

盛科荣, 李晓瑞, 吴石磊, 等. 中国城市多层网络嵌入对能源利用效率的影响 [J]. 地理科学, 2025, 45(3): 495-505. [Sheng Kerong, Li Xiaorui, Wu Shilei et al. Examining impacts of multilayer network embeddedness on energy utilization efficiency of Chinese cities. Geographical Science, 2025, 45(3): 495-505.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20240049; cstr: 32176.14.geoscien.20240049

中国城市多层网络嵌入对能源利用效率的影响

盛科荣, 李晓瑞, 吴石磊, 李亚泽

(山东理工大学经济学院, 山东 淄博 255000)

摘要: 采用上市公司 500 强企业网络数据、专利权转让数据和航班数据构建中国多层城市网络, 实证检验了多层网络嵌入对中国城市能源利用效率的影响及特征。研究发现: ① 城市多层度数中心性和多层 PageRank 中心性对能源利用效率具有显著正向影响, 结论在一系列稳健性检验后依然成立, 表明城市多层网络中心性成为能源利用效率的重要来源。② 多层网络嵌入的能源利用效率提升效应随城市绿色创新水平、创业孵化能力、产业结构高级化水平和数字经济发展水平趋于增强, 表明城市吸收能力正向调节着多层网络嵌入与能源利用效率的关系。③ 非资源型城市和资源型城市的能源利用效率分别受益于多层 PageRank 中心性和多层度数中心性的提升, 中西部城市能源利用效率从多层网络嵌入中获得的收益明显高于东部城市。城市多层网络嵌入的研究必然对城市能源利用效率产生重要影响。

关键词: 多层城市网络; 能源利用效率; 吸收能力; 网络资本; 流动空间

中图分类号: F127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2025)03-0495-11

中国已经成为世界一次能源消费和碳排放的第一大国^[1], 能源消费和碳排放的持续增长带来了一系列的生态环境问题。聚焦城市这一能源消费的主要载体, 探究城市能源利用效率的主要来源和提升方向, 成为中国经济高质量发展亟待解决的重要现实问题。与此同时, 中国城市体系已经变成了一个由多个单层关系网络相互耦合形成的多层网络系统^[2-4], 中国城市越来越多的作为流动空间的网络节点和经济平台而存在^[5]。在这种背景下, 城市在多层网络中的嵌入特征作为城市发展的一种关键资产^[6], 必然对城市能源利用效率产生越来越重要的影响。然而, 多层网络嵌入对中国城市能源利用效率的影响这一重要现象尚未引起学术界的重视, 这也是本文的核心研究问题。

相关研究主要沿着 2 个脉络展开。一是能源利用效率影响因素的研究。已有文献揭示了技术进步^[7]、产业结构和能源价格^[8]对能源利用效率的影响机理, 也揭示了数字经济^[9]、产业集聚^[10]和市场环境^[11]等诸多因素的作用机制。但是这些文献忽略了流动空间带来的影响, 这限制了能源利用效率来源研究的视野及其结论的解释能力。二是城市网络经济效应的研究。在理论层面, 借用规模、借用绩效、网络外部性和网络资本等概念框架被提出^[6,12-13]。随着城市网络经济效应的实证研究日益增多, 这些研究从不同维度提供了城市网

收稿日期: 2024-01-24; **修订日期:** 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42371209)、山东省自然科学基金项目(ZR2023MD049)、山东省社会科学规划研究项目(25BLJJ12)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (42371209), Natural Science Foundation of Shandong Province of China (ZR2023MD049), Social Science Foundation of Shandong Province of China (25BLJJ12).]

作者简介: 盛科荣(1977—), 男, 山东日照人, 教授, 硕导, 主要从事城市网络和地域功能理论的研究。E-mail: shengkerong@163.com

通信作者: 吴石磊。E-mail: leishiwuwushilei@126.com

络地位与经济增长存在正向关系的经验证据^[14-16]。但目前关于城市网络和能源利用效率的研究仍然是割裂的,忽略了多层城市网络在平衡经济增长和能源消费关系方面的作用。

基于以上考虑,本文采用上市公司 500 强企业网络数据、专利权转让数据和航班数据构建多层城市网络,实证检验了多层网络嵌入对中国城市能源利用效率的影响及特征。本文主要在 3 个方面做出了创新性探索:①基于多层网络视角开展研究,分析结果能够更加全面的评估城市的网络嵌入特征及其对能源利用效率的影响;②构建一个理解城市网络发展与能源利用效率关系的分析框架,将城市能源利用效率与城市对外部网络空间、关键资源的有效利用联系起来;③基于城市吸收能力视角系统探究多层网络嵌入对城市能源利用效率的非对称影响,加深城市网络经济与集聚经济相互关系的讨论。

1 理论分析与研究假设

城市可以通过嵌入多层网络,集聚具有比较优势的产业链区块,形成具有地方特色的绿色技术创新体系,进而提升城市能源利用效率。城市还可以通过参与更大的经济循环,获得更多的互补性知识资源和多样化中间产品,放大重组式增长的潜力,带来动态的能源利用效率收益^[17]。在这种背景下,具有更高度数中心性的城市往往占据着更高的产业链分工地位,具有更加便利的航空可达性,可以访问、共享和使用对创新活动至关重要的互补性和异构性知识^[18],形成更大的多样化要素耦合效应,从而具有更高的能源利用效率。不仅如此,如果城市的多层 PageRank 中心性越高,那么城市也将有更多机会承接高附加值的生产阶段转移,在调节、控制多样化知识跨界流动方面形成更大的优势^[19],能够吸收更多新鲜的、异构性网络知识和企业家精神,从而更好的提升能源利用效率。

