

DOI:10.3969/j.issn.1674-8131.2022.02.001

# 网络节点特征与城市绿色创新效率提升

## ——基于节点枢纽性与节点聚集度视角

张明斗<sup>a</sup>, 李学思<sup>b</sup>

(东北财经大学 a. 经济学院; b. 经济与社会发展研究院, 辽宁 大连 116025)

**摘要:**随着城市间创新联系的持续增强,城市创新网络的优化与发展对城市绿色创新效率的促进作用日益凸现。部分研究考察了城市绿色创新效率的空间溢出效应和城市创新网络特征的影响,但鲜有文献关注城市的网络节点特征对其绿色创新效率的影响,尤其缺乏相应的经验分析。

本文认为,在城市创新网络中各个城市即网络中的节点,创新资源和活动在节点的聚集产生规模效应,创新资源和活动在节点间流动则带来溢出效应,两者都有利于城市绿色创新效率的提升。因此,反映节点在网络联系中重要性的节点枢纽性和反映网络中不同节点聚集成团程度的节点聚集度提高,均有利于城市绿色创新效率的提升。节点枢纽性的提高对城市自身的基础设施建设提出更高要求,因而可以通过改善基础设施的路径促进城市绿色创新效率提升;节点聚集度的提高为城市金融发展带来更多的需求和机会,因而可以通过增加创新投融资规模的路径促进城市绿色创新效率提升。在城市密度和经济发展水平较高的地区,城市间的创新联系较便利,节点枢纽性提高对城市绿色创新效率提升的促进作用较大;而在城市密度和经济发展水平较低的地区,创新聚集的效率相对较高,节点聚集度提高对城市绿色创新效率提升的促进作用较大。以2010—2018年中国279个城市为样本,通过引力模型构建城市创新网络,进而测度节点枢纽性和节点聚集度,分析发现:节点枢纽性和节点聚集度对城市绿色创新效率具有显著正向影响;城市交通基础设施在节点枢纽性促进城市绿色创新效率中具有显著的部分中介效应,城市金融机构存款水平在节点聚集度促进城市绿色创新效率中具有显著的遮掩效应;节点枢纽性对城市绿色创新效率的促进效应在东、中、西部地区依次减弱,而节点聚集度的促进效应依次增强。

相比已有文献,本文主要从三个方面进行了拓展和深化:一是从网络节点特征角度拓展城市绿色创新效率的影响因素研究,二是从影响路径和区域异质性层面深化网络节点特征影响创新效率的机制研究,三是为通过改善网络节点特征促进绿色创新效率提升提供经验证据。

本文揭示了城市创新网络进化(节点枢纽性与节点聚集度提高)对绿色创新效率提升的重要作用及其影响路径和区域异质性,有利于在新发展阶段通过优化城市网络发展格局进一步促进创新发展和绿色发展。

**关键词:**城市创新网络;节点特征;绿色创新效率;创新聚集;创新联系;节点枢纽性;节点聚集度

**中图分类号:**F224.33;F290 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-8131(2022)02-0001-15

\* 收稿日期:2021-12-13;修回日期:2022-02-19

**基金项目:**国家自然科学基金项目(71804021);辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC2007123);辽宁省经济社会发展研究项目(2022lslybkt-004)

**作者简介:**张明斗(1983),男,山东济宁人;副教授,博士,硕士生导师,主要从事城市经济研究;E-mail: zhangmingdou0537@126.com。李学思(1996),女,山东济南人;博士研究生,主要从事城市经济研究。

## 一、引言

改革开放后,中国经济持续快速增长创造出“中国奇迹”,然而,主要由要素驱动的粗放型、外延式经济发展方式也加剧了环境污染和资源约束等问题(邓玉萍等,2021)<sup>[1]</sup>,需要转变发展方式,实现创新驱动的集约型、内涵式的高质量发展。目前,我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段,创新发展与绿色发展水平持续提升。作为区域经济社会发展的中心、国家经济产出最重要的基地和各类创新要素和资源的集聚地,城市具有创新“牵引”和绿色发展“载体”的双重作用(马静等,2017)<sup>[2]</sup>,因而应加快城市绿色创新效率的提升,形成创新驱动与绿色发展的相互促进机制,实现技术进步、绿色生态与经济效益的协同共赢。因此,需要深入探讨影响城市绿色创新效率的各种因素及其机制,进而采取有针对性的措施有效推动各城市的创新发展和绿色发展。

