李 龙,万美琪,殷宪飞,等.中国建筑业低碳创新网络耦合演化及对碳减排的影响研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):474-483.
Li L, Wan M Q, Yin X F, et al. Coupling evolution of low-carbon innovation networks and its impact on carbon emission reduction in China's construction industry [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):474-483.

中国建筑业低碳创新网络耦合演化及对碳减排的影响研究

李 龙[1],万美琪[1*],殷宪飞[2],袁梦琪[3] (1.青岛理工大学管理工程学院,山东 青岛 266525；2.香港城市大学建筑学与土木工程学系,香港 999077；3.中国石油大学(华东)经济管理学院,山东 青岛 266580)

摘要：基于2003~2022年中国建筑业低碳技术专利与碳排放数据,运用社会网络分析方法构建创新主体协同网络与知识融合网络,并基于两者拓扑结构设计耦合协调度模型,进一步采用自回归分布滞后模型(ARDL)与广义脉冲响应函数(GIRF),实证检验双网络耦合协调发展对建筑业碳排放强度的影响机制.研究发现:①主体协同网络与知识融合网络持续优化,双网络耦合协调水平由0.4043增长至0.9591,呈现从失调向高度协调的演化趋势;②样本期内,耦合协调发展指数滞后1期对碳排放强度具有显著负向影响,体现其对碳减排的滞后促进作用;③耦合协调发展指数为碳排放强度的单向Granger原因,其负向冲击在滞后第 2 期达到峰值-1.865,随后趋于平稳,阶段性调节效应显著.依托结构测度与动态分析相结合的框架,研究结果为系统性低碳创新政策提供了量化工具与实证支撑.

关键词：建筑业；低碳创新；社会网络分析；耦合协调；碳排放强度
中图分类号：X196;F426.9;C931.5 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0474-10

Coupling evolution of low-carbon innovation networks and its impact on carbon emission reduction in China's construction industry. LI Long[1], WAN Mei-qi[1*], YIN Xian-fei[2], YUAN Meng-qi[3] (1.School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China；2.Department of Architecture and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China；3.School of Economics and Management, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：474~483

Abstract：Based on China's construction industry low-carbon technology patents and carbon emission data from 2003 to 2022, the subject collaboration networks and knowledge fusion networks were constructed using social network analysis, and a coupling coordination degree model was designed based on their topological structures. Further, an autoregressive distributed lag (ARDL) model and generalized impulse response function (GIRF) were applied to empirically examine the impact mechanism of the coordinated development of dual-network coupling on the construction industry's carbon emission intensity. The results indicated that: ① The subject collaboration networks and knowledge fusion networks continued to optimize, with the coupling coordination level increasing from 0.4043 to 0.9591, showing an evolution from disorder to high coordination; ② During the sample period, the coupling coordination development index lagged by one period was found to exert a significant negative impact on carbon emission intensity, reflecting its delayed promoting effect on emission reduction; ③ The coupling coordination development index was identified as a one-way Granger cause of carbon emission intensity. Its negative shock peaked at −1.865 in the second lag and then gradually stabilized, demonstrating a significant stage-based adjustment effect. Relying on a framework integrating structural measurement and dynamic analysis, the results provided quantitative tools and empirical support for systematic low-carbon innovation policies.

Key words: construction industry; low-carbon innovation; social network analysis; coupling coordination; carbon emission intensity

随着中国"双碳"战略的持续深化,建筑业作为典型的高碳排放行业,其低碳技术创新正迎来关键窗口期[1].近年来,尽管超低能耗建筑、低碳建材等低碳技术不断推广,但行业低碳转型仍面临政策激励不足、技术扩散低效及协同治理机制不完善等挑战,整体减排效果不理想[2-3].不同于一般行业创新,建筑业低碳技术创新是基于"目标锁定"的创新活动,高度依赖于企业、高校与科研机构等多元主体之间面向项目需求的协同[4].随着创新主体持续交互,低碳创新行动逐步嵌入多层级、跨领域的主体协同网络中[5],信息共享、技术交换、知识转移和资源整合等关键过程呈现出高度网络化特征[6];同时,数字化转

收稿日期：2025-06-18
基金项目：教育部人文社会科学研究项目(24YJC630105);国家自然科学基金项目(72304278;72404233);山东省自然科学基金项目(ZR2023QG100);山东省青创团队项目(2022RW036)
* 责任作者, 硕士研究生, wmq21772023@163.com

型加速了技术融合进程,知识要素在创新主体之间高频流动,形成跨界交融、动态演化的知识融合网络[7].进一步地,创新主体协同网络与知识融合网络相互嵌套、协同演化,为建筑业碳减排提供了重要动力.为此,探索建筑业低碳创新网络结构及其耦合演化对碳减排的影响对其推进低碳发展具有重要的理论与实践意义.

现有研究通过情景异质性[8]、激励政策路径[9]及技术扩散机制[10]分析揭示了建筑业低碳技术创新的碳减排机理;并借助系统建模和机器学习方法,通过综合影响评估[11]、关键要素贡献分析[12]与碳减排潜力预测[13]量化其减排成效.随着网络分析视角的引入,部分学者从创新主体协同与知识融合两个维度探索了低碳创新系统的作用机制.其中,创新主体研究重点关注协同网络的结构特征[14-15]、演化过程[16]及减排作用机制[17]等;创新知识层面研究则着重分析知识融合网络的关联方式[18]、传播模式[19-20]和技术预测[21]等.进一步的研究表明,创新主体协同与知识融合的动态交互对推动行业碳减排具有重要作用.提升创新主体的组织效率与协作能力可以缩短知识传递路径,推动领域知识在异质性主体间高效重构与共享[22],从而加速低碳技术的研发进程[23];同时,知识在创新主体之间的复用、延伸与整合降低了信息不对称,提高技术供需的匹配效率,增强创新主体的合作意愿[24-25],进而提升低碳技术的创新活力[26].这种动态交互形成了协同演化的耦合机制,使知识的生成、转化与应用在跨主体间高效流动,充分激发了科技创新的低碳发展潜力[27].

鉴于此,已有研究充分探索了创新主体协同和知识融合间的动态交互关系,但尚未进一步从网络耦合视角出发深入解析两类网络的耦合作用机制,缺乏对“主体协同—知识融合”双网络耦合演化机制及其减排效应的系统解析与实证评估.因此,本文从网络系统耦合视角出发,基于 2003~2022 年建筑业低碳技术专利数据,运用社会网络分析构建创新主体协同网络与知识融合网络,识别创新合作结构与知识关联模式,并通过耦合协调度模型衡量其匹配水平;结合 ARDL 模型与 GIRF 方法,系统评估双网络耦合演化对碳排放强度的动态影响路径.研究成果丰富了建筑业低碳创新机制研究的理论知识体系,为碳减排的系统性治理提供理论依据、方法工具和实施策略.