由此提出理论假说 1:城市在多层网络中的嵌入地位成为能源利用效率的重要来源,多层度数中心性、多层 PageRank 中心性的提高都会提升城市能源利用效率。

多层网络中心性对能源利用效率的提升效应可能会受到城市吸收能力的正向调节。城市吸收能力代表着城市抓住多层网络链接带来的潜在生产率提升机会并将这些机会转化为现实生产率的能力^[20]。具有较高吸收能力的城市能够更有针对性的筛选、获取与城市发展相匹配的产业链区块、关键技术和专业人才,具有更好的资源重组和利用能力,能够更好的发挥产业链、创新链的耦合效应,能够更有效的将网络资源转化为自身的经济效率。低吸收能力城市往往缺少人力资本、研发投入和知识守门人,这将限制外部知识转化为经济绩效的能力;这些城市只能吸引、集聚价值链中的低端制造环节,使得能源利用效率的提升受到限制;多层网络链接带来的市场竞争还可能会加大这些城市关键资源流失的风险,这将进一步影响这些城市的能源利用效率和发展前景。

由此提出理论假说 2:城市吸收能力正向调节着多层网络嵌入与能源利用效率的关系,吸收能力更强的城市从多层网络嵌入中获得的能源利用效率提升效应更加强烈。

多层网络嵌入对城市能源利用效率影响可能具有多维度异质性。一方面,多层网络嵌入对资源型城市和非资源型城市能源利用效率的影响可能存在差异。资源型城市中高耗能、高排放的产业占据主体,这些城市通过融入多层网络来集聚现代生产要素和增强科技创新能力的潜力较大,因此增加链接的广度对能源利用效率将会产生较高的边际促进作用。非资源型城市的产业结构多元化和合理化程度较高,这些城市加强与网络中的创新热点城市相链接变得越来越重要。另一方面,多层网络嵌入对城市能源利用效率的影响可能存在区域异质性。东部地区(经济区域根据“七五”计划的区域划分方法界定, <https://www.stats.gov.cn/sj/nds/2023/indexch.htm>)城市具有较高的网络地位和能源利用效率^[21],也是现代产业和创新主体的主要集聚区。这些通过与中西部城市结网带来的互补性资源较少,网

络嵌入对于能源利用效率的提升效应可能较弱。中西部地区城市通过与东部创新热点城市结网能够带来大量高价值的网络资源,网络链接对于能源利用效率可能会产生较大的促进作用。

由此提出理论假说 3: 多层网络嵌入对城市能源利用效率的影响在网络地位、地理区位维度都呈现出异质性特征。

2 研究方法与数据来源

2.1 城市多层网络嵌入特征的测度方法

1) 建立起城际企业网络(G_f)、知识网络(G_k)和航空网络(G_p)这 3 个单层城际网络, 这里: G 表示由城市节点和城际链接关系构成的网络图, f , k 和 p 分别为企业网络、知识网络和航空网络的关系类型编码。其中, 城际企业网络基于 Alderson 等的隶属联系模型^[22], 采用中国上市公司 500 强企业总部-分支机构数据构建; 城际知识网络借鉴刘承良等^[3]的做法, 采用专利权转让数据构建; 城际航空网络借鉴王姣娥等^[4]的做法, 采用夏秋航季中每周执飞的航班数据构建。

2) 基于 De Domenico 等^[23]的研究, 利用 G_f , G_k 和 G_p 这 3 个单层城市网络建立起“有色边多层图” M 来定义中国多层城市网络: $M=(C, \vec{G})$, 这里 $C=\{f, k, p\}$ 为网络关系的类型集合, $\vec{G}=\{G_f, G_k, G_p\}$ 为城际企业网络、知识网络和航空网络组成的列表, 并且满足所有单层网络的城市节点集合都相同的条件。按照以上思路, 本文建立起 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 4 个时期的多层城市网络。

3) 本文构建多层次度中心性和多层 PageRank 中心性^[23] 2 个相互补充的指标来测度城市的多层网络嵌入特征。其中, 多层次度中心性以焦点城市发出和接收关系的数量来衡量焦点城市的网络地位, 多层 PageRank 中心性强调了关系来源节点城市的网络权力的重要性。这 2 个指标详细的定义方法和计算过程参见文献 [23]。

2.2 城市能源利用效率的测度方法

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^[24] 测度城市能源利用效率。该方法不仅能够对位于能源利用效率前沿的城市进行更加清晰的比较和排序, 还能实现城市能源利用效率的跨期比较^[25]。

本文对 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 4 个截面的城市能源利用效率进行测度。在具体测算过程中, 投入指标为能源消费、实际资本存量、劳动力和二氧化碳排放, 产出指标为实际 GDP。其中, 能源消费以城市消费的天然气、人工煤气、液化石油气、全社会用电、蒸汽供热和热水供热之和进行测度; 资本存量采用永续盘存法进行估计, 初始资本存量以 2000 年的固定资本投资除以 10% 估算, 折旧率设定为 9.60%; 劳动力采用全市年末单位从业人员数与城镇私营和个体从业人员数之和进行测度; 二氧化碳排放包括城市产业、生活和交通领域的直接排放, 以及向外界购买电力导致的间接排放; 实际 GDP 采用 2000 年不变价格对名义 GDP 进行折算获得。