随着创新发展和绿色发展的逐步推进,关于绿色创新效率的研究不断丰富。其中,针对城市绿色创新效率影响因素的经验分析大多基于城市自身的特征展开,并主要集中于四个方面<sup>[3-16]</sup>:一是经济发展因素,如经济发展水平、金融发展水平、产业结构、产业集聚、对外经贸关系等;二是科技发展因素,包括科技人员和科技支出、政府科技支出、科技研发效率等;三是基础设施建设及社会发展因素,如教育水平、文化水平、信息化程度、交通通达程度、智慧城市建设、产城融合、生态治理绩效、污染治理效率等;四是政策因素,包括环境规制、创新和环境政策、政府支持、国家高新区建设等。事实上,在现代开放经济体系中,随着交通通信技术的不断进步,城市间的要素资源流动加快,经济联系日益紧密。不同城市间通过创新主体的交流合作促进创新资源的交互流动和知识技术的溢出扩散,产生网络式的创新发展新范式(盛彦文等,2020)<sup>[17]</sup>,进而形成城市创新网络。在此背景下,城市绿色创新效率不仅取决于其自身的发展状况,而且越来越受到其他城市以及城市创新网络的影响。部分研究分析了城市绿色创新效率的空间溢出效应以及城市网络特征对城市绿色创新效率的影响(刘佳等,2020;陆菊春等,2021)<sup>[18-19]</sup>,而关于城市在城市创新网络中的地位和作用对其绿色创新效率的影响,鲜有研究涉及。盛彦文等(2020)以京津冀、长三角、珠三角城市群为样本,分析了创新联系网络中城市的点度中心性、中间中心性及聚类系数对创新效率的影响,但未深入探究其影响机制<sup>[17]</sup>。

高密度的创新网络能使城市间产生大量的创新联系,促使网络中创新资源和信息更快流动(Coleman,1994)<sup>[20]</sup>。具有不同创新优势的城市通过网络的联结可以进行交流与合作,实现优势互补和技术溢出,进而提高城市的创新产出和创新效率(盛彦文等,2020)<sup>[17]</sup>。城市创新网络的形成和发展会促进网络内各城市绿色创新效率的提升,但这种影响并非匀质的,城市在网络中的地位及其在网络发展中所起的作用不同,受到的影响也会不同。从城市创新网络来看,各个城市即网络中的节点,创新资源和活动在节点的聚集产生规模效应,创新资源和活动在节点间流动则带来溢出效应,两者都有利于城市绿色创新效率的提升。基于此,本文尝试从枢纽性和聚集度这两个典型的网络节点特征入手,探究城市在创新网络中的节点特征可能对其绿色创新效率产生的影响及其机制,并采用2010—2018年中国279个样本城市的数据进行实证检验。本文的边际贡献主要在于:一是基于节点枢纽性和节点聚集度探讨网络节点特征对城市绿色创新效率的影响及其机制(基础设施建设和金融发展分别在其中的中介效应),拓展和深化关于城市绿色创新效率的影响因素和城市网络发展的经济效应等领域的研究;二是进一步分析不同地区的城市节点特征对其绿色创新效率的不同影响,并通过区域异质性分析进行实证检验;三是对中国样本城市的实证分析为城市创新网络发展可以有效促进绿色创新效率提升提供了经验证据,有利于通过加快城市创新网络发展进一步促进创新驱动与绿色发展的有机融合。