1　材料与方法

1.1　专利识别与数据库构建

专利数据是衡量技术创新水平的重要客观指标,在反映技术创新活动的数量、方向与强度方面具有广泛应用[17].国家知识产权局(CNIPA)作为中国的官方专利信息平台,提供的数据具备权威性和完整性,详细记录了专利的标题、摘要、申请日期、申请人及 IPC 分类号等信息.由于低碳技术覆盖多个学科领域,术语多样、语义差异大,关键词检索易出现遗漏,故本文采用 IPC 分类号进行专利识别.依据世界知识产权组织发布的《国际专利分类表(2022 版)》和 CNIPA 制定的《绿色低碳技术专利分类体系》,共检索获得 2003 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日期间中国建筑业 53580 条低碳技术专利申请数据,作为网络构建的基础数据库.

1.2　社会网络分析

表 1　网络结构指标

Table 1　Network structure metrics

指标	计算公式	解释	性质
节点连接强度	$\bar{s}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}s_i=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j\in\Gamma(i)}\omega_{ij}$ (1)	s_i 为节点 i 的加权度,即所有边的权重总和;ω_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间边的权重;$\Gamma(i)$为与节点 i 相连的邻居节点集合;N 为网络总节点数.值越大,说明网络中节点之间的合作或知识互动越频繁,表示更强的协同关系或融合程度[28].	正向
跨域连接密度	$P_{\text{cross}}=\frac{E_{\text{cross}}}{E}$ (2)	E_{cross} 为连接两个不同领域的边数;E 为网络中的总边数.跨域指跨主体类型和跨 IPC 代表部,密度越大,说明跨领域协同或知识融合越充分.	正向
主连通子图覆盖率	$C_{\text{LCC}}=\frac{N_{\text{LCC}}}{N}$ (3)	N_{LCC} 为最大连通子图的节点数.覆盖率越高,表示网络中更多节点形成紧密连接的核心结构,增强协同或融合效率[29].	正向
网络度分布熵	$H=-\sum_{(i,j)\in E:\omega_{ij}>0}p_{ij}\log_2 p_{ij}$ (4)	p_{ij} 为边(i,j)的权重所占比例,即 $p_{ij}=\frac{\omega_{ij}}{W_{\text{total}}}$;$W_{\text{total}}$ 为网络中所有边权之和.熵值越高,度分布越均衡、结构越复杂,说明网络结构多样性强,有利于稳定性和传播效率[30].	正向
网络边缘化程度	$P_p=\frac{N_p}{N}$ (5)	N_p 为度数(即连接)仅为 1 的节点数.边缘节点比例高说明大量节点处于网络边缘,参与度低,协同或融合弱,降低整体功能[31].	负向

社会网络分析是一种用于研究社会关系结构及其动态演化的系统方法,关注个体(节点)及其关系(边)的构成和模式,通过图论与统计学工具揭示网络中的结构特征及传播路径[16].鉴于建筑业低碳创新的协作性与跨知识领域特征,本文引入社会网络分析方法,构建两个维度的低碳创新网络.一是主体协同网络,以企业、高校、科研机构等低碳技术专利申请主体作为节点,以共同参与同一专利的合作关系作为边,反映不同创新主体之间的协同创新关系;二是知识融合网络,以 IPC 分类号表示的知识单元作为节点,以同一专利中多个分类号之间的共现关系作为边,揭示低碳技术中不同知识领域之间的关联融合.通过上述双网络的构建,本文实现了对建筑业低碳技术创新复杂社会过程的结构化表达与量化测度.社会网络分析可提供定量指标以刻画网络特征,考虑传统指标中心性、连通性与异质性基础上,结合研究对象在跨组织与跨知识领域协作过程中的特点,选取了五个网络层级指标,具体计算公式与解释见表 1.

1.3 耦合协调度模型

耦合协调度模型源自物理系统中的“耦合”概念,用于刻画两个或多个子系统之间的关联强度及发展一致性,强调子系统间的动态互动与协同状态,具有较强的系统综合评价能力[32].在建筑业低碳创新网络中,主体协同网络与知识融合网络分别反映创新活动中不同主体间的合作机制与知识要素间的集成模式.专利是主体协同推动知识传播、知识融合促进主体互动的技术创新产物,基于其所承载的协作与融合关系,构建起一个结构上互为依托、功能上相互作用的主体协同—知识融合双网络耦合系统.为度量其协同演化水平,本文以主体协同指数(CSI)与知识融合指数(KFI)为两个子系统,构建双网络耦合协调度模型,并基于熵值法确定 CSI 与 KFI 中各指标的权重,两个子系统的表达式如下:

$$U_j = \sum_{i=1}^{n} \omega_{ij} \cdot x_{ij} \tag{6}$$

式中:U_j=U_1,U_2 为子系统 CSI 和 KFI 的综合评价值;ω_{ij} 为第 j 个子系统中第 i 个指标的权重;x_{ij} 为该指标的标准化值,n 为子系统中指标的数量,即 n=5.

耦合协调度模型表达式如下:

$$C = 2\left[\frac{U_1 U_2}{(U_1+U_2)^2}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \tag{8}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{9}$$

式中:C 为耦合度;T 为综合协调指数;D 为耦合协调度;α与β分别表示 CSI 与 KFI 对耦合协调度的影响系数,本文赋予两者相同权重,即α=β=0.5.参考相关研究的划分标准[2],耦合协调度 D 被划分为:0~0.1 为极度失调,0.1~0.3 为中度失调,0.3~0.5 为轻度失调,0.5~0.6 为基本协调,0.6~0.8 为中度协调,0.8~1.0 为高度协调.

1.4 减排效应回归模型

1.4.1 碳排放强度测算 碳排放强度(CEI)是衡量建筑业碳排放绩效的核心指标,通常定义为单位经济产出所对应的碳排放量,能够综合反映能源利用效率、排放控制能力与产业结构特征[33].在测算方法上,建筑业 CEI 为年度碳排放总量与同期建筑业总产值之比,其中碳排放总量包括直接碳排放与间接碳排放.参考邵志国等[34],直接碳排放统计范围包括原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气八类能源,消耗量数据来源于《中国能源统计年鉴》;间接碳排放涉及水泥、钢材、玻璃、木材、铝材五类建筑材料,消耗量数据来自《中国建筑业统计年鉴》;碳排放系数引自《建筑碳排放计算标准》;建筑业总产值数据来源于《中国统计年鉴》;部分缺失数据采用插值法补齐.

