

中国城市网络地位对碳排放效率的影响

盛科荣¹, 李晓瑞¹, 孙威^{2,3}, 王传阳⁴

(1. 山东理工大学经济学院, 淄博 255012; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要: 提升城市碳排放效率是中国实现“双碳”目标和经济社会可持续发展的关键。在流动空间环境下, 城市碳排放效率不再仅仅取决于集聚经济, 而是越来越多地受到网络经济的影响。本文利用中国制造业500强企业投资联系数据构建城市网络, 研究了2005—2020年城市网络地位对全要素碳排放效率的影响机理及特征。研究发现: ①网络地位对城市碳排放效率具有显著正向影响, 结论经过稳健性和内生性检验后依然成立。②网络地位不仅通过价值链重组效应、中间产品多样化效应和网络竞争效应正向影响着城市的碳排放效率, 还通过促进绿色技术创新、科技企业孵化和风险资本投资的中介机制改善了城市碳排放效率。③网络地位对城市碳排放效率的影响呈现多维异质性特征, 东部城市、非资源型城市、人口规模较大城市和行政等级较高城市的碳排放效率更多从网络地位的增强中获益。未来中国政府应将碳达峰碳中和目标与城市网络建设结合起来, 充分发挥城市网络对碳排放效率提升的推动作用, 同时高度关注网络环境下不同类型城市碳排放效率的协调发展。

关键词: 城市网络; 碳排放效率; 面板Tobit模型; 链式中介效应; 网络经济; 流动空间

DOI: 10.11821/dlxb202311014

1 引言

二氧化碳大量排放引起的全球气候变化对人类社会生存和发展带来了严峻的挑战^[1]。中国政府在第75届联合国会议上做出了力争在2030年前实现碳达峰并在2060年前实现碳中和的承诺, 这不仅是中国履行国际减排责任的重要内容, 也对中国绿色转型发展提出了更高的要求。中国有70%以上的碳排放来源于城市^[2], 如何在快速城镇化进程中协同推动经济转型和节能减碳关系到全国低碳发展的成效^[3]。中国是一个发展中国家, 需要有效的平衡经济增长和碳减排的关系。与欧美国家追求绝对数量碳减排不同的是, 中国的主要任务应该是提高碳排放效率, 确保在降低碳排放强度的同时促进经济增长^[4]。因此, 聚焦城市这一碳排放主体, 探究城市碳排放效率的来源, 推进绿色低碳城市建设, 成为中国实现“双碳”目标和经济社会可持续发展的关键。

与此同时, 随着生产分割的日益深化, 中国城市间的网络联系快速发展。城市逐步由场所空间中的生产基地转变为流动空间中的经济平台, 城市经济的地理边界变得越来越开放。相对于场所空间环境下的集聚经济, 网络经济(Network Economics)已经成为

收稿日期: 2023-02-01; 修订日期: 2023-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371209) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42371209]

作者简介: 盛科荣(1977-), 男, 山东日照人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为城市网络与区域可持续发展。

E-mail: shengkerong@163.com

通讯作者: 孙威(1975-), 男, 河南开封人, 副研究员, 中国科学院大学岗位教授, 研究方向为经济地理与区域发展。

E-mail: sunw@igsnrr.ac.cn

理解城市经济效率的重要基础^[5]。一方面，城市网络为产业链重组提供了更大的空间，有利于城市之间通过产业链分工形成比较优势、建立产业关联，从而实现专业化生产和产出增长^[6]；另一方面，城市网络也在更大空间尺度上推动了异质性知识和互补性资源的流动，有利于促进本地技术进步和企业孵化，进而提升整体的创新效率^[7]。在这种背景下，中国城市的碳排放效率不再仅仅取决于城市本身的资源优势和集聚经济，也必将越来越多的受到网络地位即城市对网络资源支配、吸收和利用能力的影响。

围绕研究主题，本文重点关注以下3个问题：城市网络地位如何影响全要素碳排放效率？城市网络地位的减碳效应存在哪些机制？城市网络地位的影响在地理区位、资源禀赋、人口规模和行政等级的不同维度上是否存在差异？为了解答这些问题，本文采用中国制造业500强企业投资联系数据构建城市网络，利用度数、中介度和特征根测度城市的网络地位，利用DEA分析中窗口模型和超效率SBM模型相结合的方法测度全要素碳排放效率，在此基础上采用面板Tobit模型定量研究了城市网络地位对碳排放效率的多维影响及中介机制。这些问题的研究将加深对网络经济一般规律的认识，为理解城市碳排放效率来源提供新的视角，并为推进全国统一大市场建设和实现国家“双碳”目标愿景的互动发展提供借鉴。

本文基于中国制造业500强企业投资联系视角开展研究，主要原因有：①制造业一直是支撑中国城市经济发展的重要基石^[8]，2020年中国制造业500强企业营业收入和资产规模总额分别占当年GDP的36.92%和38.67%，发明专利占到当年全国发明专利有效数量的18.37%。②中国制造业500强企业的生产分割和分散化布局日益普遍，大量企业开始在其他城市新建企业或开展股权投资，企业网络的发展在更大空间尺度上推动了城市之间的分工与合作，成为中国城市网络发展的重要媒介。③中国制造业500强企业不仅涵盖了通讯、汽车、电气、医药等现代制造行业，也覆盖了石油、化工、冶金、建材等传统高能耗和高碳排放行业，能够较为全面的反映中国城市的主要经济活动，也是提升碳排放效率的着力点。

与本文相关的研究文献主要集中在两个领域。一是中国城市碳排放效率时空演变及影响因素的研究。城市碳排放效率的测度主要有单位GDP碳排放强度、全要素碳排放效率等方法^[9]，这些研究揭示了城市碳排放效率的多维度异质性^[10]，以及日益增强的空间溢出效应^[11]。但是由于测度方法和指标体系存在差异，不同研究揭示出来的城市碳排放效率时空演化特征并不一致^[3, 12]。近年来，高铁开通^[13]、绿色技术创新^[9]、数字经济^[14]、区域一体化^[15]、低碳试点政策^[16]、环境规制^[17]对城市碳排放效率的多维影响及作用机理得到了深入的探讨。总体来看，这些研究还停留在场所空间的思维，主要集中在解析城市本身资源禀赋、结构特征和集聚经济等因素的作用机制，没有充分考虑到快速发展的城市网络所带来的深刻影响，特别是网络地位对城市碳排放效率影响的研究仍然处于空白。二是中国城市网络结构特征及外部影响的研究。当前研究集中在城市网络结构的解析方面^[18]，这些研究揭示了中国城市网络权力的层级分化和核心—外围结构特征^[19]，以及城市网络联系的凝聚子群结构^[20]、相互重叠的网络腹地格局^[21]、小世界性和结构韧性^[22]。最近几年，城市网络外部性的研究受到重视^[23]，这些研究揭示了网络嵌入对城市经济发展的积极影响^[24]、本地人力资本和知识存量对网络外部性的调节机制^[25]、本地蜂鸣和网络管道的互补效应^[26]、借用规模和集聚阴影效应的空间并存^[27]以及城市网络外部性的空间异质性特征^[28]。但是这些研究主要集中在网络外部性对城市创新发展和经济增长影响的层

面,对经济主体有意识的网络投资行为产生的非外部性影响关注不足,也没有充分考虑到城市网络在更大空间尺度上平衡经济增长和碳减排的功能。

相较于已有文献,本文的边际贡献主要体现在:①整合内生经济增长理论、创新地理学等的片段式分析,构建了一个理解城市网络与碳排放效率关系的分析框架,从理论上阐释了城市网络地位的碳减排机制,丰富了城市网络经济效应的理论内涵与应用场景,拓展了对流动空间环境下城市碳排放效率来源的理解。②基于面板Tobit模型、链式多重中介模型等计量方法,验证了城市网络地位对碳排放效率的积极影响,识别了城市知识产出和创业活力的中介机制,明确了城市网络在实现“双碳”目标中的功能定位,为推动城市绿色高质量发展提供了新的战略选择。本文在城市网络和碳排放效率两个研究领域之间搭建起桥梁,有助于推动网络经济基础理论的发展,并为网络环境下提升中国城市碳排放效率的政策制定提供科学参考。

2 理论基础与研究假说

本文关注的是城市全要素碳排放效率,它本质上是考虑碳排放、要素投入和经济产出的城市综合经济效率。拼合现有内生经济增长理论、创新地理学等的片段式分析,可待检验的城市网络地位影响碳排放效率的机制与特征(图1),具体包括如下环节:

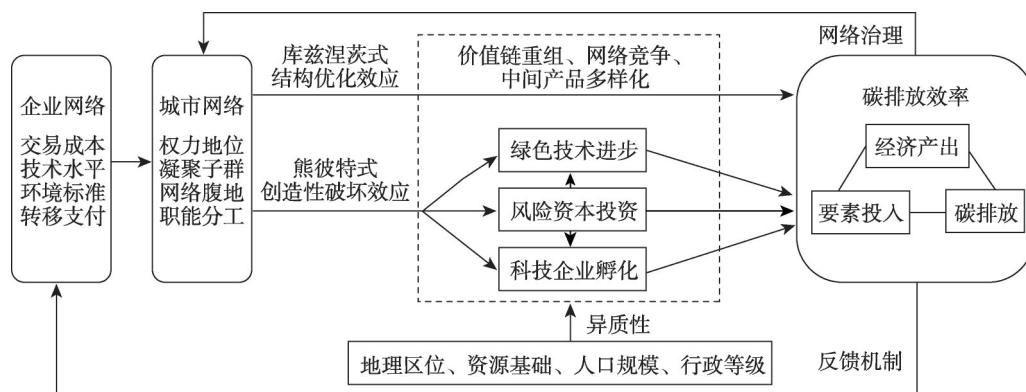


图1 网络地位影响城市碳排放效率的机制与特征

Fig. 1 Mechanisms and characteristics of network position affecting urban carbon emissions efficiency

第一,城市网络的发展为城市改善自身经济结构提供了更广阔的空间,这种库兹涅茨式的结构优化效应构成了网络环境下城市碳排放效率的重要来源。网络地位的提升至少可以通过3种途径直接影响着城市的碳排放效率。①价值链重组。城市网络的发展将推动生产的分割,促进产品价值链不同环节与城市资源禀赋、比较优势实现更好的匹配。根据Krugman^[29]和Romer^[30]的研究,这将放大规模经济、劳动分工和边干边学对生产率的促进作用。因此网络地位的提升可以通过发挥比较优势、放大规模经济和累积技术知识,提高城市的经济绩效和碳排放效率。②中间产品多样化。城市网络的发展将有利于促进产品内分工,丰富城市体系内部中间产品的种类。根据Ethier的内生经济增长理论^[31],中间产品种类的增多可以规避资本积累的收益递减倾向。这意味着网络地位的提升可以增强城市利用多样化中间产品的能力,从而在给定能源消费数量、碳排放数量的情况下生产出更多的产品。③网络竞争。城市网络的发展将带来更加激烈的市场竞争,

使得那些原先分散在不同区域市场的企业现在变成了直接的竞争对手。市场竞争是经济效率的重要来源,也是模仿导向型增长向创新驱动型增长转变的重要保障^[32]。城市网络带来的竞争将迫使高耗能、低效率的产业退出,激励着经济主体更多的采用清洁生产技术、降低能源消费,从而改善城市的碳排放效率。对此,引申出本文的第一个理论假说。

理论假说1:城市网络地位的提高将促进全要素碳排放效率的提升。

第二,城市网络还充当着城市体系中知识和资本流动管道的功能^[33],城市网络的发展将对城市绿色技术创新和低碳经济发展带来深刻影响,这种熊彼特式的创造性破坏效应将成为网络地位作用于城市碳排放效率的重要媒介。① 绿色技术创新。在“蜂鸣—管道”的知识流动体系下^[33],城市网络促进了不同类型城市之间绿色知识的交流。根据重组式增长理论(Recombinant Growth Theory),技术创新在很大程度上来源于现有知识的重新组合^[34]。因此网络地位的提升将为城市利用网络中多样性的知识资源提供更大的空间,这将通过促进城市绿色技术创新的中介机制,提升城市的全要素碳排放效率。② 科技企业孵化。由于经济主体对创业认知的不确定性,在经济体系中往往存在着大量具有商业化利用前景、但未能实现充分利用的知识资源。创业知识溢出理论的研究成果意味着,城市网络的发展有利于实现新知识掌握更多市场信息的经济主体之间更好的匹配^[35]。因此网络地位的提升可以提高城市对未商业化利用的知识资源的可及性,这将通过促进科技企业孵化、推动低碳经济发展的传导机制进一步提升碳排放效率。③ 风险资本投资。风险资本能够迅速、有效地识别投资机会,降低城市低碳产业发展过程中的融资约束,改善城市经济结构和资源配置效率。风险资本还能够为具有前景的生产技术商业化和企业家创业活动提供增值服务,促进企业技术创新,扶持初创企业成立^[36],这将进一步为城市绿色技术和低碳经济发展提供动力。因此网络地位不仅将通过风险投资的独立中介效应,还将通过风险投资提升创新活力和创业机会的链式中介效应提高城市碳排放效率。对此,引申出第二个理论假说。

理论假说2:城市网络地位的提高将通过促进绿色知识产出、科技企业孵化和风险资本投资的中介机制提升城市的碳排放效率。

第三,中国城市在地理区位、资源禀赋、人口规模和行政等级多个维度上都存在较大发展差异,网络地位的碳排放效率提升效应也可能存在多维度异质性特征。① 中国幅员辽阔,不同地理区位城市的发展差距明显。东部城市受益于更好的产业基础和创新能力,能够充分利用网络的资源重配效应和知识管道功能提高自身的碳排放效率^[37]。而西部城市经济基础和创新发展能力相对较差,这将导致城市网络的碳排放效率提升效应相对较弱。② 中国拥有大量的资源型城市,资源型城市和非资源型城市之间存在较大发展差距。资源型城市的产业结构以采掘工业和原材料工业为主导,缺乏“知识守门人”和利用网络资源的能力,往往难以通过融入城市网络来提高碳排放效率。③ 中国城市的人口规模差距较大,不同规模城市在网络中的获益能力也存在差异。城市规模与集聚经济以及经济活动的多样化密切相关,人口规模更大的城市具备更强的网络资源吸收利用能力,能够从网络地位提升中显著改善碳排放效率^[38]。④ 中国城市的行政级别存在较大差距,行政级别对城市经济效率影响巨大。行政级别的提高意味着城市可以享受更多的政策红利,支配更多的经济资源,拥有更好的创新基础设施和经济效率^[39],从网络联系中更多的改善自身碳排放效率。基于此,引申出第三个理论假说。

理论假说3:网络地位对城市碳排放效率的影响在地理区位、资源禀赋、人口规模和行政等级多个维度上都将呈现异质性特征。

3 研究方法

3.1 城市网络地位的测度

本文首先借鉴 Alderson 等提出的隶属联系模型 (Ownership Linkage Model) [40], 利用 2020 年中国制造业 500 强企业与被投资企业的投融资关系界定中国城市间网络联系。中国制造业 500 强企业名单来自中国企业联合会、中国企业家协会 (<http://www.cec1979.org.cn>)。首先根据企查查网站 (<https://www.qcc.com>) 和公司年度报告整理出制造业 500 强企业对外投资的企业名录, 接着将制造业 500 强企业与被投资企业的投融资关系在城市层面进行加总, 最终建立起包含 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 4 个时间断面的中国城市网络面板数据。其中, 城市网络矩阵中的元素 $link_{ij}(t)$ 表示, 截止到 t 年在第 i 个城市的制造业 500 强企业在第 j 个城市投资的企业数量。初步分析发现, 中国城市间有向联系数量从 2005 年的 6426 条增长到 2020 年 16856 条。

在此基础上, 采用 3 个相互补充的网络中心性指标来测度城市的网络地位 (NP): ① 度数 (Degree), 该指标强调城市在企业投融资网络中的链接强度对网络资源支配能力的重要性, 定义为城市发出和接收投资关系数量之和的对数; ② 中介度 (Between), 强调城市对于投资联系的桥接功能的重要性, 定义为投资网络中经过城市的最短路径数量的对数; ③ 特征根 (Eigen), 强调城市与网络中具有较高中心性节点临近性的重要性, 定义为 $Eigen_i = \lambda^{-1} \sum_j link_{ij} Eigen_j$, 其中 i 和 j 分别代表焦点城市及其合作伙伴, λ 表示最大特征值, $link_{ij}$ 表示城市 i 向城市 j 发出的投资关系数量。

3.2 城市碳排放效率的测度

本文采用数据包络分析 (DEA) 中窗口模型和超效率 SBM 模型相结合的方法, 来测度 2000—2020 年中国城市的全要素碳排放效率 (UCEE)。其中, 窗口模型不仅可以实现特定时间点上不同城市之间经济效率的横向比较, 还能实现同一城市在不同时间点上经济效率的纵向比较; 超效率 SBM 模型不仅考虑到了投入和产出变量的松弛性特征, 还使得那些在传统 DEA 模型中位于效率前沿的城市变得更具有可区分性[41]。