## 二、理论分析与研究假说

创新驱动和绿色发展本质上都是对经济发展方式进行变革,创新通过技术进步在促进经济增长的

同时提高资源利用效率、减少环境破坏,进而实现绿色发展(鲍涵等,2022)<sup>[14]</sup>,绿色创新效率则是创新驱动与绿色发展融合程度的体现。本文中,绿色创新效率主要反映创新投入与绿色发展之间的关系,即创新驱动绿色发展的效率。城市绿色创新效率越高则单位创新投入带来的绿色发展绩效越高。本文从枢纽性和聚集度两个维度描述城市在城市创新网络中的节点特征,进而分析城市的节点枢纽性和节点聚集度对其绿色创新效率的影响。节点枢纽性用于刻画节点在整个网络的节点联系(包括物资、信息、活动等的交流)中所发挥的中介作用大小,反映节点在网络联系中的重要性。为表述的方便,本文将创新网络中节点间的创新资源(包括资金、人才、信息、项目以及成果等)和创新活动的合作交流统称为创新联系。城市在创新网络中的节点枢纽性越高,则在整个网络的创新联系中通过该城市的创新资源流动和创新活动交流越多(类似于交通网络中的交通枢纽),其受网络创新联系的影响以及其对网络创新联系的影响也越大。节点聚集度用于刻画节点将资源和活动集聚于其周围的能力大小,反映网络中不同节点聚集成团的程度。城市在创新网络中的节点聚集度越高,则该城市周围创新联系密度越大,即对创新资源和活动的集聚能力越强。

### 1. 节点枢纽性对城市绿色创新效率的影响

在城市创新网络中,由于资源禀赋、经济发展阶段和水平、城市发展战略和模式的不同,各城市的创新能力和绿色发展水平存在显著差异,绿色创新效率也具有明显差异。虽然当前中国城市发展不平衡现象突出,但在新发展阶段,新发展理念逐渐树立,发展方式转变深入推进,各城市都在积极实施创新驱动发展战略和不断加强生态文明建设,努力提高绿色创新效率。在此背景下,随着城市间经济社会交往的日益加强,创新资源在城市间的双向流动、创新活动在城市间的合作交流不断增加,进而在知识和技术空间溢出效应的作用下,城市的创新效率不再只取决于自身的创新资源和能力,而是越来越多地受到其他城市的影响。与此同时,不同城市的发展阶段和战略不同,绿色发展水平和环境规制强度存在差异,一部分较为发达的或面临较大资源环境压力的城市率先转变发展方式,以实现创新效率与环境效益的双提升,而其他城市则能够获得其绿色创新发展的经验及其绿色创新成果的溢出红利,进而实现所有城市的绿色创新效率整体提升。在这个过程中,城市不仅是创新资源的使用者与拥有者,更是创新资源的传递者,不仅是创新活动的聚集地,更是创新合作交流的纽带。因此,随着城市创新网络的形成和发展,城市节点在整个网络创新联系中发挥枢纽作用,成为绿色创新资源流动的中转地,并可促进其他城市间的绿色创新合作,而这种枢纽作用产生的规模效应以及合作关系带来的协同效应也为城市节点自身创造出更为优越的绿色创新条件(Capello,2000)<sup>[21]</sup>。在城市创新网络中,作为节点的城市成为实现创新联系的关键。城市节点在发挥创新联系的枢纽作用时,不但能够促进整个网络绿色创新资源配置的优化,而且能够及时捕捉绿色创新的知识与信息,对其自身的绿色转型与创新发展产生正向影响,进而加快绿色创新效率的提升。可见,城市间绿色创新效率的溢出效应主要在城市创新网络节点之间创新联系的过程中产生,城市节点在其中发挥的枢纽作用越大,则其可能受到其他城市的绿色创新效率溢出作用越大,从而越有利于其绿色创新效率的提升。

城市节点在创新网络创新联系中所起到的枢纽作用大小受到很多因素的影响,除自身的创新资源配置状况和创新资源整合能力外,与其他城市创新联系的便利性也是重要的影响因素。城市与创新网络中其他城市创新联系便利性的提高,如交通通达性提高、人才流动障碍减少、城市间经贸关系加强以及产业链融合等,会显著提高其节点枢纽性。城市节点枢纽性的提高意味着与其他城市创新联系的渠道和规模增加,这又会对城市自身的建设提出更高的要求,比如基础设施的改善、人力资本水平的提高、市场交易机制的完善等。尤其是在城市基础设施建设方面,需要有更加便捷的交通通信条件为创新资源流动和创新活动交流提供更好的保障和服务,这种刚性需求会促使城市加快交通通信等基础设施

建设。因此,城市节点枢纽性的提高会促进以交通为代表的城市基础设施不断完善,而城市基础设施的完善又会增强其产业聚集力和要素流动性,促进绿色创新资源和创新活动在本地的集聚,进而提高城市自身的绿色创新效率。