按照《IPCC 国家温室气体排放清单(2006)》碳排放核算原则,建筑业碳排放量计算公式为:

$$\mathrm{CEB} = \mathrm{CEB_D} + \mathrm{CEB_M} = \frac{44}{12}\sum_{j=1}^{8} E_j \times \alpha_j \times f_j \times O_j + \sum_{k=1}^{5} M_k \times \beta_k \times (1-\varepsilon_k) \tag{10}$$

式中:CEB 为建筑业碳排放总量,tCO_2;CEB_D 为建筑业直接碳排放,tCO_2;CEB_M 为建筑业间接碳排放,tCO_2;E_j 为第 j 类能源消耗量,kg;a_j 为平均低位发热量,TJ/kg;f_j 为单位热值含碳量,tC/TJ;O_j 为能源的碳氧化率,%;M_k 为第 k 类建材消耗量,t;β_k 为碳排放系数,tCO_2/t;ε_k 为回收系数.

建筑业碳排放强度计算公式为:

$$\mathrm{CEI} = \frac{\mathrm{CEB}}{\mathrm{GDP}} \tag{11}$$

式中:CEI 为建筑业碳排放强度,tCO_2/万元;CEB 为建筑业碳排放总量,tCO_2;GDP 为建筑业生产总值,万元.

1.4.2　ARDL 模型构建　为探究建筑业主体协同—知识融合双网络耦合协调发展对碳排放强度的影响机制,本文构建 ARDL 模型,以分析二者在短期与长期内的动态关系[35].结合已有关于小样本建模的研究经验[36-37],并综合考虑样本容量限制与参数估计的稳健性,本文选取 3 个变量构建模型,以提升模型的可解释性与可靠性.其中,建筑业碳排放强度(CEI)为被解释变量,耦合协调度 D 即主体协同—知识融合双网络耦合协调发展指数(CDI)为核心解释变量.鉴于建筑业对高碳能源的高度依赖,其能源结构变动被证实对碳排放强度具有显著影响[38-39].为控制能源结构变化可能带来的干扰效应,本文将其作为控制变量引入模型,并选取煤炭消费占比(CES)作为其代理变量,以衡量建筑业对化石能源的依赖程度[40].

最终 ARDL 模型表达式如下:

$$\Delta \mathrm{CEI}_t = \alpha + \sum_{i=1}^{p} \phi_i \Delta \mathrm{CEI}_{t-i} + \sum_{j=0}^{q} \theta_j \Delta \mathrm{CDI}_{t-j} + \sum_{k=0}^{r} \gamma_k \Delta \mathrm{CES}_{t-k} + \lambda_1 \mathrm{CEI}_{t-1} + \lambda_2 \mathrm{CDI}_{t-1} + \lambda_3 \mathrm{CES}_{t-1} + \varepsilon_t \tag{12}$$

式中:Δ为一阶差分;α为常数项;t 为时间;p,q,r 为滞后阶数,根据 AIC 或 BIC 信息准则等确定;ϕ_i,θ_j,γ_k 分别为短期动态调整系数;$\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3$ 分别为长期均衡系数;ε_t 为随机误差项.核心被解释变量、核心解释变量与控制变量的描述性统计结果如表 2 所示.研究普遍指出,建筑业碳排放强度与煤炭消费占比自 21 世纪初以来整体呈稳步下降趋势[41-43],与本文所得结果在变化趋势上一致.

表 2　主要变量的描述性统计

Table 2　Descriptive statistics of the main variables

变量	均值	标准差	极大值	极小值
CEI	0.4530	0.3094	1.1579	0.1435
CDI	0.6176	0.1744	0.9591	0.3095
CES	0.1200	0.0441	0.1903	0.0441

2　结果与分析

2.1　创新网络结构特征

基于 2003~2022 年我国建筑业低碳技术相关专利数据,图 1 展示了专利申请数量、申请主体数量以及知识种类(以 IPC 大组号计)的年度变化趋势. IPC 分类号由部、大类、小类、大组和小组五级构成,参考 Jin 等[44]的研究,为有效区分知识类别并避免过度碎片化,本文将 IPC 分类细化至大组层级,作为构建知识融合网络的基础.整体来看,三项基础统计量均呈显著上升趋势,反映出建筑业低碳技术创新的持续推进与技术路线的不断扩展.专利申请数量自 2003 年起持续增长,近年来达到高峰,体现出研发活动的日益活跃;申请主体数量同步上升,表明行业参与范围不断扩大,协同创新水平提升;IPC 大组数量的增长则显示出技术覆盖领域不断拓宽,知识融合程度增强.

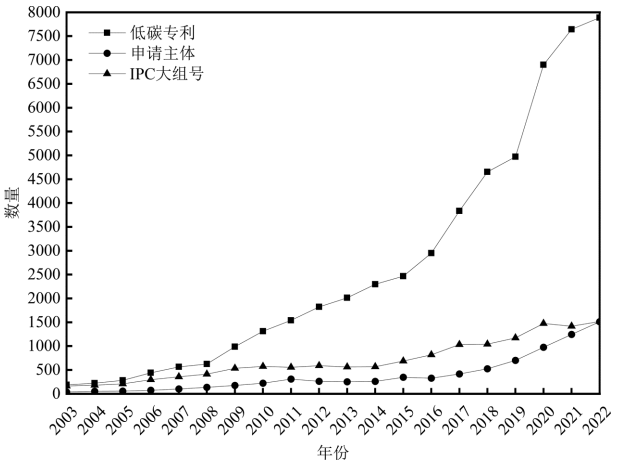


图 1　低碳专利、申请主体及 IPC 大组号数量趋势

Fig.1　Trends in the number of low-carbon patents, applicants and IPC main group numbers

进一步统计结果显示,22704 个不重复申请人可分为五类:企业占比最高(67.081%),其次为个人(26.092%)、高校(3.898%)、科研机构(2.039%)以及政府或事业单位(0.890%).在知识分类方面,共识别出 2977 个不重复的 IPC 大组分类号,涵盖 ABCDEFGH 8 个一级部类,其中 E 类(固定建筑物)所占比例最高(62.825%),其次为 F 类(8.799%)、B 类(8.033%)、C 类(7.180%)、G 类(6.165%)、H 类(5.649%)、A 类(1.271%)与 D 类(0.078%).年度申请主体数量与 IPC 大组数量分别作为构建主体协同网络与知识融合网络的节点基础,边则基于专利中的合作关系与 IPC 大组共现关系构建.具体网络指标计算结果见表 3,X_i 和 Y_i 分别表示两类网络在第 i 个指标下的测度结果,指标顺序对应表 1 所列.两类网络在整体结构特征上呈

现出积极的演进趋势,同时局部阶段的波动反映了网络内部节点和连接的异质性与多样性,这两方面共同体现了建筑业低碳技术创新中主体协作与知识融合过程的动态适应性发展态势.

