成建筑业降碳-减污-扩绿-增长研发共享链,省域间生产要素配置的非均衡性和生产力水平的差异性更容易促使省域间产生涓滴效应[17-18,21],建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应存在显著的空间外部性和空间溢出效应,突破传统意义上的地理邻近关系,进而逐渐演化为降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络.然而现有文献对建筑业降碳-减污-扩绿-增长的研究多限于定性讨论,兼顾经济增长的区域间定量研究相对较少,将降碳减污协同效应与经济增长和绿色发展放在同一框架下的研究存在缺失.鉴于此,本研究将降碳、减污、绿色增长和经济增长纳入同一框架下,构建综合评价指标体系,采用熵值法和耦合协调度模型对降碳-减污-扩绿-增长的协同效应时空格局进行分析.同时,采用社会网络分析方法揭示建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的空间关联网络演化特征,并利用指数随机图模型对其驱动机制进行研究.

本研究可能的边际贡献如下:①将建筑业降碳、减污、扩绿和增长纳入到统一框架下,从社会网络空间视角分析各地区降碳-减污-扩绿-增长协同效应的空间关联性,解释区域间建筑业在经济与环境方面的相互影响与依存关系,探讨建筑业在减污降碳和经济发展过程中的地位变迁和节点间的相互依赖关系和动态变化,进一步丰富和完善建筑业可持续发展的理论和跨区域协同治理理论.②建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应是多层次非线性的复杂动态系统,利用随机指数图模型对建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络驱动机制进行研究,对于全面推进建筑业高质量可持续发展,以期为推动低碳城市和无废城市建设等实践提供案例参考和施政依据,可为进一步实现经济社会发展全面绿色转型提供政策建议.

1　研究方法和数据收集

1.1　建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的测算

1.1.1 协同效应指标体系 建筑业降碳-减污-扩绿-增长是一个复杂系统,各子系统之间相互促进,共同推动建筑业可持续发展.借鉴已有评价指标相关成果[2,5,11,13,16,22-35],遵循数据的科学性、系统性、典型性、合理性以及可获得性等原则,构建建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应指标体系如表 1 所示.

表 1 建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应评价体系

Table 1 Carbon reduction-construction waste control-green expansion-economic growth comprehensive evaluation indexes

目标层	指标层	单位	属性
降碳	间接碳排放[2,5,22-23]	kg	-
	CO_2 强度[5,24-25,27]	t/元	-
	人均 CO_2[2,26-27]	t/人	-
减污	建筑废弃物排放[5,16,27-28]	万 t	-
	能源排放量[27-28]	kg	-
扩绿	建成区绿化覆盖率[24-25,27,29-32]	%	+
	城市绿地面积[25,27,32]	km^2	+
	绿色发明专利[5,24-25,27]	项	+
	绿色实用专利[27,29-31]	项	+
增长	建筑业产值[5,16,22,33]	亿元	+
	建筑业产值占 GDP 比重[2,11,30-31]	%	+
	人均建筑业 GDP[6,11,27,30]	元	+
	地区 gdp 增长率[5,13,27,30]	%	+
	建筑业企业技术装备率[30,34-35]	元/人	+
	劳动生产率[2,27,30,34,]	元/人	+
	建筑业企业动力装备率[5,29-31]	kW/人	+

注:“+”代表该指标层对目标层有正向作用,“-”代表该指标层对目标层有负向作用.

1.1.2 熵值法 为确保建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应评价的系统性、客观性和典型性,消除主观因素影响,本研究采用熵值法计算评价指标赋权重.由于建筑业减污-降碳-扩绿-增长综合评价体系的各项指标在数值量纲上存在明显差异,采用标准化方法消除这些差异,具体计算过程如下[25]:

$$X_{ij}=\frac{X_{ij}-\min\{X_{ij}\}}{\max\{X_{ij}\}-\min\{X_{ij}\}} \quad (i=1,2,...,m;\ j=1,2,...,n) \tag{1}$$

第一步,标准化处理.表 1 中的正向指标按公式(1)进行标准化:

$$X_{ij}=\frac{\max\{X_{ij}\}-X_{ij}}{\max\{X_{ij}\}-\min\{X_{ij}\}} \quad (i=1,2,...,m;\ j=1,2,...,n) \tag{2}$$

表 1 中的逆向指标按公式(2)进行标准化:

$$q_{ij}=\frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}Y_{ij}} \tag{3}$$

式中:X_{ij} 为区域 i 中指标 j 的样本值,其中 max 和 min 分别为样本值中的最大值和最小值.

第二步,计算各指标标准化后的比重(q_{ij}):

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}(q_{ij}\ln q_{ij}),e\in(0,1] \tag{4}$$

第三步,计算评价指标体系中第 j 项指标的熵值 e_j:

$$g_i=1-e_j \tag{5}$$

第四步,计算第 j 项指标的差异性系数(g_j):

$$W_j=\frac{g_j}{\sum_{j=1}^{n}g_j} \tag{6}$$

第五步,计算第 j 项指标的权重(W_j):

$$S_i=\sum_{i=1}^{m}W_jY_{ij} \tag{7}$$

第六步,计算建筑业降碳-减污-扩绿-增长评价指标体系中各指标的综合评分(S_i):

1.1.3 耦合协调度模型 引入耦合协调度模型对建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应进行计算,具体计算公式如下[36]:

$$C=\left\{\frac{U_1\cdot U_2\cdot U_3\cdot U_4}{\left[U_1\cdot U_2\cdot U_3\cdot U_4/4\right]^4}\right\}^{\frac{1}{4}} \tag{8}$$

式中:C 为建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应中 4 个子系统之间的耦合度.其中,U_1、U_2、U_3 和 U_4 分别为建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应中每个子系统的综合得分.

表 2 耦合协调度等级评价标准

Table 2 Evaluation criteria for coupling coordination degree level

序号	耦合协调度	协调等级	协调发展阶段
1	[0.0.,0.1)	极度失调	失调衰退区间
2	[0.1,0.2)	严重失调	
3	[0.2,0.3)	中度失调	
4	[0.3,0.4)	轻度失调	
5	[0.4,0.5)	濒临失调	过度调和区间
6	[0.5,0.6)	勉强失调	
7	[0.6,0.7)	初级协调	协调发展区间
8	[0.7,0.8)	中级协调	
9	[0.8,0.9)	良好协调	
10	[0.9,1.0]	优质协调	

采用耦合协调度模型来对建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应,计算公式如下:

$$T(U_1,U_2,U_3,U_4)=\beta_1U_1+\beta_2U_2+\beta_3U_3+\beta_4U_4$$
$$D(U_1,U_2,U_3,U_4)=\sqrt{C(U_1,U_2,U_3,U_4)\cdot T(U_1,U_2,U_3,U_4)} \quad (9)$$

式中:T 为建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应系统间的综合贡献指数;D 为建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应,评价标准如表 2 所示[36-37]; β 为模型中的待定系数,为子系统在建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应系统所占权重比例.参考已有相关研究[24,37-38],本文的权重系数取值为 1/4.

1.2　建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络分析

1.2.1　空间关联网络构建　借鉴相关研究[16-17],利用修正引力模型刻画建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的空间关联强度:

$$S_{ij}=k_{ij}\frac{E_iE_j}{\left[D_{ij}/(G_i-G_j)\right]^2} \quad (10)$$

$$k_{ij}=\frac{G_iN_i}{G_iN_i+G_jN_j} \quad (11)$$

式中:S_{ij} 表示 i 区域和 j 区域建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的空间关联强度;E_i、E_j、D_{ij} 表示 i 区域到 j 区域之间的地理距离;G_i 和 G_j 分别表示 i 区域和 j 区域的经济发展水平,用人均 GDP 衡量;k_{ij} 表示 i 区域对空间关联强度 S_{ij} 的贡献度;N_i N_j 分别代表 i 区域和 j 区域的人口数量.

根据公式(10)和(11)计算省域间建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的引力矩阵,采用"均数原则法"得到二值矩阵,确定网络关联矩阵[39].