2.3 计量模型设定与变量选取

考虑到能源利用效率是典型的归并数据(censored data), 本文选择面板 Tobit 模型^[24] 开展计量检验。计量模型设定如下:

$$tfe_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \times ce_{it} + \sum_i \theta_i \times x'_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it}$$

式中, i , t 分别代表城市和年份; tfe 表示能源利用效率; ce 表示多层网络嵌入特征; x' 代表

第 l 种控制变量 ($l=1,2,\dots,k$), k 为 k 个控制变量; μ 和 ν 分别表示个体效应和年份效应; α_0 、 α_1 和 θ_l 为带估计的参数; ε 为随机扰动项。

在计量分析中,被解释变量为城市能源利用效率 (tfe),采用 DEA 方法测度出来的效率值乘 100 后取自然对数处理。核心解释变量分别用多层度数中心性 (dg) 和多层 PageRank 中心性 (pg) 2 个指标来测度,前者对原始值加 1 后取自然对数处理,后者对原始值乘以 100 并加 1 后取自然对数处理。考虑到能源利用效率的影响因素众多,本文借鉴相关文献^[7-11,24,26],在模型中引入一组控制变量,各控制变量及影响机理见表 1。

表 1 多层网络嵌入影响能源利用效率的控制变量及其作用机理

Table 1 Control variables and their mechanisms in regressing energy utilization efficiency on multi-layer network embedding

名称	符号	定义方法	影响机理
城镇化率	ur	城镇人口占总人口的比值	产生规模经济,但也大幅提高能源消耗规模
工业化水平	in	第二产业增加值占 GDP 的比值	推动产业结构升级,也是能源消费的主要来源
人力资本	re	科研、技术服务业从业人员数的自然对数	促进技术创新,改善能源利用效率
外商投资	fdi	人均外商直接投资的自然对数	带来“污染光环效应”,也产生“污染天堂效应”
行政等级	pl	直辖市为3;省会城市为2;计划单列市为1;其他城市为0	带来政治红利,也会导致经济活动过度集聚
人口密度	de	市辖区每 1 km^2 人口规模的自然对数	带来集聚经济,但人口过度集聚也带来负外部性
财政压力	fs	预算内财政支出占财政收入的比值	改善公共设施提高效率,也会导致“趋劣竞争”

2.4 数据来源

本文研究对象为中国 282 个地级以上城市(不含港澳台地区)^①,时间截面为 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年,共形成了 1 128 个观测样本。城市能源消费数据来自《中国城市统计年鉴》^[27] 和《中国城市建设统计年鉴》^[28],二氧化碳排放数据来自中国城市温室气体工作组发布的中国城市二氧化碳排放数据集^②。中国上市公司 500 强企业网络数据根据启信宝网站^③提供的企业关系族谱整理,专利权转让数据来自 incoPat 全球专利数据库^④,城市间航班数据根据 OAG^⑤航空时刻表进行整理。其他数据均来自相关年份《中国城市统计年鉴》^[27],部分缺失数据采用线性回归插值进行补充。

3 基本实证结果与分析

3.1 中国城市多层网络嵌入与能源利用效率的演化特征

2005—2020 年,中国城市多层网络中心性的演化呈现出 2 个显著特征。第一,无论从多层度数中心性还是从多层 PageRank 中心性指标来看,中国城市在多层网络中的权力地位呈现出持续的层级分化。从图 1 可知,北京、上海、广州、成都、重庆、杭州等少数城市位于网络权力的核心地位,低值区主要分布在东北地区、近西北地区和西南地区。第二,

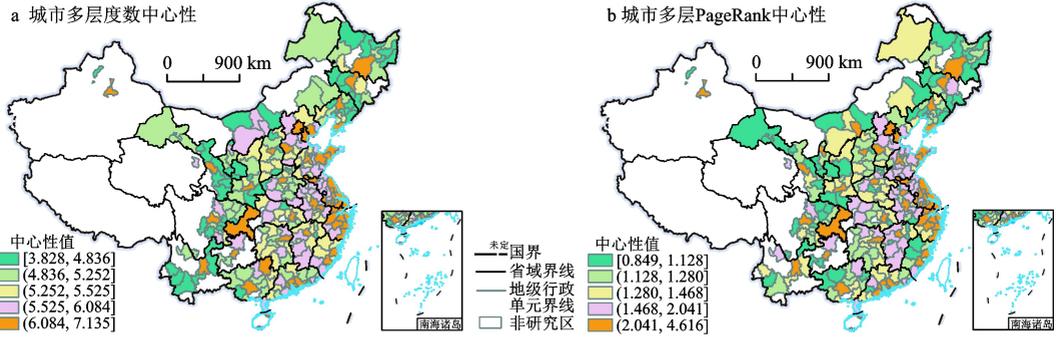
① 考虑到数据的可获得性,本文剔除了港澳台地区、7 个地区(大兴安岭地区、阿里地区、阿克苏地区、喀什地区、和田地区、塔城地区、阿勒泰地区)、30 个自治州(延边朝鲜族自治州、恩施土家族苗族自治州、湘西土家族苗族自治州等)、3 个盟(兴安盟、锡林郭勒盟、阿拉善盟)以及绥化、钦州、三沙、毕节、拉萨、日喀则等 15 个城市数据。

② <http://www.cityghg.com/toCauses?id=4> [2023-08-29]

③ <https://www.qixin.com/> [2023-08-25]

④ <https://www.incopat.com/> [2023-09-18]

⑤ <https://www.oag.com/> [2023-10-20]