表 3 网络结构特征结果

Table 3 Results of network structure characteristics

年份	主体协同网络					知识融合网络				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
2003	2.3780	0.2727	0.1081	5.3685	0.8378	14.0120	0.5621	0.4233	9.4351	0.1349
2004	2.5880	0.1515	0.0588	5.7414	0.8039	14.3460	0.4624	0.7765	8.9643	0.0837
2005	3.2140	0.1111	0.0893	6.3585	0.5890	18.1540	0.5240	0.7115	9.4136	0.1009
2006	3.4520	0.1270	0.0685	6.6041	0.6027	20.6850	0.4818	0.9797	9.9979	0.0779
2007	4.4000	0.3068	0.0800	7.4654	0.5200	22.9490	0.4954	0.9522	10.2543	0.0618
2008	3.7010	0.3710	0.0448	7.3226	0.5500	27.7960	0.4917	1.0000	10.8813	0.0632
2009	3.7010	0.2628	0.0460	7.9218	0.5459	42.0520	0.5470	0.9925	11.2269	0.0674
2010	5.5200	0.4371	0.1086	8.1433	0.5158	39.2930	0.4201	0.9913	11.4002	0.0644
2011	4.8470	0.3244	0.0554	9.1110	0.4430	44.9860	0.3644	0.9946	10.9692	0.0722
2012	4.9960	0.4308	0.1073	8.3382	0.5287	38.1320	0.4143	0.9966	11.0032	0.0950
2013	5.4240	0.4779	0.1000	8.3419	0.4200	39.6260	0.3815	0.9911	10.8608	0.1014
2014	6.7030	0.4747	0.1467	8.2349	0.4363	45.9510	0.3912	0.9947	10.7989	0.1128
2015	5.9940	0.4313	0.1507	8.6712	0.5101	56.5920	0.4344	1.0000	11.7237	0.0656
2016	6.3930	0.4376	0.0706	8.5252	0.4877	91.0990	0.4015	0.9878	11.9009	0.0453
2017	7.1500	0.4824	0.1787	8.9005	0.4613	101.2710	0.4512	1.0000	12.5430	0.0281
2018	6.6720	0.4497	0.1279	9.4892	0.4675	101.6430	0.4259	1.0000	12.4686	0.0326
2019	7.1130	0.4312	0.1502	9.9790	0.4363	112.5530	0.4076	1.0000	12.5923	0.0188
2020	8.2320	0.4943	0.3665	10.1821	0.4209	177.0310	0.4394	1.0000	13.1351	0.0081
2021	9.3220	0.4771	0.4791	10.8780	0.3770	183.5070	0.3975	1.0000	12.7902	0.0169
2022	8.7760	0.5053	0.4828	11.0530	0.3993	204.6500	0.4299	1.0000	13.2869	0.0099

2.2 耦合发展演化趋势

表 4 主体协同与知识融合的系统指数与耦合协调度

Table 4 System indices and coupling coordination degrees of subject collaboration and knowledge fusion

年份	主体协同指数	知识融合指数	耦合协调度	耦合协调层级
2003	0.1211	0.2206	0.4043	轻度失调
2004	0.0487	0.1884	0.3095	
2005	0.1380	0.2533	0.4324	
2006	0.1304	0.2867	0.4397	
2007	0.2617	0.3290	0.5417	基本协调
2008	0.2175	0.3628	0.5300	
2009	0.1981	0.4612	0.5498	
2010	0.3814	0.3332	0.5971	
2011	0.3050	0.2662	0.5338	
2012	0.3662	0.2795	0.5656	
2013	0.4048	0.2371	0.5566	
2014	0.4825	0.2487	0.5886	
2015	0.4507	0.4005	0.6518	中度协调
2016	0.3777	0.4747	0.6507	
2017	0.5424	0.5921	0.7528	
2018	0.4768	0.5597	0.7187	
2019	0.5235	0.5854	0.7440	
2020	0.8142	0.8024	0.8990	高度协调
2021	0.9827	0.7532	0.9275	
2022	0.9815	0.8621	0.9591	

表 4 展示了 2003~2022 年我国建筑业低碳创新过程中主体协同—知识融合双网络耦合协调发展情况,总体来看,耦合协调度呈现出波动上升趋势,表明两个子系统间的协同关系不断强化.2003~2006 年为轻度失调阶段,系统互动薄弱、不稳定;2007~2014 年进入基本协调阶段,耦合度总体提升,协同水平逐步增强;2015~2019 年达到中度协调,耦合效应明显,发展态势趋于良好;2020~2022 年步入高度协调阶段,系统耦合水平显著提升,呈现较为稳定的良性互动格局.该演进过程反映出双创新网络间协同融合程度的持续提升,为建筑业低碳转型提供了耦合支撑.

2.3 减排效应实证检验

2.3.1 单位根检验 为确保 ARDL 模型设定合理,需首先检验各变量的平稳性.ARDL 模型要求变量应为 I(0)或 I(1)序列,且不得存在 I(2)序列.采用适用于小样本的 DF-GLS 和 NP 方法对各变量平稳性进行检验[45],如表 5 所示.结果显示,CEI 为原始序列平稳,CDI 和 CES 在原始序列下存在单位根,在一阶差分后转为平稳,表明各变量为 I(0)或 I(1)序列,符合模型设定要求.

表 5　各变量单位根检验结果

Table 5　Results of unit roots tests

变量	水平值			一阶差分		
	DF-GLS	MZa	MZt	DF-GLS	MZa	MZt
CEI	−3.268**	−85.224***	−6.497***	−1.675*	−11.897**	−2.386**
CDI	−2.687	−7.563	−1.837	−5.456***	−7.428*	−1.918*
CES	−3.141*	−8.780	−2.057	−6.404***	−7.328*	−1.884*

注:***、**和*,分别表示1%、5%和10%的显著性水平.

2.3.2　边限协整检验　在确认变量阶数后,进一步采用 ARDL 框架下的边限协整检验识别长期协整关系.该方法适用于I(0)或I(1)混合序列,具备较强的小样本适应性[46].边限协整检验结果见表 6,*F* 统计量为 8.906,超过 5%显著性水平的上界临界值,表明在样本期内,95%置信水平下,CEI、CDI 和 CES 之间存在稳定的长期协整关系.