基于上述分析,本文提出研究假说 H1:城市在创新网络中节点枢纽性的提高对其绿色创新效率提升具有促进作用,其中交通基础设施发挥部分中介效应,即节点枢纽性提高可以通过完善城市交通基础设施的路径来促进绿色创新效率提升。

## 2. 节点聚集度对城市绿色创新效率的影响

网络的关系特征比位置特征对绩效有更加积极的影响(Koka et al, 2008)<sup>[22]</sup>。在网络中,节点间的联系聚集在一起会促成节点间更加紧密的联系,从而提高联系的效率和准确度(陈子凤等, 2009)<sup>[23]</sup>,节点与其他高效率节点联系得越紧密则越能产生更好的绩效(Mote, 2005)<sup>[24]</sup>。当城市创新网络中节点间的创新联系较为分散时,创新联系聚集会促进城市创新效率的提高和创新联系溢出效应的发挥。城市在创新网络中节点聚集度提高,意味着在其周围的创新联系密度增加,也就是说其能够聚集更多的创新资源和活动。这种节点间联系的聚集可以增进不同城市在各领域发展中的战略协同以及企业间、行业间的知识流动和创新合作,进而有利于创新资源在城市节点间的流动以及创新溢出效应的发生。随着生产水平和居民收入的快速提高,传统经济增长方式带来的资源和环境的压力逐渐增大,国家通过政策引导各地转变经济发展方式,各城市也积极推动创新驱动与绿色发展的融合。与此同时,城市间绿色创新联系持续增加,但也可能因发展基础和战略取向的差异而在网络的不同板块表现出不同的聚集态势,进而使不同的城市具有不同的节点聚集度。一个城市的节点聚集度越高,则其周围的绿色创新联系越频繁且规模也越大,一方面其自身可以聚集更多的绿色创新资源和活动进而与其他城市发生更多的绿色创新联系,另一方面其他城市之间的绿色创新联系也可以为其带来更多的溢出效应,进而促进其绿色创新效率的快速提升。

从节点城市自身的发展来看,当其绿色创新的节点聚集度提高时,创新资源和创新活动的聚集以及创新联系的增加,为其金融发展带来更多的需求和机会,也提出了更高要求。绿色创新活动通常有较大的融资需求,并具有长周期、高风险的特征,需要有相应的金融服务予以支持。然而,实体经济是金融业发展的基础,金融服务实体经济的资金根本上来源于金融机构所吸引的存款。金融机构存款水平可以反映城市中未被利用资金的多少,而这些未被利用的资金是绿色创新活动的主要资金来源之一。因此,随着城市节点聚集度的提高,绿色创新活动和联系的持续增加可能使微观创新主体受到更强的投融资约束,为缓解绿色创新活动的投融资约束,满足创新主体的资金需求,金融机构会通过一定程度地降低存款水平来促使资金流入绿色创新活动和联系中,进而激励市场主体的绿色创新行为。同时,城市金融为绿色创新提供适宜的创新性服务不但可以得到更大的投资回报,而且也会促进自身的竞争力提升和高质量发展,进而增强城市对绿色创新资源和活动的聚集力。因此,城市金融机构降低存款水平以促进绿色创新后,不但可以使绿色创新活动和联系得到更多的金融服务支持进而实现更多的创新成果和产出,而且可以吸引更多的绿色创新资源和活动在本地以及周边城市聚集,促进创新驱动与绿色发展的融合,并形成节点聚集度与绿色创新效率的正反馈机制,实现绿色创新效率的持续提升。

基于上述分析,本文提出研究假说 H2:城市在创新网络中节点聚集度的提高对其绿色创新效率提升具有促进作用,其中金融机构存款水平发挥部分中介效应,即节点枢纽性提高可以通过降低金融机构存款水平的路径来促进城市绿色创新效率提升。