考虑一个城市数量为 N ($i = 1, 2, \dots, N$) 和年份跨度为 T ($t = 1, 2, \dots, T$) 的投入产出面板数据, 其中每个城市都利用 m 种类型的投入 x 生产 s 种类型的产出 y 。如果一个窗口起始于时间点 k ($1 \leq k \leq T$) 且宽度为 d ($1 \leq d \leq T-k$), 那么这个窗口中城市的投入矩阵 x_{kd} 和产出矩阵 y_{kd} 分别为:

$$x_{kd} = [x_1^k, x_2^k, \dots, x_N^k, x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, \dots, x_N^{k+1}, \dots, x_1^{k+d}, x_2^{k+d}, \dots, x_N^{k+d}]^T \quad (1)$$

$$y_{kd} = [y_1^k, y_2^k, \dots, y_N^k, y_1^{k+1}, y_2^{k+1}, \dots, y_N^{k+1}, \dots, y_1^{k+d}, y_2^{k+d}, \dots, y_N^{k+d}]^T \quad (2)$$

式中: $x_i^t = [x_i^{1t}, x_i^{2t}, \dots, x_i^{mt}]$ 和 $y_i^t = [y_i^{1t}, y_i^{2t}, \dots, y_i^{st}]$ 分别表示城市 i 在年份 t ($t=k, k+1, \dots, k+d$) 上的 m 维投入向量和 s 维产出向量。在此基础上, 将每个窗口的投入、产出矩阵带入到非导向的超效率 SBM 模型[41], 得到该窗口期内所有城市的全要素碳排放效率。按照相同方法对每个窗口中所有城市的全要素碳排放效率进行测算, 然后计算出每个城市在不同窗口中相同时间点上效率的平均值, 最终以平均效率值来衡量城市在每个时间点上的碳排放效率。

在具体测算过程中借鉴 Kuang 等研究[42], 将窗口宽度设置为 3 年 ($d=3$), 因此窗口的数量共有 14 个。根据数据可获得性原则, 借鉴 Wang 等[3]和 Kuang 等[42]的研究, 本文采用了主要能源消费的全要素碳排放效率, 其中产出指标为城市实际 GDP, 投入指标包括城市的碳排放数量、实际固定资本存量、劳动力数量和城市建设用地面积。投入和产出指标的定义方法见表 1。

表 1 城市全要素碳排放效率的测度指标

Tab. 1 Indicators for measuring the total factor carbon emissions efficiency of cities

类型	指标	定义方法
产出	实际GDP	以2000年为基准年份，以GDP平减指数折算
投入	碳排放规模	利用IPCC的算法估计： $Carbon = \sum E_n k_n$ ，其中 E_n 和 k_n 分别为第 n 种能源的消费量和碳排放系数，能源消费包括全社会用电量、天然气、液化石油气和供热4种类型，全社会用电量的碳排放系数根据生态环境部发布的中国区域电网基准线排放因子分区域确定，其他能源的碳排放系数参考《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中提供的缺省值确定
	实际固定资本存量	采用永续盘存法估计，其中基准年份为2000年，初始资本存量用2000年的名义资本存量除以10%来测度，折旧率为取值为9.6%，价格指数为GDP平减指数
	劳动力	以全市城镇单位从业人员期末人数来测度
	城市建设用地	以城市用地面积中各项建设用地面积之和来测度

3.3 耦合协调度

本文采用耦合协调度指标来识别城市碳排放效率和网络地位的耦合关系。城市*i*在年份*t*的耦合协调度*D_{it}*的计算公式为：

$$D_{it} = \left[\frac{(UCEE_{it} \times NP_{it})^{1/2}}{0.5UCEE_{it} + 0.5NP_{it}} \times (0.6UCEE_{it} + 0.4NP_{it}) \right]^{1/2} \tag{3}$$

式中：*i*和*t*分别表示城市和年份；UCEE代表碳排放效率；NP代表网络地位。耦合协调度的区间在0和1之间，越接近0，说明网络地位和碳排放效率之间的协调程度越低；越接近1，表明系统间的协调程度越高。

3.4 面板Tobit模型

本文基于Dietz等发展的STIRPAT理论框架，探究网络地位对城市能源消费效率的多维影响^[43]。STIRPAT框架可以分析多种人类活动的综合影响并具有灵活的可扩展性，被广泛应用于探索能源消费碳排放的驱动因素并产生了大量的成果^[11]。同时考虑到城市全要素碳排放效率为归并数据（Censored Data），使用普通最小二乘（OLS）回归会产生有偏差的估计结果，因此本文使用面板Tobit模型进行计量检验。基准计量模型设定如下：

$$UCEE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 NP_{it} + \sum_l \varphi_l Ctrl_{it}^l + city_i + year_t + \varepsilon_{it} \tag{4}$$

式中：*i*代表城市；*t*代表年份；UCEE代表城市全要素碳排放效率；NP代表城市的网络地位；Ctrl代表控制变量；*l*表示控制变量的编码； α_0 代表常数项； α_1 为反映城市网络地位影响全要素碳排放效率的核心参数； φ_l 表示第*l*个控制变量的拟合系数；city代表个体效应；year表示时间效应； ε 为误差项。

本文中被解释变量为城市全要素碳排放效率（UCEE），采用DEA中窗口模型和超效率SBM模型相结合的方法测度。核心解释变量为城市的网络地位（NP），分别用度数（Degree）、中介度（Between）和特征根（Eigen）来测度。为了减缓遗漏变量带来的估计偏误问题，本文在对STIRPAT模型进行分解和扩展的基础上选择控制变量。原始STIRPAT模型关注的是碳排放数量，主要从人口、财富和技术3个维度解析碳排放的影响因素。本文综合考虑GDP、碳排放以及资本、劳动和土地投入的全要素碳排放效率，更多关注的是经济结构、创新能力和经济激励等因素的影响。参照Wang等^[3]、Liu等^[10]、徐英启等^[12]、丁斐等^[17]、黄蕊等^[44]的研究，本文在计量方程中纳入了城镇化率、产业结构、人力资本、外国直接投资、航空可达性和财政压力6个控制变量。控制变量定义及计算方法参见表2。

表2 控制变量及定义方法

Tab. 2 Control variables and their definition methods

变量	符号	定义方法	影响机理
城镇化率	<i>Urban</i>	市辖区人口/全市人口	集聚经济具有减碳作用, 而能耗增长提高碳排放量
产业结构	<i>Indust</i>	第二产业增加值/GDP	结构优化效应提升效率, 高能耗部门提高碳排放量
人力资本	<i>Reasch</i>	研究和开发人员数量的对数	通过提升创新发展水平和产业结构提高碳排放效率
外国直接投资	<i>FDI</i>	外国直接投资规模的对数	污染天堂效应或污染光环效应(pollution halo effect)
航空可达性	<i>Passe</i>	民用航空客运量/全市人口	通过改善可达性、吸引价值链高端环节提升碳排放效率
财政压力	<i>Gov</i>	政府预算支出/政府预算收入	通过改善基础设施提高效率, 但也导致“趋劣竞争”

3.5 数据来源

计量分析基于城市层面的面板数据, 城市样本为283个中国地级以上城市(因数据可得性, 暂未含港澳台地区)^①, 时间断面为2005年、2010年、2015年和2020年。在城市碳排放效率测度中, 城市GDP、劳动力、天然气使用量、液化石油气使用量、全社会用电量数据来自相关年份的《中国城市统计年鉴》, 城市建设用地面积、供热规模数据来自《中国城市建设统计年鉴》; 2018年、2019年和2020年的城市固定资产投资数据根据城市发布的固定资产投资增速数据估算而来。在计量分析中, 控制变量也均来自相关年份的《中国城市统计年鉴》。为了缓解异方差问题, 网络地位、人力资本和外国直接投资变量均取自然对数处理。

4 实证结果与分析

4.1 特征事实

2005—2020年中国城市间的网络链接在整体上显著增强。城市网络密度从0.0287提升到0.0891, 城市度数(对数)的平均值从0.8235提高到1.3014, 中介度和特征根的平均值也明显提升。但是城市网络呈现出明显的核心—外围分化特征。绝大多数的网络联系发生在以京津冀、长三角、珠三角和成渝城市群为顶点的菱形区域内部, 其中北京、上海、杭州、深圳等城市始终位于网络的核心, 并且在城市网络发展过程中进一步强化了自身的网络地位。中西部城市的网络联系普遍稀疏, 大多属城市位于网络的边缘地位。