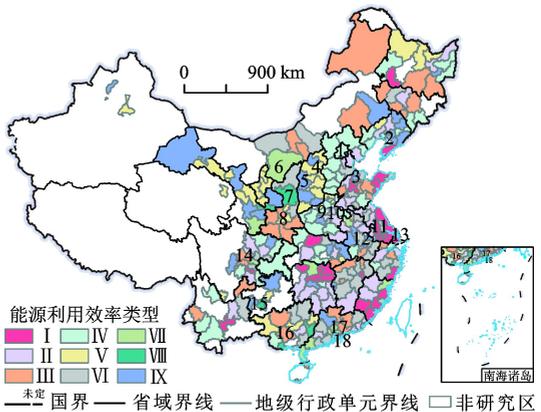
基于审图号: GS(2020)4628 号(自然资源部监制)标准地图制作, 底图无修改; 不含港澳台数据

图 1 2020 年中国城市多层网络中心性的空间格局

Fig.1 Spatial pattern of multilayer network centrality of Chinese cities in 2020

多层度数中心性分布的集中度趋于下降, 而多层 PageRank 中心性分布的集中度趋于上升。2005—2020 年, 多层度数中心性序列中前 10 个城市多层度数中心性之和的占比从 24.011% 下降到了 11.912%, 多层 PageRank 中心性序列中前 10 个城市多层 PageRank 中心性之和的占比从 17.225% 提升到了 27.288%。

2005—2020 年, 中国城市能源利用效率的平均值从 0.4696 提高到 0.5237。进一步, 本文采用自组织特征映射网络(SOFM)方法将中国城市样本划分为 9 种类型(图 2)。类型 I 为城市能源利用效率从中等上升至高等区间(27 个城市); 类型 II 为维持中等区间并且较大提高(46 个城市); 类型 III 为维持中等区间并且稳步改善(37 个城市); 类型 IV 为从低等上升至中等区间(46 个城市); 类型 V 为维持低等区间但呈上升趋势(34 个城市); 类型 VI 为保持在中等区间(43 个城市); 类型 VII 为从高等缓慢降至中等区间(11 个城市); 类型 VIII 为从高等大幅降至中等区间(5 个城市); 类型 IX 为从中等下降至低等区间(33 个城市); 能源利用效率 < 0.40 为低等区间, [0.40, 0.70] 为中等区间, > 0.70 为高等区间; 其中, 类型 I~III 的 110 个城市(如深圳、上海、南京、开封、南宁、成都)能源利用效率明显上升, 类型 IV 和类型 V 的 80 个城市(如北京、郑州、太原、西安)能源利用效率也不同程度的上升, 类型 VI 的 43 个城市(如合肥、东营)能源利用效率维持在中等水平, 类型 VII~IX 的 49 个城市(如鄂尔多斯、东莞、延安、安顺、吕梁、鞍山)能源利用效率出现了不同程度下降。从空间分布来看, 能源利用效率明显上升的城市集中在中国主要城市群区域, 能源利用效率较低或者呈现明显下降的城市主要分布在中西部地区。



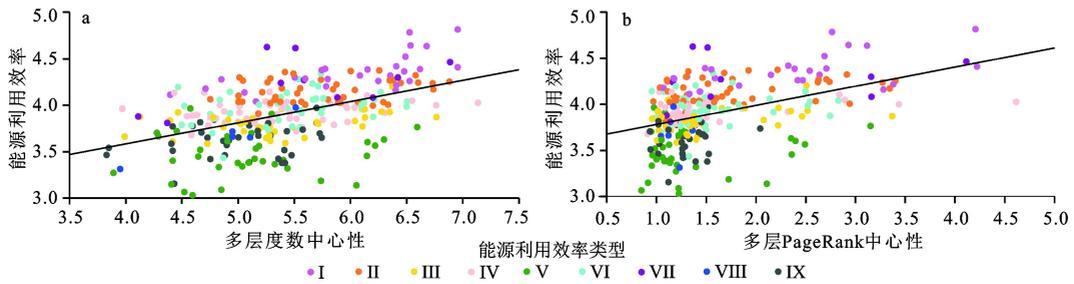
1.北京; 2.鞍山; 3.东营; 4.太原; 5. 吕梁; 6. 鄂尔多斯; 7.延安; 8.西安; 9.郑州; 10.开封; 11.南京; 12.合肥; 13.上海; 14.成都; 15.安顺; 16.南宁; 17.东莞; 18.深圳; 基于审图号: GS(2020)4628 号(自然资源部监制)标准地图制作, 底图无修改; 不含港澳台数据

图 2 中国城市能源利用效率类型的空间格局

Fig.2 Spatial pattern of urban energy utilization efficiency in China

总体来看, 中国城市在多层网络中的嵌入地位与能源利用效率存在日益增强的相关性。2005—2020 年, 多层次度中心性与能源利用效率的相关系数从 0.0627 提升到 0.4652,

多层 PageRank 中心性与能源利用效率的相关系数也从 0.0520 提升到 0.4204。图 3 直观揭示了 2020 年中国城市能源利用效率与多层网络中心性的正相关关系。在城市能源利用效率分类中, 2020 年类型 VIII、类型 IX 的多层度数中心性平均值分别为 4.894、4.984, 类型 I、类型 II 的平均值分别提高到 6.007、5.740; 类型 VIII、类型 IX 的多层 PageRank 中心性平均值分别为 1.186 和 1.273, 类型 I、类型 II 的平均值分别提高到 2.272、1.773。这意味着, 中国城市能源利用效率越来越多的与自身在多层网络中的嵌入特征联系起来。