本文的基本分析框架如图 1 所示。

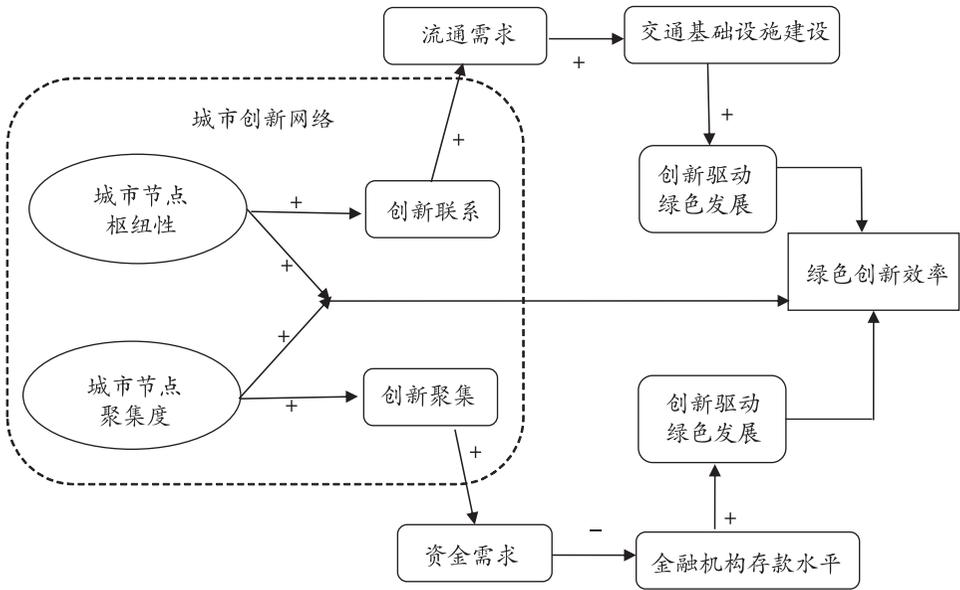


图1 网络节点特征影响城市绿色创新效率的机制示意图

### 3. 节点枢纽性和节点聚集度影响城市绿色创新效率的区域异质性

城市在创新网络中的节点枢纽性和节点聚集度对其绿色创新效率的影响,可能会因处于网络中的不同板块而具有异质性表现。对此,本文主要从不同的地理区域维度进行分析。在一个区域范围很大的城市创新网络中,可以划分为若干较小的地区,而这些地区之间的城市发展状态可能具有明显差异。一方面,由于地理和气候条件的差异导致不同地区的城市密度(一定地域范围内城市的数量)不同,在平原地区、气候适宜地区往往有较密的城市布局,而在山地、气候条件恶劣地区的城市布局往往较为稀疏。另一方面,由于资源禀赋和发展历史的不同导致不同地区的城市发展水平不同。同时,这两方面的差异也具有关联性,城市密度较高地区的城市经济发展水平通常也较高。从城市密度来看,密度越高则城市间的创新联系越便利,创新联系的成本越低,进而创新资源和活动的流动频率和规模也越大。而在城市密度较低的地区,由于城市间创新联系的成本较高,创新聚集的效率相对较高。因此,在城市密度越高的地区,节点枢纽性提高对城市绿色创新效率提升的促进作用越大;而在城市密度越低的地区,节点聚集度提高对城市绿色创新效率提升的促进作用越大。

再从城市体系发育发展的过程来看,在城市经济发展的初期,创新的规模效应显著,创新资源和创新活动的流动主要表现为向节点城市聚集,而城市节点之间的创新联系由于交通通信技术不发达受到较大限制。此时,城市绿色创新效率更多地取决于其自身的创新集聚力,而受创新联系溢出作用的影响较小,因而节点聚集度的提高对城市绿色创新效率提升的促进作用显著,节点枢纽性的影响则相对较小。随着城市经济的不断发展,当创新资源和创新活动在各城市聚集到一定程度并形成一定空间分工格局后,城市间的创新联系逐渐增多,创新联系的溢出效应开始凸显,节点枢纽性的提高对城市绿色创新效率提升的促进作用也变得日益显著起来。在城市经济的进一步发展中,创新资源和创新活动在各节点城市聚集并形成自身的创新优势,加上交通通信技术的快速发展使城市间的创新联系更加便捷,与创新聚集相比,通过创新联系实现绿色发展的相对成本持续减小,进而导致创新聚集的规模效应被弱化,而创新联系的溢出效应得到强化。此时,节点聚集度的提高对城市绿色创新效率提升的促进作用变小,而节点枢纽性提高的促进作用则趋于增强。盛彦文等(2020)的分析也发现,创新联系网络节点城市的聚类系数与创新效率具有倒“U”型关系<sup>[17]</sup>。因此,节点枢纽性和节点聚集度对城市绿色创新效率的