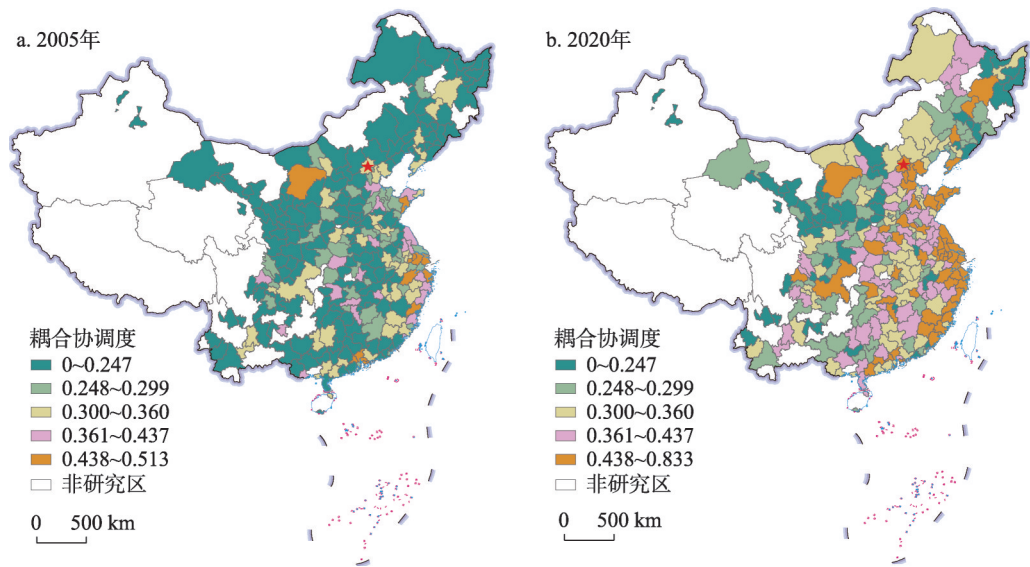
与此同时, 中国城市碳排放效率在整体上明显提升, 碳排放效率的平均值从0.4397提升到了0.5136^②。此外, 不同类型城市碳排放效率的演化路径也出现分化: 上海、南京、深圳、武汉等171个城市的碳排放效率明显提高, 中国主要城市群的核心城市成为碳排放效率前沿城市的主体; 盐城、无锡、枣庄、天水等66个城市的碳排放效率基本保持不变, 包头、南昌、吕梁、聊城等46个城市的碳排放效率则明显下降。

进一步可以识别出中国城市碳排放效率和网络地位时空耦合的两个显著特征: 第一, 城市碳排放效率和网络地位的整体关联性显著提升。2005—2020年中国城市碳排放效率和度数的相关系数从0.0408提升到0.3539, 耦合协调度的平均值也从0.2236提升到

① 本文剔除了中国地级行政区划中的7个地区、30个自治州、3个盟以及拉萨、毕节、铜仁、三沙、吐鲁番等14个数据不完整的城市。

② 本文分析结果与Wang等的结论相冲突^[3], Wang等发现1997—2017年中国城市碳排放效率呈现下降趋势。分析结果的差异性可能有两个原因: 一是Wang等在测度城市碳排放规模时仅考虑了城市全年电力消费量的单一指标, 而本文考虑了天然气、液化石油气、全社会用电量、供热规模4种类型的能源消费量; 二是Wang等选取了超效率SBM模型来核算城市的碳排放绩效, 而超效率SBM模型无法实现同一城市效率值在不同时间点上的直接比较。

0.3416。当用中介度、特征根来测度城市网络地位时也得到了类似的分析结果。这意味着，城市碳排放效率越来越多的与自身网络地位联系起来。第二，城市碳排放效率和网络地位耦合发展的空间和类型指向性日益明显。从图2中可以看出，东部地区城市，特别是那些位于中国主要城市群地区（哈长、京津冀、山东半岛、长三角、粤港澳等）的城市，碳排放效率和度数的耦合协调度得到明显改善；西部地区的成渝城市群、滇中城市群的耦合协调度得到显著提升，其他大多数城市的碳排放效率并没有从网络地位提升中受益。当用中介度、特征根来测度城市网络地位时也得到了类似的分析结果。这意味着，网络地位对于不同城市碳排放效率的影响存在差异。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4619号的标准地图绘制，底图边界无修改。

图2 2005年和2020年中国城市碳排放效率和度数的耦合格局

Fig. 2 The coupling patterns of carbon emissions efficiency and degree centralities of Chinese cities in 2005 and 2020

4.2 基准回归结果

考虑到城市的度数、中介度和特征根存在较高相关性，为了避免潜在的共线性问题，本文依次对这3个变量开展分析。表3报告了基准模型式(5)的回归结果。在所有回归中Log likelihood的值较大且LR test和Wald chi2(10)统计值显著，表明模型设定合理。在第(1)和(2)列中，度数的拟合系数均为正值且显著。这意味着对外链接数量越高的城市越有能力实现经济结构的优化调整，具有更多机会利用网络中多样化的中间产品，从而有效提升全要素碳排放效率。在第(3)和(4)列中，中介度的拟合系数也显著为正值，这表明城市在网络中桥接功能的提升也会显著提高碳排放效率。在第(5)和(6)列中特征根在1%的水平上具有显著正向影响，表明城市碳排放效率不仅取决于合作伙伴的数量，还受到合作伙伴网络地位的积极影响。总体来看，理论假说1得到支持，即城市网络为城市发挥比较优势和利用外部资源提供了更大的空间，这构成了流动空间环境下城市碳排放效率的重要来源。

对控制变量的估计结果也做出简单说明。Urban的拟合系数显著为负值，表明过去20年来，中国城镇规模快速扩张对能源消费强度带来的压力超过了集聚经济的积极影响，总体上导致了碳排放效率的下降；Indust的拟合系数显著为正值，表明近些年来中

表 3 面板 Tobit 模型基准回归结果($n=1132$)
Tab. 3 The baseline regression results of panel Tobit model

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Degree</i>	0.0474*** (0.013)	0.0378** (0.015)				
<i>Between</i>			0.0209*** (0.006)	0.0166** (0.007)		
<i>Eigen</i>					0.0042*** (0.001)	0.0039*** (0.001)
<i>Urban</i>		-0.1194*** (0.045)		-0.1210*** (0.046)		-0.1360*** (0.047)
<i>Indust</i>		0.1900*** (0.052)		0.1886*** (0.052)		0.1928*** (0.052)
<i>Reasch</i>		0.0031 (0.005)		0.0041 (0.005)		0.0023 (0.005)
<i>FDI</i>		0.0049* (0.003)		0.0050* (0.003)		0.0048* (0.003)
<i>Passe</i>		0.0097** (0.004)		0.0100*** (0.004)		0.0091** (0.004)
<i>Gov</i>		-0.0025 (0.003)		-0.0031 (0.003)		-0.0032 (0.003)
个体效应	是	是	是	是	是	是
时间效应	是	是	是	是	是	是
常数项	0.4007*** (0.014)	0.3388*** (0.053)	0.4253*** (0.010)	0.3531*** (0.054)	0.4184*** (0.011)	0.3651*** (0.055)
Log likelihood	762.93	776.43	761.58	775.94	762.74	777.22
LR test	499.46*** (0.000)	467.33*** (0.000)	513.36*** (0.000)	471.50*** (0.000)	495.92*** (0.000)	459.84*** (0.000)
Wald chi2(10)	112.64*** (0.000)	142.56*** (0.000)	110.08*** (0.000)	141.71*** (0.000)	112.13*** (0.000)	144.13*** (0.000)

注：括号中数值为标准误；*、**和***分别代表在 10%、5%和 1%的水平上显著。

国淘汰落后产能、推进节能降耗和促进工业转型发展的努力取得了巨大的成效，再次验证了库兹涅茨式的结构优化效应是中国城市碳排放效率的重要来源；*FDI*和*Passe*的系数也显著为正值，表明外商直接投资和航空可达性改善了城市经济结构，带来了技术溢出，从而降低了碳排放强度；*Reasch*的系数不显著，意味着研发人员对城市碳排放效率不具有直接影响，事实上后面中介效应分析表明研发人员主要通过提高城市创新能力的中介渠道降低碳排放强度；*Gov*的系数也不显著，背后的原因可能在于财政支出的生产率效应被“趋劣竞争”带来的“污染避难所”效应抵消。

4.3 稳健性检验和内生性问题应对

4.3.1 稳健性检验 第一，变换碳排放效率测度方法。虽然超效率SBM模型能够对位于效率前沿的决策单元进行排序和比较，但是这种方法将二氧化碳排放作为投入要素来看待。实际上，二氧化碳是经济系统的非期望产出。在存在非期望产出的情况下，相对于较少的资源投入，具有较多好的（期望）产出和较少坏的（非期望）产出的技术应被认为是有效的。为此，本文采用窗口模型和非期望产出SBM模型相结合的方法重新测度城市碳排放效率并进行回归分析。表4汇总了回归结果，可以发现城市网络地位与碳排放

表4 变换碳排放效率测度方法的稳健性检验结果($n=1132$)

Tab. 4 Robustness test results for replacing carbon emissions efficiency measurement methods

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Degree</i>	0.0467*** (0.013)	0.0394** (0.016)				
<i>Between</i>			0.0197*** (0.007)	0.0159** (0.008)		
<i>Eigen</i>					0.0039*** (0.001)	0.0037*** (0.001)
控制变量	否	是	否	是	否	是