表 6　边限协整检验结果

Table 6　Results of bounds test for cointegration

统计值		临界值和近似 *P* 值							
		10%		5%		1%		*P* 值	
		I (0)	I (1)	I (0)	I (1)	I (0)	I (1)	I (0)	I (1)
F 值	8.906**	3.790	5.100	4.962	6.559	8.277	10.636	0.008	0.019
t 值	−4.081**	−2.610	−3.285	−3.052	−3.793	−4.040	−4.931	0.009	0.033

注:***、**和*,分别表示1%、5%和10%的显著性水平.

2.3.3　长短期影响系数估计及解释　在确认变量间存在长期协整关系的基础上,进一步对 ARDL 模型进行长短期系数估计.鉴于样本时间序列长度的限制,参考相关研究经验[47],将模型最大滞后阶数设定为 2,具体滞后阶数依据 SBC 信息准则确定.模型选择结果表明,ARDL(1,1,0)模型最优,其中 1、1、0 分别对应 CEI、CDI 及 CES 的滞后阶数,相关估计结果详见表 7.长期估计显示,CDI 与 CEI 呈负相关关系,系数为−2.1858,这一结果在样本期内临近 10%的显著性水平,表明 CDI 的提升在长期内可能在一定程度上有助于抑制碳排放强度.CES 长期系数为−8.2386 亦呈负向关系,但在样本期内未达到统计显著性,可能是由于能源结构调整的复杂性.短期动态方面,误差修正项 ECM(−1)的系数为−0.1304,且在1%显著性水平下高度显著,表明在 CEI、CDI 与 CES 共同构成的均衡系统中,CEI 能够有效响应短期扰动,并在下一期修正约 13.04%的偏离,逐步回归长期均衡状态.这表明建筑业碳排放强度具有良好的自我调节能力和动态稳定性,有助于维持长期低碳发展的路径稳定性.CDI 的当期差分项虽未显著,但其滞后一阶水平项系数为−0.2851,且在样本期内达到10%显著水平,表明 CDI 每增加 1 单位,下一期的 CEI 将减少约 0.2851 单位,反映出 CDI 对碳减排存在显著滞后效应.专利数据反映的是创新活动的前端,主体协同—知识融合双网络耦合协调的提升体现为制度完善、信息流动与资源整合等系统性优化过程.该过程通常需要经过一定的技术转化与产业应用周期,才能在实践中体现减排成效,从而凸显推动建筑业系统性低碳创新的长期价值.控制变量 CES 以其滞后项和差分项构成的复合形式进入短期动态方程,系数为−1.0747,且在统计上接近显著水平,反映了能源结构对碳减排的综合短期动态影响.

表 7　估计的自回归分布滞后模型的长短期系数

Table 7　Estimated long-run and short-run coefficients of the autoregressive distributed lag model

回归变量		系数	标准差	*t* 统计量
长期系数估计	CDI	−2.1858	1.4826	−1.4743 [0.1625]
	CES	−8.2386	6.8201	−1.2079 [0.2471]
短期系数估计	ΔCDI	−0.0764	0.1198	−0.6381 [0.5337]
	CES^Z	−1.0747	0.6899	−1.5577 [0.1416]
	CDI (−1)	−0.2851*	0.1543	−1.8472 [0.0859]
	ECM (−1)	−0.1304***	0.0420	−3.0993 [0.0078]

注:***、**和*,分别表示1%、5%和10%的显著性水平;*Z*表示该变量被解释为$Z=Z(-1)+D(Z)$.

2.3.4　稳定性检验　为检验模型在样本期内的参数稳定性,进一步采用递归残差累积和(CUSUM)检验与递归残差平方累积和(CUSUMSQ)检验.前者用于识别回归系数的系统性变动,后者关注其方差的突变情况.图 2 和图 3 显示,CUSUM 和 CUSUMSQ 统计量轨迹均位于 5%显著性水平的临界界限之内,

表明模型在样本期内未发生显著结构性变动,参数估计稳定可靠.

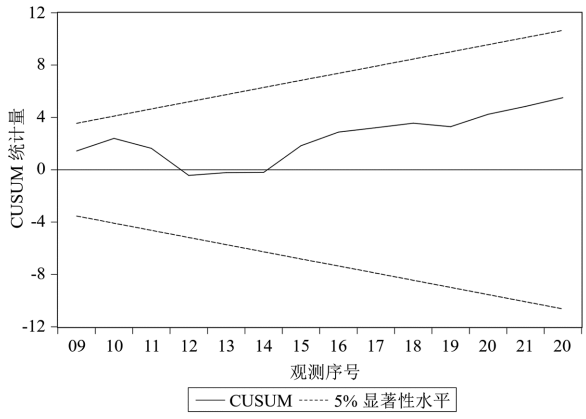


图 2 递归残差累计和(5%显著性水平)

Fig.2 Cumulative Sum (CUSUM) Test of Recursive Residuals (5% Significance Level)

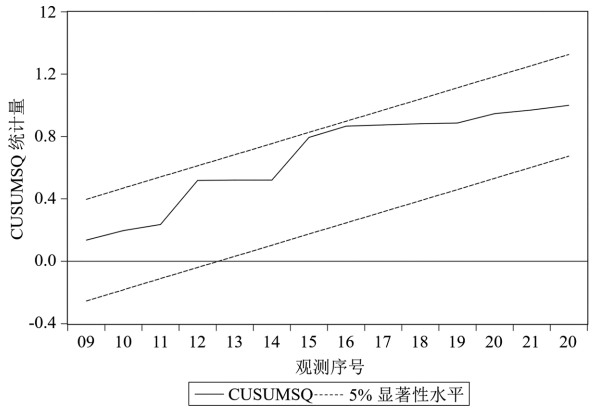


图 3 递归残差平方累计和(5%显著性水平)

Fig.3 Cumulative Sum of Squares (CUSUMSQ) Test of Recursive Residuals (5% Significance Level)

2.3.5 Granger 因果检验 基于前述模型对 CEI、CDI 与 CES 之间协整关系及长短期效应的检验,进一步采用 Granger 因果检验方法识别变量间是否存在预测意义上的动态因果关系,检验结果见表 8.结果表明,CDI 对 CEI 存在单向显著 Granger 因果关系,表明主体协同—知识融合双网络耦合协调发展水平的变化能够有效预测碳排放强度的变化.此外,CDI 与 CES 之间表现出显著的双向 Granger 因果关系,揭示两者之间的动态相互作用机制.