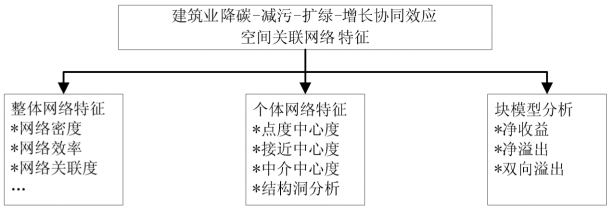


图 1　建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络结构分析框架

Fig.1　Spatial correlation network structure analysis framework for the synergistic effects in the construction industry

1.2.2　社会网络方法　社会网络分析方法是用来分析"关系数据"的一种定量分析方法,其将空间单元(区域)视为节点,形成空间关联网络,分析生产要素的流动.本研究通过社会网络方法构建建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的空间关联网络,并对对网络的结构和演化特征进行分析,包括整体网络特征,个体网络特征和块模型等[38,40-41],具体如图 1 所示.

1.3　指数随机图模型方法

为揭示建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络的形成机制,需要分析省域建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联的关系数据.指数随机图模型方法提供了一种可解释的框架,通过对参数的估计和推断来理解网络中的关键因素以及它们的作用方式[42].指数随机图模型不仅能够同时检验关系数据和属性数据对网络的影响[43],还可以研究内生性结构变量等因素对协同网络形成的影响.本研究的建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同发展的空间关联具有复杂性、多维性的特点,考虑到网络形成的内生结构效应、个体属性效应以及外部网络效应等 3 个方面构建模型.

1.3.1　模型构建　为实证考察建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络形成驱动机制,本研究构建的指数随机图模型如下:

$$P(Y\mid X)=P_1^{Y}P_0^{(1-Y)} \quad (12)$$

式中: $P_1=\mathrm{e}^{(-\beta x_i+\varepsilon)}/(1+\mathrm{e}^{(-\beta x_i+\varepsilon)})$, $P_0=1/(1+\mathrm{e}^{(-\beta x_i+\varepsilon)})$ 为 X 条件下,Y=1 和 Y=0 时的概率;Y 为建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络矩阵;$P(Y/X)$ 为在 X 条件下,Y 的概率值; β 为模型中待定系数;x_i 为模型中的解释变量.

1.3.2　模型变量选择　本研究采用 ERGM 模型考察建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应网络形成的内生结构效应、个体属性效应以及外部网络效应的影响.内生结构效应主要探究网络连通性和集聚性等网络关系内部演变的自组织效应.本研究选择边数(Edges)和交互性(Mutual)等作为内生结构变量分析建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络内生结构效应[43].个体属性效应从网络节点属性效应方面去探索建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联关系形成机制.在已有研究 STIRPAT 模型的基础上[18,44],本研究选取人口数量[17-19]、建筑业产值[5-6,22-23,44]、地区 GDP 增长率[5,13,27,30],建筑业产业占 GDP 比重[2,11,17,30-31]、建筑业企业总收入[11,13,15-16]、建筑业企业技术装备率[15,30,34-35]和劳动生产率等[5,17,29-31]的影响.外部网

络效应从地理距离相近的省域间建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应关联关系可能更为紧密.因此,本研究外部网络效应将省份间的地理邻接关系网络纳入模型研究中,以检验地理邻接性对建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络形成机制的影响[45-46].

1.4 数据来源

数据包括 2010~2020 年 11 年间的全国 30 个省域(除西藏、香港、澳门和台湾)的相关数据作为研究样本.这些数据来源于《中国能源统计年鉴》、《中国统计年鉴》等.其中,建筑业碳排放和建筑废弃物排放分别采用碳排放系数法[7,16]和面积估算法进行测算获得[17-18,20].省域间地理距离利用 ArcGIS 软件 distance 功能,结合各省会地理坐标计算[17,46].缺失的个别数据通过插值法或以上下年份的平均数方式加以处理进行相应补充[20].

2 结果与讨论

2.1 建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间分布特征

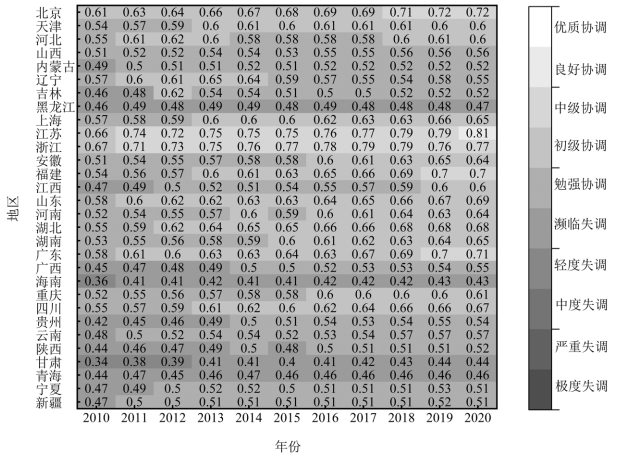


图 2 建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的时空演变特征

Fig.2 The spatiotemporal evolution characteristics of the synergistic effects in the construction industry

如图 2 所示,2010~2020 年,中国建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应从 0.51 上升至 0.60,上升较为平稳,从勉强失调逐步过渡到初级协调状态.其中,浙江和江苏从 2011 年起,建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应逐渐增大,处于中级协调状态.2020 年,江苏建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应值为 0.81,处于良好协调状态.北京、广东和福建分别从 2018 年和 2019 年进入中级协调状态.甘肃和海南建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应从轻度失调逐步过渡到濒临失调状态.黑龙江和青海建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应一直处于濒临失调状态.可以看出,建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应表现出显著的空间异质性.

如图 3 所示,2010~2020 年,建筑业降碳、减污、扩绿和增长指数变化趋势.整体较为平稳,变化趋势不明显.

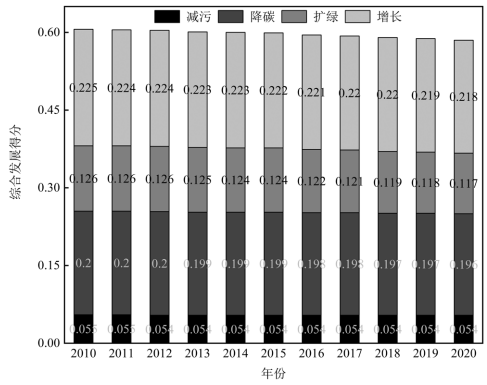


图 3 建筑业降碳-减污-扩绿-增长系统的指数变动趋势

Fig.3 Index trend of carbon reduction-constrcution waste control-green expansion-economic growth system in the construction industry

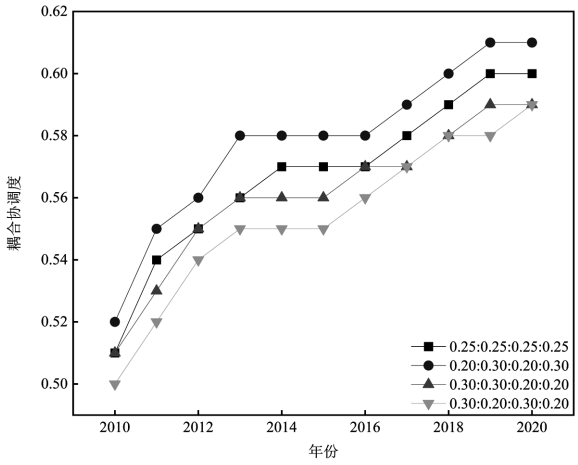


图 4 不同权重组合下建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的变化趋势

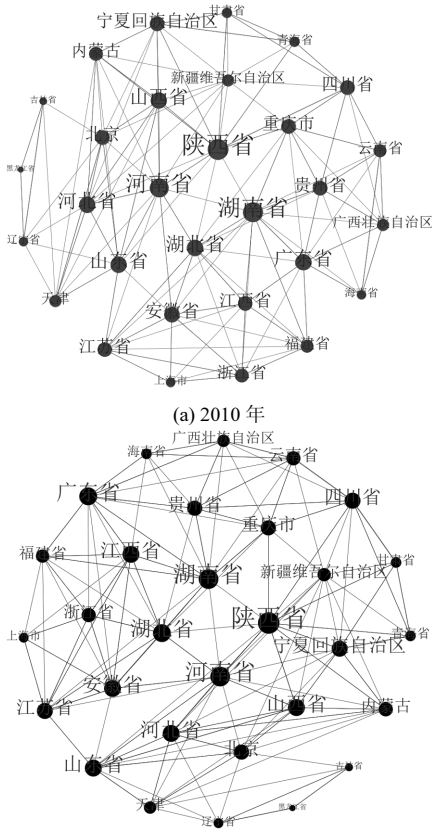
Fig.4 The changing trend of the synergistic effect in the construction industry under different weight combinations

对不同权重进行建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应敏感性分析,分别取 β_1,β_2,β_3 和 β_4 分别取 0.25:0.25:0.25:0.25,0.20:0.30:0.20:0.30,0.30:0.30:0.20:

0.20 和 0.30:0.20:0.30:0.20..如图 4 所示,不同组合权重下建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的变化趋势几乎一致.因此,利用耦合协调度模型测算建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应是有效的.