注：括号中数值为标准误；*、**和***分别代表在10%、5%和1%的水平上显著；控制变量的选取同表3中第(2)列一致，所有回归均包含个体效应、时间效应和常数项；为节省篇幅，未报告控制变量、个体效应、时间效应和常数项的回归结果，下同。

效率仍然呈现显著正相关关系，表明替换碳排放效率测度方法不会影响本文结论的稳健性。

第二，考虑空间依赖效应。为了避免遗漏空间依赖效应导致的估计偏误问题，本文将城市碳排放效率的空间滞后项 ($w \times UCEE$) 加入基准模型进行检验，其中空间权重矩阵 w 采用一阶 Queen 邻接方法界定。表5汇总了空间滞后模型的估计结果。空间滞后模型揭示出两个显著特征：① 城市碳排放效率空间滞后项的拟合系数在所有回归中均为正值且显著，表明空间相邻城市的技术溢出效应和市场竞争效应促进了焦点城市碳排放效率的提升，意味着城市碳排放效率在地理空间上是相互影响的；② 度数、中介度和特征根的拟合系数均显著为正值，这表明即使在考虑空间依赖效应的情况下，网络地位对于城市碳排放效率仍然具有显著的促进作用。因此，空间滞后模型分析结果进一步验证了网络地位对碳排放效率具有稳健的正向影响。

表5 空间滞后模型的稳健性检验结果($n=1132$)

Tab. 5 Robustness test results of spatial lag models

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$w \times UCEE$	0.0388*** (0.007)	0.0399*** (0.007)	0.0405*** (0.007)	0.0411*** (0.007)	0.0395*** (0.007)	0.0399*** (0.007)
<i>Degree</i>	0.0180*** (0.005)	0.0137** (0.006)				
<i>Between</i>			0.0192*** (0.006)	0.0143** (0.007)		
<i>Eigen</i>					0.0036*** (0.001)	0.0028** (0.001)
控制变量	否	是	否	是	否	是

4.3.2 内生性问题应对 第一，采用滞后期模型。由于城市网络的发育存在择优选择机制，即那些在场所空间中具有较高经济绩效的城市通常在流动空间中占据着较高的网络地位^[18-21]，因此城市网络地位与碳排放效率之间可能是相互影响的。为了控制潜在的反向因果关系带来的内生性问题，本文将滞后一期（5年）的城市网络地位作为解释变量，并重新进行回归。表6报告了滞后期模型的回归结果，其中L1.*Degree*、L1.*Between*和L1.*Eigen*分别为度数、中介度和特征根的一阶时间滞后项。可以观测到城市网络地位的系数仍然显著为正值，表明基准回归结果在缓解反向因果关系导致的内生性问题后依然稳健。

表 6 滞后期模型的稳健性检验结果($n=1132$)
Tab. 6 Robustness test results of lagged variable models

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
L1.Degree	0.0222*** (0.006)	0.0193*** (0.006)				
L1.Between			0.0076*** (0.003)	0.0060** (0.003)		
L1.Eigen					0.0040*** (0.001)	0.0038*** (0.001)
控制变量	否	是	否	是	否	是

第二,采用工具变量法。本文进一步选择城市到最近沿海港口距离的对数(*Disport*)作为工具变量,采用两步法IV-Tobit模型开展内生性检验。沿海港口名单来自2006年交通部发布的《全国沿海港口布局规划》(https://www.gov.cn/ztl/2007-07/20/content_691642.htm)。选择城市到最近沿海港口距离作为工具变量的原因在于地理位置是外生变量,并且会通过影响企业的区位选择塑造着城市在企业网络中的嵌入地位。表7报告了两步法IV-Tobit模型的回归结果,可以观测到:在(1)、(3)和(5)列中工具变量的回归系数显著为负值,且弱工具变量检验的AR和Wald统计值均在1%的水平上显著,表明工具变量满足相关性要求;在(2)、(4)和(6)列中度数、中介度和特征根的拟合系数均显著为正值,这表明在考虑到反向因果关系引起的内生性问题后,网络地位提升城市全要素碳排放效率的结论仍然是成立的。

表 7 两步法 IV-Tobit 模型的稳健性检验结果($n=1132$)
Tab. 7 Robustness test results of two-step IV-Tobit models

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Degree	UCEE	Between	UCEE	Eigen	UCEE
Distport	-0.04160*** (0.009)		-0.0846*** (0.018)		-0.4362*** (0.097)	
Degree		0.6723*** (0.163)				
Between				0.3307*** (0.081)		
Eigen						0.0641*** (0.016)
控制变量	是	是	是	是	是	是
AR test		65.30***		65.31***		65.30***
Wald test		16.94***		16.53***		16.64***

5 检验分析

5.1 链式多重中介效应检验

城市在生产网络中的嵌入地位可能会通过熊彼特式创造性破坏效应的传导机制提升碳排放效率。本文检验了3个中介变量的影响:①绿色知识(*GPatent*),采用人均绿色专利申请量的对数来测度,绿色专利清单来自国家知识产权局发布的《绿色低碳技术专利分类体系》,绿色专利数据根据佰腾网(<https://www.baiten.cn>)的信息整理得到;②科

技企业 (*TFirm*), 用人均科技型中小企业注册数量的对数来衡量, 数据来自企查查网站 (<https://www.qcc.com>); ③ 风险投资 (*PEVC*), 用私募股权投资 (*PE*) 和风险投资 (*VC*) 之和的对数来测度, 数据来自万得数据库 (<https://www.wind.com.cn>)。

绿色知识和科技企业指标分别反映了两种不同类型的城市活动, 前者反映了科研人员遵循自然规律的知识创造活动, 后者反映了潜在企业家遵循市场规律的企业创办活动。考虑到风险投资可能会促进绿色知识产出和科技企业孵化, 因此本文采用链式多重中介效应模型来考察网络地位影响碳排放效率的中介渠道。由于绿色知识产出和科技企业数量的相关性较高 (相关系数达到0.7665), 为了避免共线性问题本文将这两个变量分别放入两组方程并依次进行检验。参考Baron 等的方法^[45], 构建如下链式多重中介效应模型:

$$PEVC_{it} = \eta_0 + \eta_1 NP_{it} + \sum_l \varphi_l Ctrl_{it}^l + city_i + year_t + \varepsilon_{it} \tag{5}$$

$$Mediator_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 NP_{it} + \gamma_2 PEVC_{it} + \sum_l \varphi_l Ctr_{it}^l + city_i + year_t + \varepsilon_{it} \tag{6}$$

$$UCEE_{it} = \theta_0 + \theta_1 NP_{it} + \theta_2 PEVC_{it} + \theta_3 Mediator_{it} + \sum_l \varphi_l Ctr_{it}^l + city_i + year_t + \varepsilon_{it} \tag{7}$$

式中: *Mediator* 为受到风险投资影响的中介变量, 分别用绿色知识产出和科技企业数量测度; η_0 、 η_1 、 γ_0 、 γ_1 、 γ_2 、 θ_0 、 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 为待估计的参数; 其他变量的含义与式(4)相同。链式多重中介模型的估计结果见表8。

表8中(1)~(5)列报告了用度数来测度网络地位时的链式多重中介模型估计结果。(1)列以*PEVC*为被解释变量, 可以发现度数的拟合系数 (η_1) 在5%的水平上显著为正值; (2)列以*GPatent*为被解释变量, 风险资本的系数 (γ_2) 在1%的水平上显著为正值; (3)列以*UCEE*为被解释变量, 风险资本的系数 (θ_2) 和绿色知识产出的系数 (θ_3) 也均显著为正值。分析结果表明度数不仅通过风险资本投资和绿色知识创新两个独立的中介渠道提升城市碳排放效率, 还通过“风险资本投资→绿色知识创新”的链式中介渠道提升城市碳排放效率。(1)、(4)和(5)列进一步检验了风险资本投资和科技企业孵化的中介效应, 结果发现度数通过风险资本投资和科技企业孵化两个独立的中介渠道以及“风险资本投资→科技企业孵化”的链式中介渠道提升城市碳排放效率。因此, 理论假说2得到初步验证。

表8 链式多重中介效应模型检验结果(n=1132)
Tab. 8 Test results of chain multiple mediation models

	<i>PEVC</i>	<i>GPatent</i>	<i>UCEE</i>	<i>TFirm</i>	<i>UCEE</i>	<i>PEVC</i>	<i>GPatent</i>	<i>UCEE</i>	<i>TFirm</i>	<i>UCEE</i>
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
<i>GPatent</i>			0.0407*** (0.012)					0.0399*** (0.012)		
<i>TFirm</i>					0.0048*** (0.001)					0.0046*** (0.001)
<i>PEVC</i>		0.0855*** (0.010)	0.0109*** (0.004)	0.8995*** (0.081)	0.0097** (0.004)		0.0824*** (0.010)	0.0113*** (0.004)	0.9120*** (0.080)	0.0102** (0.004)
<i>Degree</i>	0.1728** (0.084)	0.2328*** (0.029)	0.0261* (0.015)	1.1128*** (0.300)	0.0299** (0.015)					
<i>Eigen</i>						0.0326*** (0.007)	0.0218*** (0.003)	0.0031** (0.001)	0.1213*** (0.027)	0.0033** (0.001)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是