影响可能表现出明显的区域异质性,即相对于经济发展水平较低的地区,在经济发展水平较高的地区节点枢纽性对城市绿色创新效率的正向影响更强,而节点聚集度的正向影响较弱。

基于上述分析,本文提出研究假说 H3:节点枢纽性和节点聚集度对城市绿色创新效率的影响具有区域异质性,在城市密度越高、经济发展水平越高的地区节点枢纽性提高对城市绿色创新效率提升的促进效应越显著,而在城市密度越低、经济发展水平越低的地区节点聚集度提高对城市绿色创新效率提升的促进效应越显著。

### 三、实证分析设计

#### 1. 模型构建

由于本文通过非期望产出 SBM-DEA 模型测度城市绿色创新效率,其截面数据介于 0~1 之间,尽管得到全部观测数据,但部分观测值压缩至一个点上,此时城市绿色创新效率的概率分布就变成由一个分散点与一个连续分布所组成的“联合分布”,无论使用整个样本还是剔除离散点的子样本,OLS 估计都不能得到一致估计结果,而 Tobit 模型可以克服这一问题。基于此,本文选用 Tobit 模型来检验城市创新网络节点特征对其绿色创新效率的影响。为进一步明确城市在创新网络中的节点枢纽性和节点聚集度影响其绿色创新效率的机制,本文借鉴温忠麟和叶宝娟(2014)的研究构建如式(1)(2)(3)所示的中介效应模型<sup>[25]</sup>:

$$Innov_{it} = \alpha_1 \ln BC_{it} + \alpha_2 \ln CC_{it} + \gamma_1 Z_{it} + \delta_p + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$Med_{it} = \beta_1 \ln BC_{it} + \beta_2 \ln CC_{it} + \gamma_2 Z_{it} + \delta_p + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$Innov_{it} = \omega_1 \ln BC_{it} + \omega_2 \ln CC_{it} + \omega_3 Med_{it} + \gamma_3 Z_{it} + \delta_p + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中, $i$ 代表城市, $t$ 代表时间;被解释变量( $Innov$ )为“城市绿色创新效率”,核心解释变量( $BC$ 和 $CC$ )为“节点枢纽性”和“节点聚集度”,中介变量( $Med$ )为“交通基础设施”和“金融机构存款水平”, $Z$ 代表一系列城市层面的控制变量; $\delta_p$ 为省份固定效应, $\mu_t$ 为时间固定效应, $\varepsilon_{it}$ 为服从正态分布的随机扰动项。式(1)为基准模型,用来检验节点枢纽性和节点聚集度对城市绿色创新效率的影响,采用 Tobit 模型进行回归;式(2)用来检验节点枢纽性和节点聚集度对中介变量的影响,由于各变量不存在观测值被压缩至一个点上的情况,采用普通线性回归方法进行估计;式(3)用来检验中介变量的中介效应及其显著性,采用 Tobit 模型进行回归。

#### 2. 变量选择与测度

##### (1)“城市绿色创新效率”测度

传统的 DEA 模型大多属于径向和角度的度量,未充分考虑投入产出的松弛性问题,也不能准确度量存在非期望产出时的效率值。为克服上述缺陷,Tone(2001)提出将松弛变量引入目标函数中构建 SBM-DEA 模型<sup>[26]</sup>。故本文从投入产出关系出发采用非期望产出 SBM-DEA 模型对样本城市的绿色创新效率进行测度。本文选取的投入指标为“研发资金投入”和“研发人力投入”。目前,研发资金和人力投入多采用“R&D 经费”和“R&D 人员数”来进行衡量(吕岩威等,2020)<sup>[27]</sup>,但由于在城市层面上缺乏此类数据,故借鉴彭文斌等(2019)的做法<sup>[28]</sup>,用“科学技术支出”和“科研、技术服务业人员数”代替“研发资金投入”和“研发人力投入”。产出指标包括期望产出和非期望产出。其中,期望产出为“专利授权数”和“地区生产总值”,非期望产出为“环境污染指数”(采用工业废水排放量、工业二氧化硫排放量、工业烟尘排放量 3 项指标通过熵值法计算的综合指数)。