类型 I~IX 解释见图 2; 不含港澳台数据

图 3 2020 年城市多层网络中心性与能源利用效率的散点分布

Fig.3 Scatter plots of urban energy utilization efficiency against multilayer network centrality in 2020

3.2 基准回归结果

本文主要采用面板 Tobit 模型开展计量检验。作为对照, 表 2 还利用 2005 年、2020 年的截面数据开展了 Tobit 回归分析。汇总了计量检验结果。模型 1、2 显示, dg 的拟合系数均在 1% 的水平上显著为正值, 表明多层度数中心性提升了城市的能源利用效率; 模型 3、4 显示, 2005—2020 年 dg 的系数值及显著性都明显提升, 意味着多层度数中心性的能源利用效率促进效应日益增强。同时, 模型 5、6 显示 pg 的系数均显著为正值, 模型 7、8 显示 pg 的系数值及显著性随时间明显提升, 表明多层 PageRank 中心性对城市能源利用效率具有显著促进作用, 且这种能源利用效率促进效应呈现上升趋势。此外, 表 2 中控制变量的回归结果与已有文献^[7-11,24,26]基本吻合。分析结果呼应了 Huggins 等^[6]、盛科荣等^[24]的结论, 表明城市通过跨界联系所产生的网络经济成为了能源利用效率的重要来源。总体上, 理论假说 1 得到验证。

3.3 稳健性检验

本文还开展了一系列稳健性检验, 包括采用双向固定效应模型重新进行回归, 构建多层 Strength 中心性和多层 Authority 中心性 2 个指标^①进行重新回归, 利用面板数据空间滞后模型进行检验, 以及以城市到最近港口距离为工具变量进行 2SLS 回归。各种检验结果也都表明多层网络中心性对能源利用效率具有显著正向影响, 验证了基准回归结果的稳健性。

4 调节效应与异质性影响检验

4.1 调节效应检验

为系统检验城市吸收能力的调节效应, 本文构建了调节变量(md), 共包括 4 个指标:

① 多层 Strength 中心性和多层 Authority 中心性的具体构建方法参见文献 [23], 本文均取自然对数形式。

表 2 多层网络嵌入影响能源利用效率的基准回归结果

Table 2 Baseline regression results of estimating the impact of multi-layer network embedding on energy utilization efficiency

变量	2005—2020年		2005年	2020年	2005—2020年		2005年	2020年
	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6	模型7	模型8
<i>dg</i>	0.0538*** (0.016)	0.0623*** (0.021)	0.0915* (0.047)	0.1753*** (0.034)				
<i>pg</i>					0.0754*** (0.016)	0.0925*** (0.018)	0.0933*** (0.035)	0.2034*** (0.037)
<i>ur</i>		-0.1924** (0.086)	-0.4262*** (0.158)	-0.3155** (0.147)		-0.1483* (0.083)	-0.3611*** (0.153)	-0.4982*** (0.144)
<i>in</i>		0.2444** (0.097)	-0.1301 (0.222)	-0.1158 (0.170)		0.3139*** (0.097)	-0.1059 (0.219)	-0.0382 (0.176)
<i>re</i>		0.0208** (0.010)	0.0135 (0.024)	0.0476*** (0.012)		0.0185* (0.010)	0.0276 (0.021)	0.0428*** (0.012)
<i>fdi</i>		0.0158*** (0.005)	0.0475*** (0.017)	0.0442*** (0.011)		0.0163*** (0.005)	0.0540*** (0.017)	0.0448*** (0.011)
<i>pl</i>		-0.0754*** (0.028)	-0.1785*** (0.045)	-0.1265*** (0.033)		-0.0789*** (0.026)	-0.1678*** (0.040)	-0.1510*** (0.035)
<i>de</i>		0.0234* (0.013)	0.0331 (0.024)	-0.0001 (0.020)		0.0316** (0.013)	0.0354 (0.024)	-0.0008 (0.019)
<i>fs</i>		-0.0053 (0.006)	-0.0231 (0.019)	0.0079 (0.010)		-0.0028 (0.006)	-0.0285 (0.018)	-0.0020 (0.009)
常数项	3.6446*** (0.055)	3.2548*** (0.128)	3.4081*** (0.266)	2.6553*** (0.250)	3.6629*** (0.038)	3.1715*** (0.128)	3.3376*** (0.268)	3.4355*** (0.186)
城市效应	是	是			是	是		
年份效应	是	是			是	是		
样本数量	1128	1128	282	282	1128	1128	282	282

注: 模型1、2、5和6括号内为Bootstrap标准误; 模型3、4、7和8括号内为值聚类标准误; **、*、*分别表示在1%, 5%和10%的水平上显著; *dg*为多层度数中心性; *pg*为多层PageRank中心性; 其他变量解释见表1; 空白项表示无此项; 不含港澳台数据。