2.3.6 GIRF 分析 为刻画变量间的动态传导机制,基于 Granger 因果关系的分析,进一步采用 GIRF 方法.GIRF 能够模拟单一变量受到一次性冲击后系统内其他变量的动态响应,克服了传统正交方法对变量排序敏感的局限,适用于小样本且变量间相关性较强的实证研究.本文将冲击期数设定为 10 期,时间单位为年,使用一阶差分后的数据以捕捉变量间的短期响应特征,并引入标准化冲击消除量纲差异.为提高模拟的稳健性,采用蒙特卡洛方法模拟 1000 次,估计 GIRF 及相应置信区间.图 4 展示了以 CDI 为冲击变量、CEI 为响应变量的冲击路径.结果表明,CDI 对 CEI 的冲击在当期接近于零,滞后一期后出现显著负向影响,该滞后效应与 ARDL 模型中短期滞后变量的显著性结果相印证.滞后两期时达到最大负向响应峰值,为−1.865,即在 CDI 发生单位标准差的正向变动后,CEI 的年变化量将于第二年减少约 1.865 单位.随后响应强度逐渐减弱并趋于 0,整体呈现出“V”型变化轨迹.这进一步表明,主体协同—知识融合双网络耦合协调发展水平对碳排放强度具有阶段性增强、长期持续的负向调节作用.具体而言,负向效应在第二年最为显著,说明双网络耦合协调发展在积累约两年后,其减排效应得以集中释放;此后调节作用逐步减弱,但响应强度整体保持平稳,体现出其对碳排放强度的长期抑制潜力.

表 8 变量间 Granger 因果关系检验

Table 8 Examination of the causal relationship between variables

因变量	自变量		
	CEI	CDI	CES
CEI	—	−0.203 (0.049)	−0.757 (0.128)
CDI	0.040 (0.659)	—	−2.815 (0.014)
CES	0.009 (0.511)	−0.070 (0.044)	—

注:单个解释变量的χ^2检验统计量的自由度为1.

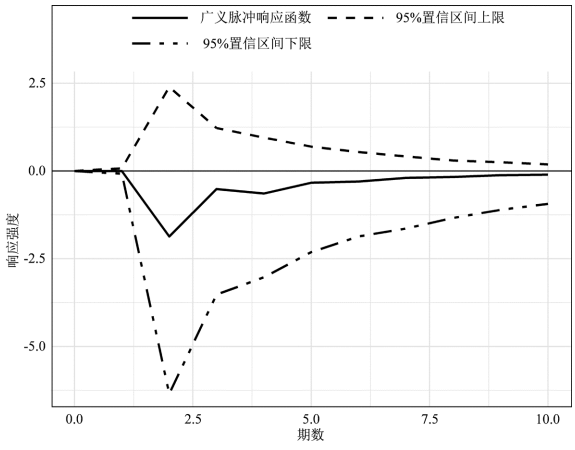


图 4 广义脉冲响应分析结果

Fig.4 Generalized impulse response analysis results

3　建议

3.1　扩大跨行业主体参与,强化跨领域知识支撑.当前建筑业低碳技术创新活动日趋活跃,主体协同和知识融合呈现出多元化趋势.建议加强各类建筑企业、高校科研团队及事业单位等跨行业主体间的合作,拓展低碳技术研发与转化的参与广度与专业基础;同时,应重视跨学科与跨领域的知识整合,构建多元知识交流平台,主动识别并弥补知识结构中的盲区,丰富低碳技术创新的知识体系.通过强化多元主体的协同机制与推进跨界知识的深度融合,进一步提升建筑业低碳发展的系统支撑力与持续创新能力.

3.2　强化耦合协调机制,赋能建筑业高效碳减排.为了充分发挥主体协同—知识融合双网络耦合协调发展在降低建筑业碳排放强度中的积极作用,建议在已有合作实践基础上,推动各类建筑企业与高校、科研机构之间建立稳定且深入的协作关系,依托联合实验室、共享研发平台等创新载体,促进资源共享与知识互补;同时激励设计、施工、供应与运维等全产业链的信息贯通与联动,在扩大参与主体的同时深化协作,构建多层次、多部门的良性互动与耦合协调机制,不断强化其在建筑业碳减排中的驱动效能.

3.3　强化政策靶向性引导与分阶段评价,系统应对耦合协调机制滞后效应.鉴于主体协同—知识融合双网络的耦合协调机制在建筑业碳减排中呈现显著滞后性,建议各级政府聚焦协同基础扎实、知识融合度高的创新平台或团队,优先给予为期两年以上的制度保障和资金投入;同时构建分阶段的动态评价体系:第一阶段(第 1 年)重点考察跨行业主体参与情况与跨知识领域整合水平;第二阶段(第 2~3 年)则聚焦碳减排绩效,结合实际成效动态调整技术攻关方向与资源配置,确保机制减排效应的持续释放、稳步增强.

4　结论

4.1　2003~2022 年间,建筑业低碳技术创新活动逐步活跃,主体协同—知识融合双网络的耦合协调度总体呈波动上升,由 0.4043 提升至 0.9591,系统协同水平由 2003 年轻度失调逐步过渡至 2007 年基本协调和 2015 年中度协调,并于 2020 年起进入高度协调阶段,反映出双网络系统协同演进的深入推进.

4.2　在控制能源结构影响的基础上,ARDL 模型确认 CEI、CDI 与 CES 之间存在稳定的长期协整关系.样本期内,CDI 对 CEI 的长期影响未达到统计显著水平,但临近 10%的显著性边界;其短期效应滞后 1 期项表现出显著负向影响,表明主体协同—知识融合双网络耦合协调发展在碳减排中具有滞后调节作用.

4.3　Granger 因果检验结果表明,CDI 对 CEI 存在显著的单向 Granger 因果关系,说明主体协同—知识融合双网络耦合协调发展能够有效调节碳排放强度.GIRF 分析显示这种调节作用具有明显滞后性、阶段性和持续性,最大负向效应在滞后 2 期达到 1.865,随后逐渐减弱并趋于平稳,整体呈“V”型特征.

参考文献:

[1] 牛建广,张玉苛,高春艳,等.环渤海经济圈与长江经济带建筑业碳排放效率比较与影响因素分析 [J]. 环境工程学报, 2024,18(11):3374−3384.
Niu J G, Zhang Y K, Gao C Y, et al. Comparison and analysis of influencing factors on carbon emission efficiency of construction industry in Bohai Rim Economic Circle and Yangtze River Economic Belt [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024,18(11):3374−3384.

[2] 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.

[3] Huang L, Krigsvoll G, Johansen F, et al. Carbon emission of global construction sector [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,81:1906−1916.