##### (2)“节点枢纽性”和“节点聚集度”测度

首先构建城市创新网络。参考吕拉昌等(2015)、盛彦文等(2020)的研究<sup>[29][17]</sup>,基于城市外向联系规模和技术创新能力两个维度,选取邮政业务收入、电信业务收入、城区人口密度、专利申请数、每百人公共图书馆藏书量5项指标(通过时序全局主成分分析确定指标权重)计算城市创新外向规模,进而采用修正后的引力模型测算城市间的创新联系强度: $R_{ij} = \frac{KY_i Y_j}{D_{ij}^2}$ 。式中, $R_{ij}$ 为城市*i*与城市*j*的创新联系强度, $K$ 为引力系数(取值为 $10^7$ )<sup>①</sup>, $Y_i$ 和 $Y_j$ 分别为城市*i*和城市*j*的创新外向规模, $D_{ij}$ 为城市*i*与城市*j*间的空间距离<sup>②</sup>。对创新联系强度矩阵数据进行对比分析,将强度大于1的连接视为有效连接(盛彦文等,2020)<sup>[17]</sup>,故设定阈值为1(城市间联系强度大于1取值为1,否则取值为0),进而基于有效连接构建城市创新网络。

然后,将城市创新联系强度矩阵转为二分矩阵,借助Ucinet 6软件进行城市创新网络节点特征分析。借鉴吴登生等(2017)、盛彦文等(2020)的方法<sup>[30][17]</sup>,分别采用样本城市的中间中心性和聚类系数来衡量“节点枢纽性”和“节点聚集度”。“节点枢纽性”(中间中心性)的计算公式为: $BC(i) = \sum_{j,k \neq i} \frac{g_{jik}}{g_{jk}}$ 。其中, $g_{jik}$ 为城市*j*与城市*k*之间经过城市*i*实现有效连接的最短路径数(经过节点数最少的路径数), $g_{jk}$ 为城市*j*与城市*k*之间所有实现有效连接的路径数。根据公式可知,城市*i*的“节点枢纽性”表示经过其连接其他两个城市的短程线数占其他两个城市之间总程线数的比例,其值越大则城市*i*在城市创新网络中起到的枢纽作用越强。“节点聚集度”(聚类系数)的计算公式为: $CC_i = \frac{2k_i}{m_i(m_i-1)}$ 。其中, $m_i$ 为与城市*i*相邻的所有节点数, $k_i$ 为与城市*i*相邻的两个节点之间的有效连接数总量。聚类系数提取局部网络的密集度信息,利用局部三角形结构信息估计出共同相邻节点的贡献度(郁湧等,2022)<sup>[31]</sup>,能够反映节点聚集成团程度。城市*i*的“节点聚集度”越大其周边的网络密度越高,则其在城市创新网络中对创新资源和活动的聚集力也越强。由于“节点枢纽性”和“节点聚集度”存在0值情况,因而进行原值加1后取自然对数处理。

### (3) 中介变量设定

基于前文理论分析,本文将“交通基础设施”作为“节点枢纽性”影响“城市绿色创新效率”的中介变量,采用“城市公路里程数与城市总面积之比(路网密度)”来衡量;将“金融机构存款水平”作为“节点聚集度”影响“城市绿色创新效率”的中介变量,由于微观个体的存款金额最终用途差异性大、不便统计,且与其收入水平有密切关系,故采用“剔除城乡居民储蓄余额后的人均金融机构存款余额”来衡量。

### (4) 控制变量选择

参考李健等(2019)、彭文斌等(2019)的研究<sup>[7][28]</sup>,本文在城市层面选取如下控制变量:一是“对外开放程度”,采用“实际利用外商投资额占GDP比重”来衡量。城市对外开放有助于引进高水平技术、高素质人才及外商直接投资等创新要素,促进自身创新能力提高;但是无差别的外资引进也可能带来污染产业,沦为“污染天堂”(徐志伟,2016)<sup>[32]</sup>,且过多的技术引进在一定程度上也不利于企业自主创新,进而不利于城市绿色创新效率的提高。二是“教育发展水平”,采用“每万人高等学校在校学生人数”来衡量。城市的教育发展水平越高,创新能力和人力资本水平往往也越高,有利于企业开展绿色创新活动。三是“国际互联网用户”,采用“国际互联网用户数与城市总人口比值”来衡量。城市中的信息需要借助