① 绿色创新水平(*gp*)。以城市绿色专利累计申请量的自然对数来衡量, 数据来源于佰腾网^①。② 创业孵化能力(*en*)。采用科技型中小企业累计注册数量的自然对数来测度, 数据来源于企查查网站^②。③ 产业结构高级化指数(*ai*)。参考袁航等^[29]的研究, 采用三次产业中各产业产值占比与劳动生产率的乘积之和来测度。④ 数字经济指数(*di*)。选取每 100 人互联网用户数、计算机服务和软件从业人员占比、人均电信业务总量、每百人移动电话用户数和数字普惠金融指数 5 个指标, 通过熵值法得到表征城市数字经济发展水平的综合指数^[30]。在此基础上, 本文将多层网络中心性与调节变量的交叉项纳入计量模型进行检验, 结果见表 3。从表 3 可知在所有回归中交叉项的系数均为正值且在 1% 的水平上显著, 表明多层网络嵌入的能源利用效率提升效应随着城市绿色创新水平、创业孵化能力、产业结构高级化水平和数字经济发展水平的提升趋于增强。总体上, 理论假说 2 得到验证。

4.2 异质性影响检验

本文从 2 个维度检验城市多层网络嵌入和能源利用效率关系的异质性特征。① 资源基础。根据 2013 年国务院颁布实施的《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)》(https://www.gov.cn/zfwj/2013-12/03/content_2540070.htm), 将城市样本划分为非资源型城

① <https://www.baiten.cn/> [2023-08-20]

② <https://www.qcc.com/> [2023-08-10]

表 3 城市吸收能力的调节效应检验结果

Table 3 Test results of the moderating effect of urban absorptive capacity

变量	(md)gp		(md)en		(md)ai		(md)di	
	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6	模型7	模型8
<i>dg</i>	0.0527** (0.021)		0.0417** (0.021)		0.0681*** (0.021)		0.0621*** (0.021)	
<i>pg</i>		0.0525** (0.023)		0.0340 (0.024)		0.0853*** (0.018)		0.0685*** (0.021)
<i>dg</i> × <i>md</i>	0.0133*** (0.003)		0.0158*** (0.003)		0.0721*** (0.018)		0.1990*** (0.047)	
<i>pg</i> × <i>md</i>		0.0228*** (0.008)		0.0331*** (0.009)		0.0942*** (0.032)		0.1641*** (0.066)
样本数量	1128	1128	1128	1128	1128	1128	1128	1128

注:括号内为Bootstrap标准误;***、**分别为在1%,5%水平上显著;所有回归均包含控制变量、个体效应、年份效应和常数项,未报告回归结果;*dg*为多层度数中心性,*pg*为多层PageRank中心性;*md*为调节变量,包括绿色创新水平(*gp*)、创业孵化能力(*en*)、产业结构高级化指数(*ai*)和数字经济指数(*di*)4个指标;空白项表示无此项;不含港澳台数据。

市和资源型城市2个组份。②地理区位。将城市样本划分为东部城市和中西部城市2个组份。表4汇总分组计量检验结果。其中,模型1~4报告了资源基础异质性检验结果,可以发现*dg*的系数在资源型城市组中显著为正值而在非资源型城市组中不显著,*pg*的系数在非资源型城市组中显著为正值而在资源型城市组中不显著。这表明非资源型城市能源利用效率更多受益于多层PageRank中心性的提升,而资源型城市能源利用效率则对多层度数中心性的提升更加敏感。模型5~8报告了地理区位异质性检验结果,可知*dg*、*pg*的系数在中西部城市组中均显著为正值而在东部城市组中不显著。这说明,多层网络嵌入对中西部城市能源利用效率的促进作用更加强烈。总体来看,理论假说3得到检验。

表 4 多层网络嵌入对能源利用效率的异质性影响检验结果

Table 4 Test results of the heterogeneous impact of multi-layer network embedding on energy utilization efficiency

	模型1 (非资源型)	模型2 (资源型)	模型3 (非资源型)	模型4 (资源型)	模型5 (东部)	模型6 (中西部)	模型7 (东部)	模型8 (中西部)
<i>dg</i>	0.0105 (0.023)	0.0938*** (0.041)			-0.0262 (0.031)	0.0610** (0.030)		
<i>pg</i>			0.1266*** (0.030)	0.0390 (0.033)			0.0308 (0.024)	0.0957*** (0.028)
经验P值:非资源型-资源型		0.030		0.045				
经验P值:东部-中西部						0.030		0.075
样本数量	676	452	676	452	400	728	400	728

注:括号内为Bootstrap标准误;***、**分别为在1%,5%水平上显著;所有回归均包含控制变量、个体效应、年份效应和常数项,未报告回归结果;空白项为无变量;*dg*为多层度数中心性,*pg*为多层PageRank中心性;不含港澳台数据。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文采用中国上市公司500强企业网络数据、专利权转让数据和航班数据构建多层城市网络,检验了多层网络嵌入对中国城市能源利用效率的影响及特征。主要结论如下:

1)城市多层度数中心性和多层PageRank中心性对能源利用效率具有显著正向影响,这一结论在采用双向固定效应模型、更换变量测度方法、考虑空间效应和采用工具变量法

等稳健性检验后依然成立,表明城市的多层网络中心性成为能源利用效率的重要来源。

2)城市吸收能力正向调节着多层网络嵌入与能源利用效率的关系,多层网络嵌入对能源利用效率的积极影响随着城市绿色创新水平、创业孵化能力、产业结构高级化水平和数字经济发展水平趋于增强,这意味着城市网络经济和集聚经济存在互补关系。

3)多层网络嵌入对能源利用效率的影响在资源基础、地理区位维度上都呈现异质性特征,非资源型城市、资源型城市的能源利用效率分别受益于多层 PageRank 中心性、多层度数中心性的提升,中西部城市能源利用效率从多层网络嵌入中获得的收益高于东部城市。