2.2　建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络特征

2.2.1　整体网络特征　如图 5 所示,2010 和 2020 年省域建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联呈现复杂的网络结构形态,各省域间建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联关系打破了地理邻接距离的限制,对跨区域省份产生空间溢出效应.



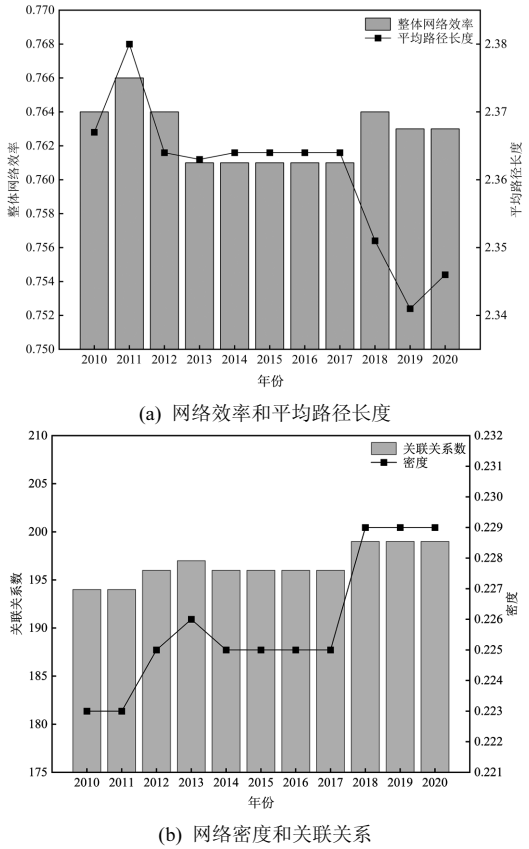
(a) 2010 年

(b) 2020 年

图 5　中国建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络结构

Fig.5　Spatial correlation network structure of synergistic effects of carbon reduction-construction waste control-green expansion-economic growth in construction industry

2010~2020 年,建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应网络密度从 2010 年的 0.2230 上升到 2020 年的 0.2287,整体呈现缓慢上升趋势.网络关联关系数由 194 上升至 199,说明建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应网络状态尚未达到最佳,仍然存在较大的提升空间.随着各省经济、创新,技术及基础设施的不断提升和完善,使得各区域间的联系更为紧密.网络关联关系数增加意味着网络中的信息和资源有更多的传播和交流途径.因此,需要不断加强跨区域间建筑业降碳-减污-扩绿-增长的合作和交流,同时推动省域间建筑业资源要素的空间优化和配置,促进建筑业高质量发展.网络关联度始终为 1,说明建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应网络结构具有良好的可达性和稳定性,不存在脱离网络而独自孤立的区域,具有空间溢出效应[47].



(a) 网络效率和平均路径长度

(b) 网络密度和关联关系

图 6　建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联整体网络特征

Fig.6　Overall network characteristics of spatial correlation of synergistic effects in the construction industry

网络等级在 2010~2020 年较为稳定,大致保持在 0.241 左右,表明各省域建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络对少数或单个节点的依赖性较弱,网络结构呈现均衡化发展趋势,网络在信息传递和资源分配方面的性能较为稳定,网络的稳定性较强,呈现出"核心-边缘"结构.网络效率表现

为先增大后减小,再增大波动变化趋势,2019 年达到研究期间最大值 0.781.建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中有一定数量的冗余渠道,网络的整体稳定性有待进一步提高.说明空间关联网络虽然对核心区域的依赖性较弱但其关联稳定性在逐渐增强.建筑信息模型等现代科技手段持续推进建筑业信息化,省域建筑业节能减排等信息流通更加顺畅[17],促进了不同省域间建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同治理联动,使建筑业生产要素在省域间的流动成本显著降低,从而增强了省域建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络的网络关联性.网络平均路径长度呈现出下降趋势,从2010 年的 2.367 下降到 2020 年的 2.346,网络中节点之间的距离在逐渐减小,信息传递可能需要经过更少的节点,使得信息传递的效率更高[16].

2.2.2 个体网络特征 建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络个体网络特征主要包括度数中心度(点出度和点入度)、中介中心度以及接近中心度等指标特征.限于论文篇幅的限制,研究中选取 2010 和 2020 年,计算建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络个体网络特征,计算结果如表 3 所示.

表 3 建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络个体网络特征

Table 3 Spatial correlation network and individual network characteristics of synergistic effects of carbon reduction-construction waste control-green expansion- economic growth in the construction industry

省份	度数中心度(2010/2020)			接近中心度(2010/2020)		中介中心度(2010/2020)
	点入度	点出度	度数	内接	外接	
北京	11/4	4/8	10/8	49.15/45.31	15.34/15.34	2.93/1.07
天津	9/3	3/9	8/9	46.03/46.03	14.57/14.36	0.49/1.56
河北	10/6	6/10	10/10	50.00/50.00	15.59/15.59	3.28/4.68
山西	8/8	8/8	9/9	48.33/46.77	16.76/16.76	7.25/6.94
内蒙古	5/5	7/8	9/9	39.18/39.19	16.20/16.76	1.28/1.94
辽宁	2/2	6/6	6/6	3.57/3.57	25.89/25.22	3.38/4.68
吉林	2/2	4/3	4/3	3.57/3.57	23.01/20.71	0.31/0.06
黑龙江	2/2	3/2	3/2	3.57/3.57	22.84/20.57	0.00/0.00
上海	5/5	3/4	5/5	37.66/38.16	14.50/15.43	0.00/0.62
江苏	10/8	5/5	9/8	53.70/50.00	15.85/15.26	4.20/3.34
浙江	8/6	5/5	8/6	44.62/41.43	15.26/15.51	2.02/0.81
安徽	10/9	5/6	9/9	53.70/53.70	16.57/16.29	8.65/7.84
福建	4/6	8/8	8/9	37.18/38.67	16.38/16.29	1.13/3.69
江西	6/8	8/7	8/9	43.28/44.62	16.38/16.02	4.92/3.03
山东	10/7	7/7	10/9	53.70/44.62	16.29/16.02	10.23/7.86
河南	9/10	9/9	13/13	58.00/58.00	17.16/17.16	14.10/18.55
湖北	10/9	6/6	11/10	52.72/51.79	16.86/16.86	5.07/6.18
湖南	10/10	10/8	14/12	47.54/47.54	17.68/17.47	12.24/14.17
广东	7/5	11/8	10/8	38.16/35.37	17.37/16.96	6.12/3.72
广西	4/4	7/7	7/7	30.85/29.00	16.95/16.76	0.61/0.55
海南	2/4	5/7	5/7	28.16/29.00	16.29/16.57	0.13/0.83
重庆	8/8	6/6	9/9	43.28/43.28	17.26/17.26	5.38/5.54
四川	9/8	6/6	8/8	40.28/39.73	16.67/16.67	6.18/6.05
贵州	7/7	7/7	8/7	37.66/36.71	16.96/16.76	2.66/4.19
云南	5/6	6/6	7/7	33.72/33.33	16.86/16.67	2.43/2.15
陕西	8/9	12/11	13/12	46.03/47.54	18.01/17.90	20.25/20.99
甘肃	5/5	4/4	5/5	35.37/35.80	16.29/16.20	0.32/0.30
青海	5/5	4/4	5/5	35.37/35.80	16.29/16.20	0.32/0.30
宁夏	6/6	9/7	9/8	38.67/37.66	17.16/16.67	2.10/2.00
新疆	0/0	11/13	13/13	3.33/3.33	21.17/21.64	0.00/0.00

河南、湖南、陕西和新疆等省份在关联网络中展现出较高的度数中心度,这些省份在建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络结构中与其他省份联系较多,处于网络的主导地位,在网络中具有较大的控制力,具有明显的马太效应.到 2020 年,陕西和湖南的度数中心度有小幅度下降,可能受

区域经济增长速度减缓、能源转型滞后,建筑废弃物和碳排放增加等因素的影响.度数中心度较低的省份有吉林、黑龙江、青海及甘肃等省份,在关联网络中处于从属的地位.点入度较大的省份有河北省、安徽省、江西省和河南省等,是建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中的受益主体,表现出显著的虹吸效应[48].点出度较大的省份有河南省、湖南省、陕西省和新疆维吾尔自治区等,是建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中的溢出主体.