注: (1)和(6)列报告了方程(5)的固定效应面板模型估计结果,(2)、(4)、(7)和(9)列报告了方程(6)的固定效应面板模型估计结果,(3)、(5)、(8)和(10)列报告了方程(7)的随机效应面板Tobit模型估计结果。

表8中(6)~(10)列报告了用特征根来测度网络地位时的链式多重中介模型估计结果。(6)列中特征根的拟合系数(η_1) 在1%的水平上显著为正值,表明特征根的提升增加了城市的风险投资;(7)列中风险资本的系数(γ_2) 在1%的水平上显著为正值,表明在控制特征根的情况下风险资本促进了城市绿色知识产出;(8)列中风险资本和绿色知识产出的系数(θ_2 和 θ_3) 也均显著为正值,表明在控制特征根的情况下风险资本和绿色知识产出均促进了城市碳排放效率。分析结果意味着,特征根也通过风险资本投资和绿色知识创新两个独立的中介渠道以及“风险资本投资→绿色知识创新”的链式中介渠道提升城市碳排放效率。(6)、(9)和(10)列的结果也进一步表明,在以特征根来测度网络地位的环境下,风险资本投资同时发挥了独立中介效应和链式中介效应,科技企业孵化发挥了独立中介效应。总体来看,理论假说2得到进一步检验。

5.2 多维度异质性检验

本文采用 Chow 检验方法,在基准方程中加入城市网络地位与组分虚拟变量(Class)的交叉项,来检验网络地位对城市碳排放效率影响的多维度异质性。模型设定如下:

$$UCEE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 NP_{it} + \alpha_2 NP_{it} \times Class_i + \sum_l \phi_l Ctr l_{it}^l + city_i + year_i + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

式中: $NP \times Class$ 表示网络地位与组分虚拟变量的交叉项;其他变量的含义与式(4)相同。为了增加分析结果的可靠性,本文不仅检验了城市在全国尺度的整体网络中地位特征的影响,还检验了城市在不同分组的局部网络中地位特征的影响。组分虚拟变量(Class)为二值变量,其中焦点城市编码为1,其他城市编码为0。

为了检验网络地位对城市碳排放效率影响的空间异质性,本文将城市按照地理区位划分为东部、中部和西部3个组分^③,并构建了East、Central和West 3个地理区位虚拟变量。其中,如果城市在东部地区East = 1,否则East = 0;如果城市在中部地区Central = 1,否则Central = 0;如果城市在西部地区West = 1,否则West = 0。考虑篇幅关系,本文仅仅报告了网络地位用度数来测度时的空间异质性检验结果(表9),网络地位用中介度和特征根来测度时的分析结果类似。从表9中可以发现,无论是在整体网络和局部网络中,Degree×East的拟合系数均显著为正值,而Degree×West的系数显著为负值,表明

表9 空间异质性的检验结果($n=1132$)

Tab. 9 Results of spatial heterogeneity test

	整体网络			局部网络		
	东部	中部	西部	东部	中部	西部
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Degree	0.0054 (0.018)	0.0397** (0.016)	0.0635*** (0.016)	0.0071 (0.008)	0.0232*** (0.007)	0.0307*** (0.006)
Degree×East	0.0748*** (0.021)			0.0325*** (0.010)		
Degree×Central		-0.0100 (0.024)			-0.0025 (0.010)	
Degree×West			-0.0942*** (0.022)			-0.0375*** (0.011)
控制变量	是	是	是	是	是	是

③ 东部包括北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南,中部包括辽宁、吉林、黑龙江、山西、安徽、江西、河南、湖北和湖南,西部包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆。

度数对东部城市碳排放效率的促进作用明显高于中西部城市，而对西部城市碳排放效率的促进作用显著低于东中部城市； $Degree \times Central$ 的系数不显著，表明度数和碳排放效率的关系在中部城市、东西部城市的分组之间不存在显著差异。此外，也可以观测到，相对于局部网络而言，整体网络分析中度数的拟合系数具有更高的绝对值，表明城市碳排放效率更多受到在国内市场大循环中的嵌入特征的影响。

接着本文将城市按照类别进行分组，构建类别虚拟变量，并进行了网络地位影响的类别异质性检验。按照资源基础，城市被分为资源型城市（焦点城市的类别虚拟变量 $Resource = 1$ ）和非资源型城市（ $Resource = 0$ ），其中资源型城市名单来自2013年国务院发布的《全国资源型城市可持续发展规划（2013—2020年）》（http://www.gov.cn/zwggk/2013-12/03/content_2540070.htm）；按照人口规模，城市被分为较大城市（ $Size = 1$ ）和较小城市（ $Size = 0$ ），其中较大（较小）城市指的是2020年市区人口大于（小于）100万的城市；按照行政级别，城市被分为级别较高城市（ $Political = 1$ ）和级别较低城市（ $Political = 0$ ），其中前者包括直辖市、省会城市和计划单列市，后者为普通地级城市。表10报告了度数的检验结果，网络地位用中介度和特征根来测度时的分析结果类似。可以观测到，在整体网络分析结果中 $Degree \times Resource$ 的系数显著为负值，而 $Degree \times Size$ 和 $Degree \times Political$ 的系数显著为正值；局部网络的分析结果具有相似的特征，但是交叉项的拟合系数明显变小且 $Degree \times Resource$ 的系数不再显著。分析结果表明：相对于资源型城市、规模较小城市和行政等级较低城市，网络地位的碳减排效应在非资源型城市、规模较大城市和行政等级较高城市更加明显；相对于局部网络，城市在全国尺度网络联系中的地位特征对碳排放效率具有更大的边际影响。

分析结果表明，2005—2020年东部城市、非资源型城市、规模较大城市和行政等级较高城市依托强大的网络资源利用能力，借助网络嵌入提高了自身的碳排放效率，而西部城市、资源型城市、规模较小城市和行政等级较低的城市，由于“知识守门人”的缺失，没有能够充分利用网络资源改善自身的碳排放效率。分析结果不仅呼应了Meijers等^[38]、江艇等^[39]的研究，即城市的人口规模、行政级别正向影响着城市的吸收能力，还呼应了Wang等^[46]关于资源型城市碳减排的研究结论，即大量自然资源丰富的城市陷入到了“资源诅咒”的困境。总体来看，理论假说3得到验证，即网络地位对城市碳排放效率的促进作用受到城市对网络资源吸收利用能力的深刻影响。分析结果也意味着，2005—2020年网络地位在不同维度上加大了中国城市碳排放效率的发展差距。

表 10 类型异质性的检验结果($n=1132$)
Tab. 10 Results of type heterogeneity test

	整体网络			局部网络		
	资源基础	人口规模	行政等级	资源基础	人口规模	行政等级
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Degree</i>	0.0438*** (0.015)	0.0042 (0.019)	0.0214 (0.017)	0.0249*** (0.007)	-0.0016 (0.009)	0.0058 (0.007)
<i>Degree</i> × <i>Resource</i>	-0.0464*** (0.013)			-0.0083 (0.010)		
<i>Degree</i> × <i>Size</i>		0.0377*** (0.014)			0.0313*** (0.011)	
<i>Degree</i> × <i>Political</i>			0.0671** (0.030)			0.0300** (0.013)
控制变量	是	是	是	是	是	是

6 结论和讨论

6.1 结论

提升城市碳排放效率是中国实现“双碳”目标和经济社会可持续发展的关键。本文利用中国制造业 500 强企业投资联系数据构建城市网络,采用数据包络分析(DEA)中窗口模型和超效率 SBM 模型相结合的方法测度城市碳排放效率,在此基础上研究了 2005—2020 年城市网络地位对碳排放效率的影响。研究发现:① 网络地位的增强在整体上有助于提升城市碳排放效率,该结论在替换碳排放效率测度方法、考虑空间依赖效应和应对内生性问题后仍然成立,表明网络联系为城市在更大空间尺度上平衡经济增长和碳减排的关系提供了基础。② 网络地位不仅通过价值链重组效应、中间产品多样化效应和网络竞争效应改善城市的全要素碳排放效率,还通过促进城市绿色知识创新、科技企业孵化和风险资本投资的中介机制正向影响着城市的碳排放效率。③ 网络地位对城市碳排放效率的影响呈现多维异质性,相对于西部城市、资源型城市、人口规模较小城市和行政等级较低城市,东部城市、非资源型城市、人口规模较大城市和行政等级较高城市的碳排放效率更多从网络地位的增强中获益。