[4] Yao H, Xu P, Wang Y, et al. Exploring the low−carbon transition pathway of China's construction industry under carbon−neutral target: A socio−technical system transition theory perspective [J]. Journal of Environmental Management, 2023,327:116879.

[5] 李婉红,薛青廉,王　帆.数字化转型、多维空间邻近与企业绿色低碳创新——基于中国上市公司空间距离的经验证据 [J]. 管理工程学报, 2025,39(4):17−32.
Li W H, Xue Q L, Wang F. Digital transformation, multi−dimensional proximities and enterprise green low−carbon innovation: Empirical evidence from the spatial distance of Chinese listed companies [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2025,39(4):17−32.

[6] 周　杰,王　慧.数字经济、产业协同集聚与城市绿色创新 [J]. 技术经济与管理研究, 2024,(1):66−71.
Zhou J, Wang H. Digital economy, industrial collaborative

agglomeration and urban green innovation [J]. Journal of Technical Economics & Management, 2024,(1):66-71.

[7] 彭邦文,郑闵方,朱 磊,等.中国工业碳排放网络结构演化特征与链路预测 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1718-1731.
Peng B W, Zheng H F, Zhu L, et al. Evolution characteristics and link prediction of China's industrial carbon emission network structure [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1718-1731.

[8] 王家明,余志林.资源型城市低碳技术进步驱动碳减排的多重异质性 [J]. 中国人口·资源与环境, 2022,32(11):156-170.
Wang J M, Yu Z L. Multiple heterogeneity of carbon emission reduction driven by low-carbon technology progress in resource-based cities [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(11):156-170.

[9] Chen H, Guo W, Feng X, et al. The impact of low-carbon city pilot policy on the total factor productivity of listed enterprises in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021,169:105457.

[10] Gong H, Andersen A D. The role of material resources for rapid technology diffusion in net-zero transitions: Insights from EV lithium-ion battery technological innovation system in China [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024,200:123141.

[11] Liu Y, Li H, Wang Y, et al. Low-carbon technologies' impact on highway emissions: Cement and steel sectors [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025,219:115866.

[12] Liu Y, Xue S, Guo X, et al. Towards the goal of zero-carbon building retrofitting with variant application degrees of low-carbon technologies: Mitigation potential and cost-benefit analysis for a kindergarten in Beijing [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,393:136316.

[13] Yu Z, Kanwal Q, Wang M, et al. Spatiotemporal dynamics and key drivers of carbon emissions in regional construction sectors: Insights from a random forest model [J]. Cleaner Environmental Systems, 2025,16:100257.

[14] 刘晗玥,毛熙彦,桂镜玄,等.低碳技术产品国际贸易的区域化特征及其对碳减排的影响 [J]. 地理研究, 2025,44(1):36-56.
Liu H Y, Mao X Y, Gui J X, et al. The regionalization of international trade in low-carbon technology products and its impact on carbon emission reduction [J]. Geographical Research, 2025,44(1):36-56.

[15] Yin C, Gu H, Zhang S. Measuring technological collaborations on carbon capture and storage based on patents: A social network analysis approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,274:122867.

[16] Zhou H, Zhu X, Dai J, et al. Innovation evolution of industry-university-research cooperation under low-carbon development background: In case of 2 carbon neutrality technologies [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023,55:102976.

[17] 尚勇敏,宓泽锋.长三角低碳技术创新合作对绿色经济增长的影响 [J]. 中国人口·资源与环境, 2023,33(10):135-145.
Shang Y M, Mi Z F. Impact of low-carbon technology innovation cooperation in the Yangtze River Delta on green economic growth [J]. China Population, Resources and Environment, 2023,33(10):135-145.

[18] 宋 华,韩梦玮,于亢亢,等.数字技术如何助力供应链碳减排——基于国网浙江电力的案例研究 [J]. 南开管理评论, 2024,27(1):27-41.
Song H, Han M W, Yu K K, et al. How does digital technology promote supply chain carbon emission reduction? A case study based on State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd [J]. Nankai Business Review, 2024,27(1):27-41.

[19] 王为东,王笑楠,江红莉.低碳城市建设能否加快低碳技术知识流动? [J]. 科学学研究, 2023,41(12):2204-2215.
Wang W D, Wang X N, Jiang H L. Can the construction of low-carbon cities accelerate knowledge flow of low-carbon technologies? [J]. Studies in Science of Science, 2023,41(12):2204-2215.

[20] Pan A, Zhang W, Shi X, et al. Climate policy and low-carbon innovation: Evidence from low-carbon city pilots in China [J]. Energy Economics, 2022,112:106129.

[21] Feng S, Liu G, Shan T, et al. Predicting green technology innovation in the construction field from a technology convergence perspective: A two-stage predictive approach based on interpretable machine learning [J]. Journal of Environmental Management, 2024,372:123203.

[22] 阮崇友,林晟炫.新质生产力同群效应对制造业产业链韧性的影响研究 [J]. 西北民族大学学报(哲学社会科学版), 2025,(4):79-92.
Ruan C Y, Lin S X. Research on the impact of the peer effect of new quality productive forces on the resilience of manufacturing industry chains [J]. Journal of Northwest Minzu University (Philosophy and Social Sciences), 2025,(4):79-92.

[23] 魏 龙,魏 鹏,蔡培民.研发要素跨境流动对科技创新能力的影响——来自中国工业行业的经验证据[J].科技进步与对策, 2025,42(21):96-105.
Wei L, Wei P, Cai P M. The impact of cross-border R&D factor flows on scientific and technological innovation capability: Evidence from China's manufacturing industry [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2025,42(21):96-105.

[24] 吴 添,廖静秋,王子阳,等.大型集群工程的目标控制范式研究——以南水北调工程为例 [J]. 管理世界, 2025,41(5):223-239,252,325.
Wu T, Liao J Q, Wang Z Y, et al. Target control paradigm of clustered megaproject: A case study of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Management World, 2025,41(5):223-239,252,325.

[25] 吕 鹏,郭杰浩.数字经济与绿色发展效率——基于三大城市群的检验 [J]. 统计与决策, 2025,41(14):127-132.
Lv P, Guo J H. Digital economy and green development efficiency: Evidence from three major urban agglomerations [J]. Statistics & Decision, 2025,41(14):127-132.

[26] 任冬林,代 璐,张艳芳,等.高质量发展视域下新型工业化体系构建及实现路径研究 [J]. 价格理论与实践, 2025,(5):158-165.
Ren D L, Dai L, Zhang Y F, et al. Research on the system construction and realization path of new-type industrialization from the perspective of high-quality development [J]. Price: Theory & Practice, 2025,(5): 158-165.