研究期间,中介中心度呈先上升后下降趋势,但是总体趋于稳定.陕西省、河南省和湖南省等一直保持着较高的中介中心度.陕西、河南和湖南 3 省经济体量较大且持续展现出增长趋势;同时三省有着优越的地理位置,河南省地处中原,陕西省是连接中国东部、中部和西南、西北地区重要的交通枢纽,湖南省是链接西南与东部的重要枢纽.在建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中扮演贯南通北、承东启西的枢纽角色,促进与其他省域之间的联系.吉林、黑龙江和新疆等地区,由于其地理位置,以及交通条件相对滞后,在网络中起到中介作用相对较弱.网络结构正在向合理化、均衡化发展,各节点在信息和资源传递方面更加自主.上海市中介中心度也处于较高的水平,这可能是由于上海产业结构多元化,服务业占主导,对建筑业资源投入和政策倾斜相对不足,影响相关资源整合和网络构建.同时,有限且昂贵的土地资源限制建筑项目规模和类型,影响建筑业减污降碳扩绿增长空间,削弱在相关产业链中的中介连接作用.江苏、安徽、河南和湖北等地区的内接中心度较大,主要归因于基础设施的完善、产业结构的优化、人才的集聚以及科技创新水平的提高.黑龙江、吉林、辽宁以及新疆等省内接中心度较小且外接中心度较大,这些区域基础设施落后且资源有限,而且这些区域大多属于地理位置较为偏远发展相对滞后的地区,因此对其他省份的影响较小.这些省份受到其他省份的先进低碳技术和发展资源溢出效应不明显,主要受制于科技技术水平落后、资金不足等因素的影响[34-35],在建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中担任边缘行动者的角色.

如表 4 所示,从网络有效规模来看,湖南、陕西和湖北等省域在建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中的有效规模处于前列,对网络影响力极大,具有更广泛资源的获取能力[49].陕西和湖南等省域在结构洞分析中的效率值排名前两位,这些省域在网络连接中具有高校的资源利用和信息传递作用.河南、陕西和湖南等省域限制度较低,在建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中具有较高的灵活性.从等级度来看,吉林省、辽宁省等地区等级度较高,意味着这些地区在网络中可能存在一定程度的等级结构,节点之间的地位差异较为明显.网络等级度结果也验证了中国建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络的“中心-边缘”等级森严结构.

表 4　建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络结构洞指标

Table 4　Structural hole indexes of spatial correlation network in the construction industry

参数	项目	有效规模		效率		限制度		等级度	
		2010	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
统计值	最大值	8.98	8.31	0.65	0.64	0.84	0.84	0.16	0.16
	最小值	1.00	1.00	0.31	0.28	0.22	0.22	0.00	0.00
	极差	7.98	7.31	0.34	0.36	0.62	0.62	0.16	0.16
变化数量	增大	11		5		4		5	
	减小	11		12		5		4	
	不变	8		13		21		21	

2.2.3　块模型分析　为了厘清建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络的内部结构以及各省份在网络中的地位,通过块模型深入分析建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络模块内部和模块间的空间内部结构和关联特征.选用 CONCOR 迭代运算方法,进行非重叠性聚类分析,将 30 个省划分为 4 个板块,各板块呈局外扩散溢出效应,如表 5 所示.2010 年和 2020 年模块一和模块三接收关系数均大于其溢出关系数,且实际内部关系比例均大于期望内部关系比例,两板块均属于净收益模块;模块二和模块四不仅对板块内有溢出效应,而且对板块外也有溢出效应.两板块接收关系数小于板块溢出关系数,同时板块得实际内部关系比例均大于板块期望内部关系比例,两板块均属于双向溢出模块.建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的大部分空间关联都集中在板块内部.

通过空间网络密度矩阵和像矩阵来进一步的

分析板块间的溢出关系和溢出效应,如表 6 所示.结合表 6 的计算结果,绘制四大板块间互动关系,如图 7 所示.建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的空间网络板块内部关联和溢出效应现象显著,建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应网络的"帮派"特征明显,具有同群效应;而建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的空间网络板块之间的关联关系相对疏松,不够紧密.总的来说,中国省域建筑业减污降碳效率空间关联网络中各板块之间的交流和联系不够完善.未来应加强板块内部与板块之间的联系,促进板块之间技术和信息等要素交流,促进建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的协同,从而实现各省域降碳-减污-扩绿-增长协同效应的协同提升以及协同减排机制的完善.

表 5 建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应网络板块的溢出效应

Table 5 Spillover effects of carbon reduction-construction waste control-green expansion-economic growth synergy network in the construction industry

模块属性 (2010/2020)		第一模块 (净收益)	第二模块 (双向溢出)	第三模块 (净收益)	第四模块 (双向溢出)
接收关系数		19/22	13/10	20/19	11/12
溢出关系数		8/10	30/26	9/8	16/19
内部关系比例	实际(%)	82.98/79.59	49.15/52.73	79.55/81.40	67.35/63.46
	期望(%)	20.69/27.59	24.14/20.69	24.14/20.69	20.69/20.69

表 6 建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络板块的密度矩阵和像矩阵

Table 6 Density matrix and image matrix of spatial correlation network blocks in the construction industry

板块	2010				2020			
	模块一	模块二	模块三	模块四	模块一	模块二	模块三	模块四
模块一	1	0	0	0	1	0	0	0
模块二	1	1	0	0	1	1	0	0
模块三	0	0	1	0	0	0	1	0
模块四	0	0	0	1	0	0	1	1

从图 7 中可以看出,第一模块和第三模块主体均为东部的发达地区,第二模块多为西部地区,第四板块多为西南华南地区.2010 年,四个板块均有溢出,而板块一相对溢出较少.这一时期,板块一吸收主要来自板块二的溢出效应,同时对板块二和板块三有少量的溢出.板块三与板块一特点相同,均属于净收益板块.在 2010 年和 2020 年,模块一与模块二之间的关系始终存在,说明这两个模块之间的联系较为稳固,可能存在持续的资源交换、信息传递或相互影响关系.2020 年,四个板块的类型不变,板块内部成员分布相对较为稳定,板块一的数量由 7 个变成 9 个,其中在原成员不变的基础上增加了来自第二板块的河南和山西;其他板块之间也有内部成员的流动,板块三的湖南补到第四板块,板块四的四川则移到了第二板块,说明板块之间的联系更加紧密,为建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同治理工作提供了一定程度的连续性.其中,需要说明的是模块三和模块四在 2010 年对应元素为 0,而在 2020 年则变为 1.

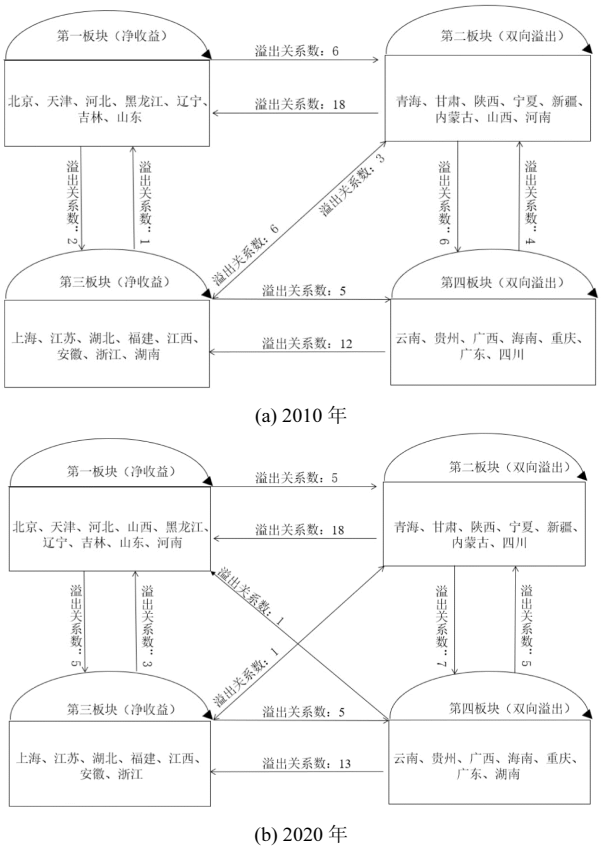


图 7 建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间网络板块关联

Fig.7 Spatial network block correlation for the construction industry

箭头代表板块间溢出关系流向

由于外部环境变化、政策调整以及自身发展需求,使两个模块之间在 2020 年开始有了新的互动,建立了新的合作,体现了网络的适应性,形成新的互动模式.集聚性在网络关系的形成过程中发挥了重要作用,建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的空间

网络存在"社群效应",在某些特定的区域间形成空间关联关系"俱乐部效应"[49],以应对外部挑战或抓住发展机遇.模块一与模块二之间稳定的联系以及模块三与模块四之间新建立的联系,都有助于增强整个建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同效应空间关联网络的稳定性.