5.2 讨论

本文基于流动空间视角,揭示了多层网络嵌入对城市能源利用效率的促进作用。这表明多层网络中心性成为了 Huggins 等^[6]提出的关系资产的一种关键形式,它构成了更广阔意义上的城市能源利用效率的重要来源。本文结果为改善中国城市能源利用效率提供了一种新的选择。未来应在全国统一大市场建设的背景下,持续降低交通通讯成本和制度性交易成本,推动中国多层城市网络的发展和完善,同时支持城市通过融入多层网络来拓展发展空间、获取关键资产、吸收溢出知识和利用外部效应,为城市在更大空间尺度上平衡经济增长和能源利用关系提供新动能。

其次,本文发现多层网络嵌入对能源利用效率的影响取决于城市吸收能力。这表明在中国快速城市化的发展环境下,网络经济与集聚经济相互依赖,从而形成了网络化的集聚经济^[15]。这意味着提高城市的内生增长能力和战略耦合能力对于实现城市网络的能源利用效率提升效应至关重要。因此,未来应着力完善城市创新创业生态体系建设,培育和集聚知识守门人,增强城市绿色知识生产能力,孵化一批科技型企业,推动城市发挥价值链分工中的比较优势,促进数字经济发展,为城市充分利用网络资源提升能源利用效率奠定基础。

此外,考虑到多层网络嵌入的异质性影响,未来应充分利用网络经济来促进不同类型城市能源利用效率的协调发展。在网络地位维度,应着力扩大资源型城市的链接范围和规模,提升非资源型城市的链接层级和深度,以缓解不同类型城市能源利用效率的发展差距。在地理区位维度,应着力提升中西部城市在多层网络中的嵌入规模和深度,让多层网络成为有效缩减城市能源利用效率区域发展不平衡的新型支撑条件。

参考文献(References):

- [1] 邵帅,张可,豆建民.经济集聚的节能减排效应:理论与中国经验[J].管理世界,2019,35(1):36-60+226.[Shao Shuai, Zhang Ke, Dou Jianmin. The energy-saving and emission reduction effects of economic agglomeration: Theory and Chinese experience. *Journal of Management World*, 2019, 35(1): 36-60+226.]
- [2] 张浩然,焦利民.中国城市网络结构:基于价值链视角和企业联系视角的比较分析[J].地理科学,2023,43(11):1879-1889.[Zhang Haoran, Jiao Limin. Urban network structure in China: A comparison based on the perspective of value chain and enterprise connection. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(11): 1879-1889.]
- [3] 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[J].地理学报,2018,73(8):1462-1477.[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.]
- [4] 王姣娥,杜德林,金凤君.多元交通流视角下的空间级联系统比较与地理空间约束[J].地理学报,2019,74(12):2482-2494.[Wang Jiao'e, Du Delin, Jin Fengjun. Comparison of spatial structure and linkage systems and geographic constraints: A perspective of multiple traffic flows. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2482-2494.]
- [5] Castells M. The rise of the network society[M]. Oxford: Blackwell, 1996.
- [6] Huggins R, Thompson P. A network-based view of regional growth[J]. *Journal of Economic Geography*, 2014, 14(3): 511-545.
- [7] 李廉水,周勇.技术进步能提高能源效率吗?基于中国工业部门的实证检验[J].管理世界,2006(10):82-89.[Li Li-