[27] 李俊明,胡雅璇,杜文晶,等.新质生产力视域下科技驱动减污降碳协同增效的非线性效应及空间分异 [J]. 经济地理, 2025,45(4):109-122.
Li J M, Hu Y X, Du W J, et al. Nonlinear effects and spatial differentiation of synergy in pollution reduction and carbon emission reduction driven by science and technology under the background of new quality productive forces [J]. Economic Geography, 2025,45(4): 109-122.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 李凯帅.基于模糊 OPA 方法的城市技术网络融合水平研究 [J]. 信息系统工程, 2025,(4):117−120.
Li K S. Study on the integration level of urban technology networks based on the fuzzy OPA method [J]. China CIO News, 2025,(4):117−120.

[31] 黄　伟,刘银轲,胡培奇.数字鸿沟背景下小农户信息赋能过程机理与实现路径——基于数字包容理论的多案例研究 [J]. 技术经济, 2023,42(6):138−152.
Huang W, Liu Y K, Hu P Q. The mechanism and implementation path of information empowerment process of smallholder farmers under the background of digital divide: Multiple case studies based on digital inclusion theory [J]. Journal of Technology Economics, 2023,42(6):138−152.

[32] 衣紫薇,李　龙,邵志国.新基建投资与新型城镇化发展耦合协调的时空演化研究 [J]. 青岛理工大学学报, 2024,45(4):53−63.
Yi Z W, Li L, Shao Z G. Spatiotemporal evolution of the coupling coordination between new infrastructure investment and new urbanization development [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2024,45(4):53−63.

[33] 吉骏恺,魏玖长.城市碳脱钩进程下产业碳排放的集群化发展——考虑城市间碳不平等的网络视角研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2025,45(4):1189−1206.
Ji J K, Wei J C. The clustered development of industrial carbon emissions under urban carbon−decoupling progress: Network−perspective analysis considering inter−city carbon inequality [J]. Systems Engineering−Theory & Practice, 2025,45(4):1189−1206.

[34] 邵志国,李可心,李梦笛.中国交通基础设施、经济增长与碳排放的脱钩效应及互动关系分析 [J]. 环境科学, 2025,46(8):4813−4825.
Shao Z G, Li K X, Li M D. Decoupling effect and interactive relationship among transportation infrastructure, economic growth, and carbon emissions in China, [J]. Environmental Science, 2025, 46(8):4813−4825.

[35] 张伟平,庄新田,王　健.中国股市跨行业系统性风险空间溢出关联及风险预测分析——基于尾部风险网络模型 [J]. 中国管理科学, 2021,29(12):15−28.
Zhang W P, Zhuang X T, Wang J. Systematic risk spatial spillover correlation and risk prediction analysis of cross−industry in China's stock market−based on the tail risk network model, [J]. Chinese Journal of Management Science, 2021,29(12):15−28.

[36] 邱庆全,李　爽,夏　青.中国可再生能源消费与能源碳排放影响关系研究 [J]. 生态经济, 2017,33(2):19−23.
Qiu Q Q, Li S, Xia Q. Renewable energy consumption−energy−related CO_2 emission nexus for China [J]. Ecological Economy, 2017,33(2): 19−23.

[37] 李　洁,修长百,闫　晔.内蒙古农业科技进步贡献率、农业总产值与农业碳排放关系研究 [J]. 科学管理研究, 2019,37(4):131−136.
Li J, Xiu C B, Yan Y. Study on the relationship between science and technology expenditure, agricultural gross output value and agricultural carbon emission in Inner Mongolia [J]. Scientific Management Research, 2019,37(4):131−136.

[38] 金　都,刘新平.中国能源结构转型:碳减排效应、驱动因素及碳达峰探索 [J]. 安全与环境学报, 2024,24(12):4908−4916.
Jin D, Liu X P. Exploring the carbon emission reduction effects, drivers, and peak carbon strategies in China's energy structure transformation [J]. Journal of Safety and Environment, 2024,24(12): 4908−4916.

[39] Ali U, Guo Q, Kartal M T, et al. The impact of renewable and non−renewable energy consumption on carbon emission intensity in China: Fresh evidence from novel dynamic ARDL simulations [J]. Journal of Environmental Management, 2022,320:115782.

[40] 周晓艳,张雪莹,吴炫匡,等.中国城市工业贸易隐含碳排放转移网络结构及影响机制 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3472−3483.
Zhou X Y, Zhang X Y, Wu X K, et al. Structure and mechanism of China's inter−city industrial trade embodied carbon emission transfer network [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3472−3483.

[41] 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(2):201.

[42] 柳梦琳,赵清华,马欲翔,等.中国多源碳排放演化与碳减排路径分析 [J/OL]. 环境科学, 1−28[2025−07−30].https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202503060.
Liu M L, Zhao Q H, Ma Y X, et al. Multi−source carbon emissions evolution and mitigation pathways in China [J]. Environmental Science, 1−28[2025−07−30].https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202503060.

[43] Pu X, Yao J, Zheng R. Forecast of energy consumption and carbon emissions in China's building sector to 2060 [J]. Energies, 2022, 15(14):4950.

[44] Jin Z, Zeng S, Chen H, et al. Creating value from diverse knowledge in megaproject innovation ecosystems [J]. International Journal of Project Management, 2022,40(6):646−657.

[45] 翟石艳,王　铮.基于 ARDL 模型长三角碳排放、能源消费和经济增长关系研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2013,22(1):94−103.
Zhai S Y, Wang Z. Modeling the relationship among carbon emissions, energy consumption and economic growth by ARDL in the Yangtze River Delta [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013,22(1):94−103.

[46] 刘金培,宋晓霞,陈华友,等.中国人均碳排放影响因素的长期均衡与因果动态关系研究——基于结构突变 ARDL−VECM 模型的实证分析 [J]. 运筹与管理, 2019,28(9):57−65.
Liu J P, Song X X, Chen H Y, et al. Study on the long−term equilibrium and causality of the influencing factors of China's per capita carbon−based on structural break ARDL model and VECM model [J]. Operations Research and Management Science, 2019,28(9):57−65.

[47] 庞　丽.基于 ARDL 模型的江苏贸易开放、城市化和碳排放关系探讨 [J]. 中国人口・资源与环境, 2015,25(S1):430−434.
Pang L. Openness to trade, urbanization and carbon emission based on model ARDL in Jiangsu [J]. China Population, Resources and Environment, 2015,25(S1):430−434.

作者简介：李　龙(1988−),男,山东滨州人,副教授,博士(后),主要研究方向为可持续建设管理.发表论文 60 余篇.lilongchn@qut.edu.cn.