2.3　模型拟合

利用指数随机图模型对建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同效应空间网络进行参数估计,结果见表7.模型1,模型2和模型3分别为内生网络结构,节点属性和外生关系网络拟合结果.可以看出,模型 1 拟合指标 AIC 和 BIC 最小,说明建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同效应空间关联内生网络结构比外生关系网络和节点属性在建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同发展空间关联网络形成中发挥更为重要的作用.与模型 1,模型 2 和模型 3 相比,模型 4 拟合指标 AIC 和 BIC 最低,说明模型中同时包含内生网络结构、节点属性以及网络关系这 3 类变量,更能揭示建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同效应空间关联网络形成驱动机制.因此,采用模型 4 可以更好地解释建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同效应空间关联网络形成.在表 7 的模型当中,系数显著为正表示变量对网络的形成具有促进作用;模型中系数显著为负表示变量对网络的形成具有抑制作用[51].

表 7　ERGMs 参数估计结果

Table 7　Estimation results of ERGMs parameters

变量名称	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5
Edges	−5.7866***	−1.90080*** (0.42124)	−2.0712***	−4.5029***	−6.8052***
	(0.5173)		(0.1141)	(0.8176)	(0.6673)
Mutual	1.1849***			0.2417	0.7880*
	(0.2788)			(0.3291)	(0.3890)
Gwesp	2.6269***			2.6749***	2.9554***
	(0.2871)			(0.3030)	(0.3807)
Nodecov.GDP_Per		0.06718		2.4262**	1.0528**
		(0.47859)		(0.8431)	(0.4080)
Nodecov.TER		−0.42070		−0.3741	−0.1280
		(0.36511)		(0.5550)	(0.2817)
Nodecov.GDP_Ration		0.83180*		−1.4925*	−0.6471*
		(0.37255)		(0.6429)	(0.3249)
Nodecov.LP		−0.01431		−0.8549	−0.4671
		(0.28277)		(0.4792)	(0.2561)
Absdiff.GDP		−1.51913**		−1.4046	−0.4740
		(0.51751)		(0.8381)	(0.4180)
Absdiff.Population		0.66756		−0.1966	0.4884
		(0.43558)		(0.7007)	(0.3603)
Edgecov.GP_Net			3.8364***	2.7753*** (0.4372)	3.0355***
			(0.2785)		(0.3207)
AIC	418.6	921.6	644.3	373.3	454.6
BIC	432.9	955	653.9	421	502.2

注: * P<0.10, ** P<0.05, *** P<0.01;括号内数值为标准误.

2.3.1　内生网络结构的作用

由模型1和模型4可知,模型中交互性(Mutual)回归系数为正显著,表明建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同效应空间关联网络存在较多的双向关联关系,建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同效应在不同省域间表现出平等互惠的关联关系.弧(Edges)在模型1和模型4中的系数均显著负,说明建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同发展空间关联网络的形成具有非随机性[52].Gwesp 的系数均在 1%水平上显著为正,说明传递效应在建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同发展空间关联网络的形成中发挥着重要作用.建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同效应空间关联网络传递性系数显著为正的主要原因为共享多个伙伴的行动者之间更容易形成社会关系,提升行动者之间连接,提升网络社会关系出现的概率[20].建筑业降碳−减污−扩绿−增长协同效应中有形成分层路径闭合连接的趋势,这种封闭的传

递性结构更有益于对建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络的形成.表明省域间的建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应受到的闭合机制的影响越来越强,这可能与网络集聚性发展有关[53-54].在建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中,网络的传递效应表现为不同省域间信息、技术、资本和人才等要素的流动,缓解建筑业减污降碳和协同增效的压力.省域管辖内封闭性独立治理模式造成的建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应资源短缺,从而走出逐底竞争和以邻为壑的困境,将进一步提高子群体内跨域间建筑业降碳-减污-扩绿-增长合作效率.

2.3.2 外生节点属性作用 个体属性效应考察建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应网络中节点属性对关联关系作用机制.Nodecov 表示节点属性强弱对边形成的影响,absdiff 表示节点之间差异对边形成的影响.在模型2中,结果表明建筑业产值(GDP)的占比对边的形成具有(5%显著水平)正向效应.建筑业产值(GDP)占 GDP 比重表现出马太效应,建筑业经济发展水平相近的区域面临的宏观经济环境较为相似,建筑业在生产方面存在诸多共同之处,在生产过程中存在着“同群效应”[55],能够强化建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联关系.Nodecov.GDP_Per,Nodecov.TER,Nodecov.LP 和 Absdiff.Population 在模型 2 中未通过显著性检验,对网络形成的驱动效应不显著,未表现出马太效应.经济水平的提高有助于技术水平的提高,及人均建筑业 GDP 的提高有助于技术水平和装备水平的提高,随着人均建筑业 GDP 的提高,建筑业在技术和装备上会不断升级,可以减少建筑业能源消耗、建筑废弃物和碳排放量,从而推动建筑业减污降碳.其次,随着 GDP 的增加,人们对生活的追求要求会更高,人们对绿色环保的意识和需求也会增加.建筑业企业为了适应消费者的需求,可能会加强建筑废弃物和碳排放管理,采取更环保的建筑方式和材料,从而提高减污降碳效率[56].建筑业区域间经济发展效率以及节能减排成本的差异,使建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应高的区域的比较优势向建筑业协同效应发展程度较低的地区的转移行为,促进建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络的形成.同时,促进政府出台更严格的环保政策,强制建筑业降低废弃物排放和碳排放,提高建筑业的可持续发展.建筑业经济发展与环境保护目标的错位和冲突,以及建筑业清洁环保机制的不健全,导致不同区域在推动建筑降碳-减污-扩绿-增长协同效应时出现难以权衡的困境,抑制了网络协同关系的形成.建筑业产值(GDP)差距越小的城市之间越可能形成边(absdiff.GDP 的结果在1%显著水平显著并且系数为负),具有显著的“同配效应”.估计参数显著为负表明属性越相近的省域间更容易建立联系[20].可能是由于建筑业企业总收入增加进一步扩大企业的生产规模,带来更大的能源消耗,从而加剧建筑废弃物排放和碳排放,导致建筑业减污降碳效率降低[19,57].后期,由于企业收入增加,生产力水平提升,更关注国家的环境政策和要求,发展低碳经济、循环经济,装配式建筑技术的发展,3D 打印混凝土技术,智能建造等施工工艺的提升,建筑业减污降碳效率不断提高.建筑企业通过利用和整合优质生产要素资源,有效提高建筑企业的低碳技术创新和研发能力,进而改善和提高区域建筑业建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应.此外,规模较大的建筑企业更容易受到环境监管部门的关注和监管,更愿意通过技术的创新提高企业减污降碳能力,采取更严格的环保标准提高竞争力,并配合政府相关部门监管,提高建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应.随着早期粗放式区域经济发展模式,到集约型发展模式,区域建筑业的发展从“先污染、后治理”到建筑业的可持续发展.当区域经济发展到一定程度,人们更加关注在经济发展的同时兼顾环境保护,实现经济发展方式从粗放式发展向集约式发展模式的转变,从而促进建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的提高[58].