6.2 讨论

当前关于城市碳排放效率的研究主要集中在场所空间的视角,未能关注到城市网络的快速发展所带来的深刻影响^[3]。本文研究发现,城市网络为城市在更大空间尺度上平衡经济增长和碳减排的关系提供了基础。这表明对城市碳排放效率来源的解析需要超越 Harris 等所说“城市第一本质”即集聚经济的视角^[47],高度重视 Taylor 所说的“城市第二本质”即网络经济的积极影响^[48]。不仅如此,在流动空间环境下城市可以超越地理临近性的限制,从远距离的合作伙伴获得关键资源,因此相对于场所空间环境下的地理区位,流动空间中的网络地位变得越来越重要。从这个意义上讲,网络地位可以被视为 Huggins 等提出的关系资产的一种关键形式^[49],它构成了更广阔意义上的城市碳排放效率的重要来源。这也意味着,推动城市经济突破本地和区域空间尺度,积极融入国内大循环和国家城市网络,将为提升碳排放效率提供更加广阔的空间。

由于集聚经济和网络经济对城市发展的影响可能随着经济基础、制度环境和空间尺度发生变化,澄清集聚经济和网络经济的相互关系变得十分迫切。在欧洲国家的城市发展过程中,无论是 Alonso 关于借用规模(borrowed size)的研究还是 Meijers 等关于借用绩效(borrowed performance)的研究都表明^[38],网络经济似乎是集聚经济的替代品。本文研究发现,那些具有更高集聚经济的城市从网络联系中获得了更大的收益。这意味着,在中国快速城市化的发展环境下,集聚经济对于增强城市从网络经济中的获益能力发挥了积极作用。本文结果呼应了 Huggins 等^[49]、Shi 等^[25]的结论,即网络经济和集聚经济存在协同效应,这导致了网络化的集聚经济(networked agglomeration economies)。因此在提升城市碳排放效率的过程中,应着力改善城市对网络资源吸收能力,并立足本地基础、采取差异化的发展路径。

本文结果对于提升中国城市碳排放效率具有两点政策启示。① 将碳达峰碳中和目标愿景与国家城市网络建设结合起来,使中国城市在网络联系中实现碳排放效率的提升。未来应依托全国统一的资本、产权市场建设,在国家尺度上推进城市网络发展,为城市产业结构调整、低碳经济发展和绿色知识生产提供更大的空间和更多的资源。同时充分释放城市网络联系的库兹涅茨式结构优化效应和熊彼特式创造性破坏效应,在更大的网络空间上平衡经济增长和碳减排的关系,实现城市网络联系与低碳发展的良性互动。② 高

度关注网络联系对城市碳排放效率的多维度异质性影响,推动中国低碳城市建设的协调发展。东部城市、非资源型城市、人口规模较大城市和行政等级较高城市应在着力增强创新发展能力的同时,推动价值链区块、绿色知识和创新资源在城市体系中顺畅流动,增强对低碳发展的辐射带动作用。同时支持西部城市、资源型城市、人口规模较小城市和行政等级较低城市通过推进新型工业化进程、构建本土创新体系、培育科技型企业等举措,增强对网络资源的吸收能力,提升网络经济对碳排放效率的促进作用。

本文主要考虑了直接能源消费带来的城市碳排放,对间接能源消费带来的碳排放考虑不足,未来需要继续丰富城市碳排放规模的测度指标,以检验城市网络地位与碳排放效率关系的稳健性。在基于不同媒介的网络联系中,网络经济的来源和特征可能存在差异,这也需要开展进一步的检验。特别是,考虑到城市体系作为多层网络体系的本质特征^[50],多层网络联系的碳减排效应研究显得尤为重要。此外不同网络地位测度指标的影响机理可能存在差异,未来需要进一步区分度数、中介度和特征根影响机理的差异性,也需要进一步检验核心度、接近中心度等其他网络地位测度指标对城市碳排放效率的影响。

参考文献(References)

- [1] Nordhaus W D. The Spirit of Green. Princeton: Princeton University Press, 2021.
- [2] Cai B F, Cui C, Zhang D, et al. China city-level greenhouse gas emissions inventory in 2015 and uncertainty analysis. *Applied Energy*, 2019, 253: 113579. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113579.
- [3] Wang S J, Wang Z H, Fang C L. Evolutionary characteristics and driving factors of carbon emission performance at the city level in China. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(7): 1292-1307.
- [4] Cheng Yeqing, Wang Zheyue, Zhang Shouzhi, et al. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(10): 1418-1431. [程叶青, 王哲野, 张守志, 等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量. *地理学报*, 2013, 68(10): 1418-1431.]
- [5] Capello R. The city network paradigm: Measuring urban network externalities. *Urban Studies*, 2000, 37(11): 1925-1945.
- [6] Sheng Kerong, Zhang Jie, Zhang Hongxia. Network embedding and urban economic growth in China: A study based on the corporate networks of top 500 public companies. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 818-834. [盛科荣, 张杰, 张红霞. 上市公司500强企业网络嵌入对中国城市经济增长的影响. *地理学报*, 2021, 76(4): 818-834.]
- [7] Liu Chengliang, Guan Mingming, Duan Dezhong. Spatial pattern and influential mechanism of interurban technology transfer network in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(8): 1462-1477. [刘承良, 管明明, 段德忠. 中国城际技术转移网络的空间格局及影响因素. *地理学报*, 2018, 73(8): 1462-1477.]
- [8] Huang Qunhui, He Jun. The core capability, function and strategy of Chinese manufacturing industry: Comment on "Chinese Manufacturing 2025". *China Industrial Economics*, 2015(6): 5-17. [黄群慧, 贺俊. 中国制造业的核心能力、功能定位与发展战略: 兼评《中国制造2025》. *中国工业经济*, 2015(6): 5-17.]
- [9] Xu L, Fan M T, Yang L L, et al. Heterogeneous green innovations and carbon emission performance: Evidence at China's city level. *Energy Economics*, 2021, 99: 105269. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105269.
- [10] Liu B Q, Tian C, Li Y Q, et al. Research on the effects of urbanization on carbon emissions efficiency of urban agglomerations in China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197: 1374-1381.
- [11] Wang Shaojian, Huang Yongyuan. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1131-1148. [王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素. *地理学报*, 2019, 74(6): 1131-1148.]
- [12] Xu Yingqi, Cheng Yu, Wang Jingjing, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emission efficiency in low carbon city of China. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(5): 1261-1276. [徐英启, 程钰, 王晶晶, 等. 中国低碳试点城市碳排放效率时空演变与影响因素. *自然资源学报*, 2022, 37(5): 1261-1276.]
- [13] Sun L X, Li W. Has the opening of high-speed rail reduced urban carbon emissions? Empirical analysis based on panel data of cities in China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128958. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128958.
- [14] Xu Weixiang, Zhou Jianping, Liu Chengjun. The impact of digital economy on urban carbon emissions: Based on the analysis of spatial effects. *Geographical Research*, 2022, 41(1): 111-129. [徐维祥, 周建平, 刘程军. 数字经济发展对城