- anshui, Zhou Yong. Can technological progress improve energy efficiency? Empirical testing based on China's industrial sector. *Journal of Management World*, 2006(10): 82-89.]
- [8] 魏楚, 沈满洪. 结构调整能否改善能源效率: 基于中国省级数据的研究 [J]. *世界经济*, 2008(11): 77-85. [Wei Chu, Shen Manhong. Can structural adjustment improve energy efficiency: A study based on provincial data in China. *The Journal of World Economy*, 2008(11): 77-85.]
- [9] 汪东芳, 曹建华. 互联网发展对中国全要素能源效率的影响及网络效应研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(1): 86-95. [Wang Dongfang, Cao Jianhua. The impact of Internet development on China's total factor energy efficiency and its network effects. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(1): 86-95.]
- [10] 师傅, 沈坤荣. 政府干预、经济集聚与能源效率 [J]. *管理世界*, 2013(10): 6-18+187. [Shi Bo, Shen Kunrong. Government intervention, economic agglomeration, and energy efficiency. *Journal of Management World*, 2013(10): 6-18+187.]
- [11] 魏楚, 郑新业. 能源效率提升的新视角: 基于市场分割的检验 [J]. *中国社会科学*, 2017, 262(10): 90-111+206. [Wei Chu, Zheng Xinye. A new perspective on energy efficiency enhancement: A test based on market segmentation. *Social Sciences in China*, 2017, 262(10): 90-111+206.]
- [12] Capello R. The city network paradigm: Measuring urban network externalities[J]. *Urban Studies*, 2000, 37(11): 1925-1945.
- [13] Meijers E J, Burger M J, Hoogerbrugge M M. Borrowing size in networks of cities: City size, network connectivity and metropolitan functions in Europe[J]. *Papers in Regional Science*, 2016, 95(1): 181-198.
- [14] Pan Fenghua, Yang Chun, Wang He et al. Linking global financial networks with regional development: A case study of Linyi, China[J]. *Regional Studies*, 2020, 54(2): 187-197.
- [15] Shi Shuai, Wong Siu Kei, Zheng Chen. Network capital and urban development: An inter-urban capital flow network analysis[J]. *Regional Studies*, 2022, 56(3): 406-419.
- [16] 高鹏, 宁越敏, 何丹, 等. 企业异地投资视角下长三角城市经济增长的网络外部性研究 [J]. *地理科学*, 2023, 43(7): 1216-1226. [Gao Peng, Ning Yuemín, He Dan et al. Network externalities of urban economic growth in the Yangtze River Delta from the perspective of enterprises' non-local investment. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(7): 1216-1226.]
- [17] Weitzman M L. Recombinant growth[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1998, 113(2): 331-360.
- [18] Gilsing V, Nooteboom B, Vanhaverbeke W et al. Network embeddedness and the exploration of novel technologies: Technological distance, betweenness centrality and density[J]. *Research Policy*, 2008, 37(10): 1717-1731.
- [19] Burt R S. Structural holes: The social structure of competition[M]. Cambridge: Harvard University Press, 2009.
- [20] Cohen W M, Levinthal D A. Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation[J]. *Administrative Science Quarterly*, 1990, 35(1): 128-152.
- [21] 史丹. 中国能源效率的地区差异与节能潜力分析 [J]. *中国工业经济*, 2006(10): 49-58. [Shi Dan. Regional differences in China's energy efficiency and conservation potentials. *China Industrial Economics*, 2006(10): 49-58.]
- [22] Alderson A S, Beckfield J. Power and position in the world city system[J]. *American Journal of Sociology*, 2004, 109(4): 811-851.
- [23] De Domenico M, Porter M A, Arenas A. MuxViz: A tool for multilayer analysis and visualization of networks[J]. *Journal of Complex Networks*, 2015, 3(2): 159-176.
- [24] 盛科荣, 王丽萍, 孙威. 网络权力、知识溢出对中国城市绿色经济效率的影响 [J]. *资源科学*, 2021, 43(8): 1509-1521. [Sheng Kerong, Wang Liping, Sun Wei. Impacts of network power and knowledge spillovers on China's urban green economic efficiency. *Resources Science*, 2021, 43(8): 1509-1521.]
- [25] Cooper W W, Seiford L M, Tone K. Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software[M]. New York: Springer, 2007.
- [26] Li Kunming, Fang Liting, He Lerong. How urbanization affects China's energy efficiency: A spatial econometric analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 200: 1130-1141.
- [27] 国家统计局. 中国城市统计年鉴 [M]. 2005—2021. 北京: 中国统计出版社, 2005—2021. [National Bureau of Statistics. *China city statistical yearbook. 2005—2021*. Beijing: China Statistics Press, 2005—2021.]
- [28] 住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 [M]. 2005—2021. 北京: 中国统计出版社, 2005—2021. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development. *China urban construction statistical yearbook. 2005—2021*. Beijing: China Statistics Press, 2005—2021.]
- [29] 袁航, 朱承亮. 国家高新区推动了中国产业结构转型升级吗 [J]. *中国工业经济*, 2018(8): 60-77. [Yuan Hang, Zhu Chengliang. Do national high-tech zones promote the transformation and upgrading of China's industrial structure. *China Industrial Economics*, 2018(8): 60-77.]
- [30] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展: 来自中国城市的经验证据 [J]. *管理世界*, 2020, 36(10): 65-76. [Zhao Tao, Zhang Zhi, Liang Shangkun. Digital economy, entrepreneurial activity, and high-quality development: Empirical evidence from Chinese cities. *Journal of Management World*, 2020, 36(10): 65-76.]

Examining impacts of multilayer network embeddedness on energy utilization efficiency of Chinese cities

Sheng Kerong, Li Xiaorui, Wu Shilei, Li Yaze

(Economic School, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China)

Abstract: The urban system in China is essentially a multilayer network composed of evolving and interacting single-layer relational networks. Understanding how the embedded characteristics of cities in these multilayer networks influence energy utilization efficiency is crucial for effectively balancing economic growth and sustainable development in China. This article sets out to empirically investigate the impacts of multilayer network embeddedness on energy utilization efficiency based on a panel data set covering 282 prefecture-level and above cities in China in 2005, 2010, 2015, and 2020. To this end, three single networks, i.e., network of top 500 public companies, network of patent transfer, and network of flight, are used to construct the edge-colored multigraph. Three main findings stand out. First, both multilayer degree centrality and multilayer PageRank centrality have a significant positive impact on the energy utilization efficiency of Chinese cities, which is still valid after a series of robustness and endogeneity tests. Second, urban absorptive capacity acts as a positive moderator between multilayer network embedding and energy utilization efficiency, with energy efficiency effects increasing alongside improvements in urban green innovation, entrepreneurial incubation, industrial structure upgrading, and digital economy development. Third, the energy efficiency effects of multilayer network embedding demonstrate multidimensional heterogeneity, with non-resource-based cities benefiting more from multilayer PageRank centrality and resource-based cities from multilayer degree centrality. In addition, central and western cities experience greater energy efficiency gains from multilayer network embedding compared to eastern cities. The results underscore the significance of a city's integration into extensive networks for its energy performance, highlighting network capital as a crucial component of urban energy utilization efficiency. The paper also fills the gap in the juxtaposition between agglomeration and network economies, by clarifying that city network capital and local agglomeration factors have an interactive and complementary relationship in enhancing urban energy utilization efficiency. This results highlight the need for Chinese government to promote multilayer urban networks, enhance urban absorptive capacity, and consider the differing impacts of network embedding for better and coordinated development of urban energy utilization efficiency.

Key words: multilayer urban network; energy utilization efficiency; absorptive capacity; network capital; space of flows