经济水平高的区域往往会吸引其他区域的资本和人才等生产按要素流入,使得经济水平较高的区域有足够的资金来研发和推广建筑业减污降碳技术[28].与此同时,通过制度创新、技术创新等途径,经济发展水平较高的地区能在环境治理方面投入更多资金,在市场机制作用下,生产要素的“虹吸效应”和“涓滴效应”愈发显著[59-60],科技投入将推动区域科技创新和技术进步,实现建筑业绿色增长,不断促进建筑业减污降碳和协同增效,促进区域间建筑业空间关联网络的溢出效应.人口数量在一定范围内增长能够产生集聚效应和规模效应,城市化

水平高,提高地区基础设施和能源的利用效率,推动资源共享和循环利用,但我国以煤炭为主的能源结构尚未得到本质上的扭转,清洁能源的生产制造还处于初级阶段,技术投入与产出尚不稳定,使得建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应呈现出较大波动[61-63].

2.3.3　网络关系　由地理学第一定律可知,地理距离相近的省域间建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络关系可能更为紧密.本文构建地理邻接矩阵(若省份间地理位置邻接,取值为 1;否则,为 0),将地理邻接关系网络纳入模型中,分析地理邻接性对建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同发效应空间关联网络形成的影响.从表 7 中可以看出,地理邻近网络在 1%的显著性水平为正,建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络和地理邻近网络有明显的重叠.地理邻近网络对省域建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络关系的形成具有正向促进作用[64].

地理位置临近降低空间距离带来建筑业信息不对称和交易成本,受同一区域政府约束和管辖弱化了制度和组织差异带来的合作壁垒[33].随着我国西气东输等大规模的能源跨区域调配政策实施,建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同发展空间依赖性的明显增强,“以邻为壑”的情况在建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中更为普遍.在地理邻近效应和区域建筑业发展水平双重驱动作用下,更有利于促进建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络的形成.因此,促进建筑业实现降碳-减污-扩绿-增长协同高质量发展目标,需要打破不同省域间行政边界的壁垒,推动跨域间建筑业省域间降碳-减污-扩绿-增长治理的协调机制的构建.

2.4　稳健性检验

在指数随机图模型中,通常采用马尔科夫链蒙特卡罗极大似然估计法(MLE)和伪极大似然估计法(MPLE)进行数据拟合[65-66].表 7 中模型 4 为采用伪极大似然估计法(MPLE)拟合得到模型.在模型稳健性检验过程中,采用更换估计方法,利用马尔科夫链蒙特卡罗极大似然估计法(MLE)进行拟合验证,结果如表 7 中模型 5 所示.从表 7 中模型 4 和模型 5 中对比可以看出,估计系数的方向和显著性均未发生变化,并与 MPLE 方法拟合结果接近,验证模型稳健性.

2.5　建议

(1)通过科技创新、技术升级、数字经济等支持,激发区域建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应发展潜力.通过建筑全生命周期的一体化绿色统筹,切实把低碳、绿色发展理念融入到建筑全生命周期过程中, 实现建筑业减污降碳的源头的减量化管理.重视建筑全生命周期综合技术集成创新,减少隐含碳,降低建筑业对资源的依赖,推进循环经济.采用绿色建筑材料和绿色施工方法,引入先进的建筑业低碳处理设备与技术,加强建筑能效评估和认证.推广碳捕集、利用和封存技术,协同推进建筑废弃物跨域协同减碳技术. 激发建筑企业绿色创新活力,通过激发自身低碳技术溢出效应,带动周边区域建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的整体提升,弱化极化现象. 通过信息、资源、技术和市场共享,推动建筑业转型升级.建立建筑业信息共享平台,实现物流,信息流和资金流的优化配置.

(2)中央政府需要加强对“净溢出”板块区域环保资金和资源化利用的配套支持,利用税收优惠补贴和绿色信贷等手段,建立激励机制,补偿机制和学习反馈机制,推动要素资源有效聚集和空间分类管理,推动建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应.增强协同效应网络的传递性,充分发挥网络中心行动者的领导力,消除“马太效应”阻碍,建立长效沟通机制,实现协同节能减排和空间均衡发展.鼓励建筑废弃物和碳排放跨区域合作治理和合作,东部地区可通过产业升级,降低建筑业全生命周期的碳排放,创新打造建筑废弃物资源化产业园区,促进循环经济快速发展.充分考虑降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中不同板块的特点,制定区域差异化的减污降碳管控策略和政策组合.“双向溢出”板块应积极学习“净收益”板块的先进的管理经验和技术方法,优化不同板块间的协同效益,缩小省域间建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的差异.

(3)加强各区域间建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应,协同治理的合作,通过技术和人才等要素交流合作,全面均衡推进建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应和多元主体协同治理.通过政策支持和资源倾斜,促进西部地区快速地融入到建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应协同治理网络.推动降碳-

减污-扩绿-增长政策转向“整体”而非停留在“局部”层面.进一步完善绿色创新发展的市场导向机制,利用市场机制突破行政边界的束缚,促进区域间要素合理流动,推进区域间建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应关系发展,发挥优势省份“头雁效应”,推动互联互通,提高网络紧密程度.构建低碳技术交流平台,多途径深化跨区域交流与合作,增强区域间同配效应,加强合作,增强区域流域内部发展的平衡性,协调性和可持续性,实现建筑业跨区域降碳-减污-扩绿-增长协同效应发挥.实现建筑业减污降碳“群策群力”,增强区域联动效应.

3 结论

3.1 2010~2020 年,中国建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应从 0.51 上升至 0.60,呈缓慢上升趋势,从勉强失调逐步过渡到初级协调状态.浙江和江苏建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应逐渐增大,处于中级协调状态.建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应表现出显著的空间异质性.

3.2 2010~2020 年,中国建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络呈现核心-边缘分布特征,网络密度呈上升趋势,网络关联系数由 194 上升至 199,网络对核心区域的依赖性较弱,但网络状态尚未达到最佳,仍然存在较大的提升空间.

3.3 2010~2020 年,中国建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中,河南、湖南、陕西和新疆等省份处于网络的主导地位,具有明显的“马太效应”.河北省、安徽省、江西省和河南省等.是建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络中的受益主体,表现出显著的虹吸效应.黑龙江、吉林和辽宁等省在网络中担任边缘行动者的角色.

3.4 建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应的大部分空间关联都集中在板块内部,网络“帮派”特征明显.北京、天津、河北、山东、上海、浙江、江苏和福建等东部发达区域主要为净收益板块,而新疆、云南、广西、海南、贵州、宁夏和内蒙古等中西部区域为“双向溢出”板块.湖南、陕西和湖北等省占据网络结构洞位置,在建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应建设中具有明显优势.

3.5 内生网络结构显著驱动建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络的形成.建筑业产值(GDP)占 GDP 比重表现出马太效应,在生产过程中存在着同群效应,能够强化建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联关系.建筑业产值(GDP)差距越小的区域之间越可能形成边,具有显著的同配效应.地理位置邻近性有助于促进建筑业降碳-减污-扩绿-增长协同效应空间关联网络的形成.

本研究由于指标数据的收集和获取限制,在指标体系和研究空间尺度上存在一定的局限性.未来的研究将继续完善“四位一体”框架评估指标体系,进行城市层面的研究,推动建筑业高质量可持续发展.

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] Shiha A, Dorra E M. Resilience index framework for the construction industry in developing countries. Journal of Construction [J]. Engineering and Management, 2023,149(4),04023008.

[4] Wang Z, Zhang Z, Liu J. Exploring spatial heterogeneity and factors influencing construction and demolition waste in China [J]. Environmental science and pollution research, 2022,29(35):53269-53292.

[5] Wang Z, Zhou Y, Wang T, et al. Efficiency of construction waste and carbon reduction in the construction industry: based on improved three stage SBM-DEA model in China [J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2024.

[6] Huo T F, Li X H, Cai W G, et al. The impact of urbanization on urban building carbon emissions in China: An empirical study based on provincial panel data [J]. Sustainable Cities and Society, 2020,56, 102068.

[7] 周向红,胡鹏程,成鹏飞.基于全生命周期视角的中国建筑业碳排放核算与碳达峰预测 [J]. 环境科学, 2025,46(4):2020-2034.
Zhou X H, Hu C P, Cheng P F. Carbon emission accounting and peak carbon prediction of china's construction industry from a whole life cycle perspective [J]. Environmental Science, 2025,46(4):2020-2034.

[8] Aslam M S, Huang B, Cui L. Review of construction and demolition waste management in China and USA [J]. Journal of Environmental Management, 2020,264,110445.