- 市碳排放影响的空间效应. 地理研究, 2022, 41(1): 111-129.]
- [15] Guo Yi, Cao Xianzhong, Wei Wendong, et al. The impact of regional integration in the Yangtze River Delta on urban carbon emissions. *Geographical Research*, 2022, 41(1): 181-192. [郭艺, 曹贤忠, 魏文栋, 等. 长三角区域一体化对城市碳排放的影响研究. 地理研究, 2022, 41(1): 181-192.]
- [16] Zhou Di, Zhou Fengnian, Wang Xueqin. Impact of low-carbon pilot policy on the performance of urban carbon emissions and its mechanism. *Resources Science*, 2019, 41(3): 546-556. [周迪, 周丰年, 王雪芹. 低碳试点政策对城市碳排放绩效的影响评估及机制分析. 资源科学, 2019, 41(3): 546-556.]
- [17] Ding Fei, Zhuang Guiyang, Liu Dong. Environmental regulation, industrial agglomeration and urban carbon emission intensity: Empirical analysis based on panel data of 282 prefectural-level cities in China. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2020, 20(3): 90-104. [丁斐, 庄贵阳, 刘东. 环境规制、工业集聚与城市碳排放强度: 基于全国282个地级市面板数据的实证分析. 中国地质大学学报(社会科学版), 2020, 20(3): 90-104.]
- [18] Wu Kang, Fang Chuanglin, Zhao Miaoqi. The spatial organization and structure complexity of Chinese intercity networks. *Geographical Research*, 2015, 34(4): 711-728. [吴康, 方创琳, 赵渺希. 中国城市网络的空间组织及其复杂性结构特征. 地理研究, 2015, 34(4): 711-728.]
- [19] Pan F, Bi W, Liu X, et al. Exploring financial centre networks through inter-urban collaboration in high-end financial transactions in China. *Regional Studies*, 2020, 54(2): 162-172.
- [20] Sheng Kerong, Yang Yu, Zhang Hongxia. Cohesive subgroups and underlying factors in the urban network in China. *Geographical Research*, 2019, 38(11): 2639-2652. [盛科荣, 杨雨, 张红霞. 中国城市网络的凝聚子群及影响因素研究. 地理研究, 2019, 38(11): 2639-2652.]
- [21] Li Tao, Zhou Rui. Urban hinterworld in Yangtze River Delta: Empirical comparison of two network-based methods. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 236-250. [李涛, 周锐. 长三角地区网络腹地划分的关联测度方法比较. 地理学报, 2016, 71(2): 236-250.]
- [22] Peng Chong, Lin Yingzi, Gu Chaolin. Evaluation and optimization strategy of city network structural resilience in the middle reaches of Yangtze River. *Geographical Research*, 2018, 37(6): 1193-1207. [彭翀, 林樱子, 顾朝林. 长江中游城市网络结构韧性评估及其优化策略. 地理研究, 2018, 37(6): 1193-1207.]
- [23] Sun Dongqi, Lu Dadao, Sun Bindong, et al. From network description to network performance: Preface to the special issue "Urban Network Externalities". *Geographical Research*, 2022, 41(9): 2325-2329. [孙东琪, 陆大道, 孙斌栋, 等. 从网络描述走向网络绩效: “城市网络外部性”专辑序言. 地理研究, 2022, 41(9): 2325-2329.]
- [24] Pan F, Yang C, Wang H, et al. Linking global financial networks with regional development: A case study of Linyi, China. *Regional Studies*, 2020, 54(2): 187-197.
- [25] Shi S A, Wong S K, Zheng C. Network capital and urban development: An inter-urban capital flow network analysis. *Regional Studies*, 2022, 56(3): 406-419.
- [26] Cao Zhan, Dai Liang, Yang Yu, et al. Knowledge collaboration patterns of Chinese cities and their impacts on knowledge output: An empirical study based the "buzz-and-pipelines" model. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(4): 960-975. [曹湛, 戴靓, 杨宇, 等. 基于“蜂鸣—管道”模型的中国城市知识合作模式及其对知识产出的影响. 地理学报, 2022, 77(4): 960-975.]
- [27] Zhao Miaoqi, Wang Yankai, Hu Yuke, et al. Examining performance of urban borrowed size based on the towns' network externalities of Guangzhou-Foshan metropolitan areas. *Geographical Research*, 2022, 41(9): 2367-2384. [赵渺希, 王彦开, 胡雨珂, 等. 广佛都市圈网络外部性的城镇借用规模绩效检验. 地理研究, 2022, 41(9): 2367-2384.]
- [28] Ding Liang, Xu Zhiqian, Zhang Junshen, et al. Spatial heterogeneity of urban network externalities in the Yangtze River Delta. *Geographical Research*, 2022, 41(9): 2433-2447. [丁亮, 徐志乾, 章俊岫, 等. 长三角城市网络外部性的空间异质性. 地理研究, 2022, 41(9): 2433-2447.]
- [29] Krugman P. Increasing returns and economic geography. *Journal of Political Economy*, 1991, 99(3): 483-499.
- [30] Romer P M. Growth based on increasing returns due to specialization. *The American Economic Review*, 1987, 77(2): 56-62.
- [31] Ethier W J. National and international returns to scale in the modern theory of international trade. *American Economic Review*, 1982, 72(3): 389-405.
- [32] Aghion P, Howitt P W. *The Economics of Growth*. Cambridge: MIT Press, 2008.
- [33] Bathelt H, Malmberg A, Maskell P. Clusters and knowledge: Local buzz, global pipelines and the process of knowledge creation. *Progress in Human Geography*, 2004, 28(1): 31-56.
- [34] Weitzman M L. Recombinant growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 1998, 113(2): 331-360.

- [35] Acs Z J, Audretsch D B, Lehmann E E. The knowledge spillover theory of entrepreneurship. *Small Business Economics*, 2013, 41(4): 757-774.
- [36] Kortum S, Lerner J. Assessing the contribution of venture capital to innovation. *RAND Journal of Economics*, 2000, 31(4): 674. DOI: 10.2307/2696354.
- [37] Cohen W M, Levinthal D A. Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 1990, 35(1): 128. DOI: 10.2307/2393553.
- [38] Meijers E J, Burger M J, Hoogerbrugge M M. Borrowing size in networks of cities: City size, network connectivity and metropolitan functions in Europe. *Papers in Regional Science*, 2016, 95(1): 181-198.
- [39] Jiang Ting, Sun Kunpeng, Nie Huihua. Administrative rank, total factor productivity and resource misallocation in Chinese cities. *Management World*, 2018, 34(3): 38-50, 77, 183. [江艇, 孙鲲鹏, 聂辉华. 城市级别、全要素生产率 and 资源错配. *管理世界*, 2018, 34(3): 38-50, 77, 183.]
- [40] Alderson A S, Beckfield J. Power and position in the world city system. *American Journal of Sociology*, 2004, 109(4): 811-851.
- [41] Cooper W W, Seiford L M, Tone K. *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. New York: Springer, 2007.
- [42] Kuang B, Liu J J, Fan X Y. Has China's low-carbon city construction enhanced the green utilization efficiency of urban land? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(16): 9844. DOI: 10.3390/ijerph19169844.
- [43] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [44] Huang Rui, Wang Zheng, Ding Guanqun, et al. Trend prediction and analysis of influencing factors of carbon emissions from energy consumption in Jiangsu province based on STIRPAT model. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 781-789. [黄蕊, 王铮, 丁冠群, 等. 基于 STIRPAT 模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测. *地理研究*, 2016, 35(4): 781-789.]
- [45] Baron R M, Kenny D A. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1986, 51(6): 1173. DOI: 10.1037/0022-3514.51.6.1173.
- [46] Wang K Y, Wu M, Sun Y P, et al. Resource abundance, industrial structure, and regional carbon emissions efficiency in China. *Resources Policy*, 2019, 60: 203-214.
- [47] Harris C D, Ullman E L. The nature of cities. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 1945, 242(1): 7-17.
- [48] Taylor P J. *World Cities Network: A Global Urban Analysis*. London: Routledge, 2004.
- [49] Huggins R, Thompson P. A network-based view of regional growth. *Journal of Economic Geography*, 2014, 14(3): 511-545.
- [50] Bianconi G. *Multilayer Networks: Structure and Function*. Oxford: Oxford University Press, 2018.

Examining the impacts of network position on urban carbon emissions efficiency in China

SHENG Kerong¹, LI Xiaorui¹, SUN Wei^{2,3}, WANG Chuanyang⁴

(1. School of Economics, Shandong University of Technology, Zibo 255012, Shandong, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130102, China)

Abstract: Improving the urban carbon emissions efficiency (UCEE) is the key for China to achieving carbon peaking and carbon neutrality goals and enhancing sustainable development capabilities. In recent years, increased attention has been given to the role of city network economies in promoting factor productivity and economic growth. However, it is still unknown whether network position of cities translates into a higher level of UCEE. This paper sets out to explore the impact of network position on UCEE through the lens of investment networks of China's top 500 manufacturing enterprises. To this end, the Window model and super-efficient SBM model in data envelopment analysis (DEA) are combined to measure the total factor carbon emissions efficiency of cities. In addition, a set of panel Tobit models are employed to assess the positive influence, transmission channels and multidimensional heterogeneity of cities' network position. The analysis finds that: (1) Network position has a significant positive impact on UCEE. The conclusion is still valid considering the replacement of carbon emissions efficiency measurement methods, spatial autocorrelation effects, and endogeneity issues. This result confirms that network linkages provide a basis for cities to balance economic growth and carbon emissions reduction on a larger spatial scale. (2) Two types of effects through which network position enhances UCEE are identified. On the one hand, network position exerts a direct effect through value chain reorganization, intermediate product diversification and network competition. On the other hand, green knowledge innovation, technology-based enterprise incubation and venture capital investment play mediation roles between network position and UCEE. (3) The influence of network position on UCEE is heterogeneous. The carbon emissions efficiency of eastern cities, non-resource-based cities, cities with larger population size and cities with higher administrative rank benefit more from the enhancement of network position. This indicates that network linkages have increased the inter-city gaps of carbon emissions efficiency in China on different dimensions over the past 20 years. The paper provides important implications for policymakers. In the future, the Chinese government should combine the "dual carbon" goal with the construction of city networks, and give full play to the role of network economies in promoting UCEE. Besides, great efforts should also be made to narrow the multidimensional UCEE gaps to achieve a balanced low-carbon society.

Keywords: city network; carbon emissions efficiency; panel Tobit model; chain mediation effect; network economies; space of flows