[9] Bao Z K, Lu W S. Applicability of the environmental Kuznets curve to construction waste management: A panel analysis of 27European

economies [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023,188, 106667.

[10] Du Q, Zhou J, Pan T, et al. Relationship of carbon emissions and economic growth in China's construction industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,220:99−109.

[11] 汪振双,胡亭谕,刘景矿,等.建筑业减污降碳动态效率研究:基于 Malmquist−Luenberger 指数模型 [J]. 工程管理学报, 2024,38(3): 30−35.
Wang Z S, Hu T Y, Liu J K, et al. Dynamic efficiency of waste and carbon reduction in construction industry:based on Malmquist−Luenberger index model [J]. Journal of Engineering Management, 2024,38(3):30−35.

[12] 赵培雅,高　煜,孙　雪.“双控”目标下产业智能化的节能降碳减排效应 [J]. 中国人口・资源与环境, 2023,33(9):59−69.
Zhao P Y, Gao Y, Sun X. Energy−saving, carbon emissions−reducing, and industrial pollution emissions− reducing effects of industrial intelligence under the‘dual control’system [J]. China Population, Resources and Environment, 2023,33(9):59−69.

[13] Wang Z S, Han F, Xia B, et al. Regional differences and heterogeneity of construction and demolition waste with economic growth: evidence from China [J]. Construction Management and Economics, 2023,41 (1):44−59.

[14] Kabirifar K, Mojtahedi M, Wang C, et al. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce,reuse,and recycle strategies for effective waste management: a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,263,121265.

[15] Wu Z, Yu A T W, Wang H, et al. Driving factors for construction waste minimization: empirical studies in Hong Kong and Shenzhen [J]. Journal of Green Building, 2019,14(4):155−167.

[16] Wang Z, Zhou Y, Zhao N, et al. Spatial correlation network and driving effect of carbon emission intensity in china’s construction industry [J]. Buildings, 2022,12,201.

[17] Wang Z S, Zhang Z S, Jin X H. A study on the spatial network characteristics and effects of CDW generation in China [J]. Waste Management, 2021,128:179−188.

[18] Wang Z, Xie W, Liu J. Regional differences and driving factors of construction and demolition waste generation in China [J]. Engineering Construction and Architectural Management, 2021,63:16−23.

[19] Wang S J, Ma Y Y. Influencing factors and regional discrepancies of the efficiency of carbon dioxide emissions in Jiangsu, China [J]. Ecological Indicators, 2018,90:460−468.

[20] Zhang M D, Li W L, Wang Z S, et al. Urbanization and production: Heterogeneous effects on construction and demolition waste [J]. Habitat International, 2023,134,102778.

[21] 林明裕,崔兴华.碳排放绩效的空间关联网络结构及其形成机制—以长江经济带为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5):2867−2878.
Lin M Y, Cui X H. The spatial correlation network structure and formation mechanism of carbon emission performance: A case study of the Yangtze River Economic Belt [J]. China Environmental Science, 2024,44(5):2867−2878.

[22] 蒯林沂,安　敏,宋孟斐,等.中国城市尺度下建筑业碳排放锁定状态及解锁路径 [J]. 环境科学, 1−14.
Kuai L Y, An M, Song M F, et al. Carbon lock−in status and unlocking pathways of urban construction industry at the city scale in China [J]. Environmental Science, 1−14.

[23] 孙永河,蒋永棋,黄子航,等.云南省建筑业 CO_2 排放峰值及达峰时间预测 [J]. 生态经济, 2024,40(6):38−44.
Sun Y H, Jiang Y Q, Huang Z H, et al. Peak and time prediction of CO_2 emission from construction industry in Yunnan province [J]. Ecological Economy, 2024,40(6):38−44.

[24] Xuan Y Guang G R. Factors influencing the coupled and coordinated development of cities in the Yangtze River Economic Belt: A focus on carbon reduction, pollution control, greening, and growth [J]. Journal of Environmental Management, 2024,370:122499.

[25] 崔新蕾,王冉冉.中国降碳-减污-扩绿-增长协同发展空间关联网络特征及影响因素研究 [J]. 环境科学研究, 2024,37(7):1446−1457.
Cui X L, Wang R R. Research on the spatial correlation network characteristics and influencing factors of coordinated development of carbon emission reduction−pollution reduction−green eexpansion−economic growth in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(7):1446−1457.

[26] Zhang S, Li Z, Ning X, et al. Gauging the impacts of urbanization on CO_2 emissions from the construction industry: Evidence from China [J]. Journal of Environmental Management, 2021,288:112440.

[27] 任晓松,梁宇琪,赵　敏,等.中国建筑业减污降碳协同效应的空间收敛性及驱动因素分析 [J]. 环境科学研究, 2025,38(4):724−735.
Ren X S, Liang Y Q, Zhao M, et al. Analysis of spatial convergence and driving factors of synergistic effects of pollution and carbon reduction in china’s construction industry [J]. Research of Environmental Sciences, 2025,38(4):724−735.

[28] Xue Y B. Carbon emission efficiency of China’s construction industry based on super−efficiency SBM and Tobit model [J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2024,24(3): 1877−1887.

[29] Niu Z H, Xie Q J. Synergistic evolution and spatial−temporal differences in green technological innovation and carbon emission reduction in the construction industry from the perspective of new productive forces [J]. Applied Sciences, 2025,15(9):4720.

[30] 王成军,魏向峰.基于超效率三阶段 SBM 模型的建筑业碳排放效率研究 [J]. 工程管理学报, 2024,38(6):19−25.
Wang C J, Wei X F. Carbon emission efficiency of the construction industry:a study based on the super−efficient three−stage SBM model [J]. Journal of Engineering Management, 2024,38(6):19−25.

[31] Nie G D, Fang Y Q, Niu M M,et al. Spatial differences, dynamic evolution and influencing factors of China's construction industry carbon emission efficiency [J]. Journal of Clener Productiont, 2024, 448:141593.

[32] Xiao Y, Huang H, Qian X M, et al. Can new−type urbanization reduce urban building carbon emissions? New evidence from China. Sustainable Cities and Society, 2023,90:104410.

[33] 张新生,聂达文,陈章政.基于 MIC 特征提取与 ICEEMD−RIME−DHKELM 的建筑业碳排放预测模型研究 [J]. 环境工程, 1−15.
Zhang X S, Nie D W, Chen Z Z. Research on the prediction model for carbon emissions in the construction industry based on mic feature extraction and iceemd−rime−dhkelm [J]. Environmental Engineering,

1−15.

[34] 张新生,聂达文,陈章政,等.西部地区建筑业碳排放时空演变特征及影响因素分析 [J]. 环境科学, 1−22.
Zhang X S, Nie D W, Chen Z Z. Spatial−temporal evolution characteristics and influencing factors of carbon emissions from construction industry in western China [J]. Environmental Science, 2025:1−22.

[35] 徐水太,李晞薇,董 信.中国建筑业碳排放强度的空间特征与影响因素分析 [J]. 科技导报, 2024,42(6):103−111.
Xu S T, Li X W, Dong X. Spatial characteristics and influencing factors of carbon emission intensity of construction industry in China [J]. Science & Technology Review, 2024,42(6):103−111.

[36] 段 冶,韩 楠,孙才志,等.减污降碳协同效应空间关联关系及驱动因素研究 [J]. 环境科学研究, 2024,37(11):2413−2422.
Duan Z, Han N, Sun C Z, el al. Investigation into spatial correlation and driving factors of synergistic effect of pollution reduction and carbon emission mitigation [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(11):2413−2422.

[37] 方传棣,成金华,赵鹏大.大保护战略下长江经济带矿产－经济－环境耦合协调度时空演化研究 [J]. 中国人口・资源与环境, 2019,29(6):65−73.
Fang C L, Chen J H, Zhao P D. Temporal and spatial evolution of Mineral−Economic−Environment coordination degree in the Yangtze River Economic Belt under the Great Protection Strategy [J]. China population, resources and environment, 2019,29(6):65−73.

[38] 赵 林,曹乃刚,韩增林,等.中国生态福利绩效空间关联网络演变特征与形成机制 [J]. 自然资源学报, 2022,37(12):3183−3200.
Zhao L, Cao N G, Han Z L, et al. Evolution characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of ecological well−being performance in China [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(12):3183−3200.

[39] Bai Y Q. Social network analysis based on collaborative innovation performance impact factors of assembled construction industrial park [J]. Academic Journal of Business & Management, 2022,4(19):138−146.

[40] 孙中瑞,樊 杰,孙 勇,等.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 [J]. 经济地理, 2022,42(3):33−43.
Sun Z R, Fan J, Sun Y, et al. Structural characteristics and influencing factors of spatial correlation network of green science and technology innovation efficiency in china [J]. Economic Geography, 2022,42(3):33−43.

[41] 孙艳伟,王 润,郭青海,等.基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析 [J]. 环境科学, 2021,42(1):501−512.
Sun Y W, Wang R, Guo Q H, et al. Estimation of the urban heat island intensity change and its relationships with driving factors across China based on the human settlement scale [J]. Environmental Science, 2021,42(1):501−512.

[42] Xiong J, Feng X D, Tang Z W. Understanding user−to−user interaction on government microblogs: An exponential random graph model with the homophily and emotional effect [J]. Information Processing & Management, 2020,57:102229.

[43] Hunter D R, Handcock M S, Butts C T, et al. ERGM:A package to fit simulate and diagnose exponential−family models for networks [J]. Journal of Statistical Software, 2008,24(3):1−29.

[44] 胡茂峰,郑义彬,李宇涵.多情景下湖北省交通运输碳排放峰值预测研究 [J]. 环境科学学报, 2022,42(4):464−472.
Hu M F, Zhen Y B, Li Y H. Forecasting of transport carbon emission peak in Hubei Province under multiple scenarios [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(4):464−472.

[45] 王晓平,冯 庆,宋金昭.成渝城市群碳排放空间关联结构演化及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2020,40(9):4123−4134.
Wang X P, Feng Q, Song J Z. The spatial association structure evolution of carbon emissions in Chengdu−Chongqing urban agglomeration and its influence mechanism [J]. China Environmental Science, 2020,40(9):4123−4134.

[46] 杨 青,郭 露,刘星星,等.中国省域交通碳排放空间关联格局的驱动特征 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):1171−1184.
Yang Q, Guo L, Liu X X, et al. Driving characteristics of the spatial correlation pattern of carbon emissions from provincial transportation in China [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):1171−1184.

[47] 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 [J]. 中国环境科学, 2023,43(11):5900−5912.
Gao Y X, Gao M. Spatial correlation network and influencing factors of municipal solid waste carbon emission efficiency [J]. China Environmental Science, 2023,43(11):5900−5912.

[48] 刘华军,田 震,石 印.中国二氧化碳排放的空间差异及其双维内在结构解析:2000~2019 年 [J]. 地理研究, 2023,42(3):857−877.
Liu H J, Tian Z, Shi Y. Spatial difference of carbon dioxide emissions and its bi−dimensional internal structural decomposition and analysis from 2000 to 2019 in China [J]. Geographical Research, 2023,42(3):857−877.

[49] 程开明,吴西梦,庄燕杰.我国省域新经济新动能:统计测度、空间格局与关联网络 [J]. 统计研究, 2023,40(3):18−31.
Cheng K M, Wu X M, Zhuang Y J. China's provincial new economy and new impetus: statistical measurement, spatial pattern and association network [J]. Statistical Research, 2023,40(3):18−31.

[50] 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/OL]. 系统工程理论与实践:1−35[2023−03−29].
Shao S, Xu L L, Yang L L. Structural characteristics and formation mechanism of carbon emission spatial association networks within China [J/OL]. Systems Engineering−Theory & Practicee, 2023,43(4):958−983.

[51] Bodin Ö, Robins G, McAllister R R J, et al. Theorizing benefits and constraints in collaborative environmental governance: a transdisciplinary social−ecological network approach for empirical investigations [J]. Ecology and Society, 2016,21(1).

[52] 戴 靓,刘承良,王 嵩,等.长三角城市科研合作的邻近性与自组织性 [J]. 地理研究, 2022,41(9):2499−2515.
Dai L, Liu C L, Wang S, et al. Proximity and self−organizing mechanisms underlying scientific collaboration of cities in the Yangtze River Delta [J]. Geographical Research, 2022,41(9):2499−2515.

[53] 杨 青,郭 露,刘星星,等.中国省域交通碳排放空间关联格局的驱动特征 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):1171−1184.
Yang Q, Guo L, Liu X X, et al. Driving characteristics of the spatial correlation pattern of carbon emissions from provincial transportation

in China [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):1171-1184.

[54] 盛科荣,张红霞,赵超越.中国城市网络关联格局的影响因素分析—基于电子信息企业网络的视角 [J]. 地理研究, 2019,38(5):1030-1044.
Sheng K R, Zhang H X, Zhao C Y. Determinants of the urban spatial network in China:Ananalysis through the lens of corporate networks within electronic information industry [J]. Geographical Research, 2019,38(5):1030-1044.

[55] 高煜昕,高　明.中国“无废城市”发展水平的空间关联结构与影响机制 [J]. 中国环境科学, 2024,45(8):4980-4992.
Gao Y X, Gao M. Spatial correlation structure and influencing mechanism of development level of zero waste cities in China [J]. Environmental Science, 2024,45(8):4980-4992.

[56] Liu Q Q, Wang S J, Li B, et al. Dynamics, differences, influencing factors of eco-efficiency in China: a spatiotemporal perspective analysis [J]. Journal of Environmental Management, 2020,264.

[57] 孙　涵,苑子羲,吴军锦.建筑业碳排放效率的空间溢出效应研究 [J]. 工程管理学报, 2023,(1):41-46.
Sun H, Yuan Z Y, Wu J J. Research on the spatial spillover effect of the carbon emission efficiency of the construction industry [J]. Journal of Engineering Management, 2023,(1):41-46.

[58] 张晨怡,董会娟,耿　涌.中国城市生活垃圾处理碳排放时空分布特征及减排潜力 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024,34(4):23-35.
Zhang C Y, Dong H J, Geng Y. Spatio-temporal distribution characteristics and reduction potentials of China's MSW-related GHG emissions [J]. China population, resources and environment, 2024,34(4):23-35.

[59] 孙中瑞,樊　杰,孙　勇,等.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 [J]. 经济地理, 2022,42(3):33-43.
Sun Z R, Fan J, Sun Y, et al. Structural characteristics and influencing factors of spatial correlation network of green science and technology innovation efficiency in China [J]. Economic Geography, 2022, 42(3):33-43.

[60] Fan X H, Yu B, Chu Z J, et al. A stochastic frontier analysis of the efficiency of municipal solid waste collection services in China [J]. Science of the Total Environment, 2020,743:140707.

[61] Zhao W, Huppes G, Vander V E. Eco-efficiency for greenhouse gas emissions mitigation of municipal solid waste management: A case study of Tianjin, China [J]. Waste Management, 2011,31(6):1407-1415.

[62] Lu Y J, Cui P, Li D Z. Carbon emissions and policies in China's building and construction industry: evidence from 1994 to 2012 [J]. Building and Environment, 2016,95:94-103.

[63] Liu S N, Xiao Q T. An empirical analysis on spatial correlation investigation of industrial carbon emissions using SNA-ICE model [J]. Energy, 2021,224:120183.

[64] 邵海琴,王兆峰.中国交通碳排放效率的空间关联网络结构及其影响因素 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021,31(4):32-41.
Shao H Q, Wang S F. Spatial network structure of transportation carbon emissions efficiency in China and its influencing factors [J]. China population, resources and environment, 2021,31(4):32-41.

[65] 唐晓彬,崔茂生.“一带一路”货物贸易网络结构动态变化及其影响机制 [J]. 财经研究, 2020,46(7):138-153.
Tang X B, Cui M S. Research on the dynamic change of goods trade network structure and its impact mechanism of countries along the belt and road [J]. Journal of Finance and Economics, 2020,46(7): 138-153.

[66] 孙亚男,王艺霖.我国数字经济的空间关联网络研究 [J]. 统计研究, 2024,41(6):44-56.
Sun Y N, Wang Y L. Research on the spatial correlation network of digital economy in China [J]. Statistical Research, 2024,41(6):44.

作者简介：汪振双(1982-),男,辽宁鞍山人,副教授,博士,主要研究方向为可持续发展.发表论文 100 余篇.zswang@dufe.edu.cn.