① 以往研究通常将引力常数  $K$  取值为 1,但引力常数的取值不影响对比分析,故参照吕拉昌等(2015)做法进行适当调整<sup>[29]</sup>,最终确定  $K$  值为  $10^7$ 。

② 地理距离基于城市的经纬度数据计算,经纬度数据来自 <http://citycode.blacklife.cn/index.php>。

媒介进行交流传递,便捷高效的传递方式能够降低交流成本、提高信息可获得性,但互联网上的信息质量不具有辨别性,也可能会影响创新成果的转化。四是“规模以上企业密度”,采用“每平方公里规模以上企业数”来衡量。企业是创新活动的重要行为主体,规模以上企业通常具有较强的创新能力,更有条件开展绿色创新活动。五是“服务业就业占比”,采用“第三产业就业人数占第一、二、三产业就业总人数比重”来衡量。服务业发展在获取知识、开拓创新思路与技术启发等方面具有重要作用,服务业的繁荣能够促进工业企业的绿色创新。

### 3. 数据来源与处理

基于数据可获得性,本文剔除拉萨、乌鲁木齐等数据缺失较多的城市,最终选择2010—2018年中国279个地级及以上城市为研究样本<sup>①</sup>。数据主要来源于相应年度的《中国城市统计年鉴》、EPS全球数据统计分析平台和中经网统计数据库,部分缺失数据通过查找样本城市所属省份统计年鉴或线性插值法进行补充。最终得到279个城市样本的2511个观测值。为消除样本中异常值的影响,对所有连续变量在5%~95%分位上进行缩尾处理。主要变量的描述性统计如表1所示。

表1 主要变量的描述性统计

	变 量	均值	标准误	最小值	最大值
被解释变量	城市绿色创新效率	0.293 6	0.225 8	0.067 0	1.000 0
解释变量	节点枢纽性(加1后取自然对数)	2.793 4	2.300 0	0.000 0	7.014 9
	节点聚集度(加1后取自然对数)	0.509 4	0.168 3	0.000 0	0.693 1
中介变量	交通基础设施(千米/平方千米)	1.062 9	0.469 3	0.311 6	1.896 0
	金融机构存款水平(万元/人)	3.349 2	4.132 5	0.526 2	16.048 2
控制变量	对外开放程度(%)	1.649 6	1.486 7	0.031 6	5.115 6
	教育发展水平(人/万人)	161.542 3	178.813 6	17.940 8	706.102 8
	信息化水平(万户/万人)	0.256 2	0.282 0	0.023 4	1.072 0
	规模以上企业密度(个/平方千米)	0.136 6	0.166 1	0.005 1	0.638 3
	服务业就业占比(%)	52.162 9	12.031 1	30.280 0	73.400 0

## 四、实证分析结果

### 1. 基准模型回归及中介效应检验结果

表2为基准模型(1)的回归结果,其中,(1)列未纳入控制变量和固定效应,(2)(3)(4)(5)列依次引入控制变量、时间固定效应和省份固定效应。“节点枢纽性”的估计系数均在1%或5%的水平上显著为正,表明城市在城市创新网络中的节点枢纽性提高会显著促进其绿色创新效率的提升。“节点聚集度”的估计系数均为正,且除(3)(5)列外在5%的水平上显著性,表明城市在城市创新网络中的节点聚集度对其绿色创新效率具有正向影响。

<sup>①</sup> 基于城市层面数据的可获得性,本文选择2010年作为研究样本起始时间;目前城市统计年鉴仅公布至2019年的数据,但2019年地级市存在区划调整情况(如原为地级市的莱芜市并入济南市)且部分数据缺失,故选择2018年作为样本结束时间。由于本文研究的279个城市中存在行政级别差异,而城市间差距过大易会导致估计偏误,因而在实证模型中引入省份固定效应,同时通过剔除直辖市样本进行稳健性检验。

表2 基准模型回归结果

变 量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
节点枢纽性	0.008 3*** (3.55)	0.006 9*** (2.98)	0.004 7** (2.05)	0.007 3*** (3.15)	0.005 1** (2.22)
节点聚集度	0.058 1** (2.46)	0.051 5** (2.21)	0.006 6 (0.27)	0.046 5** (1.99)	0.000 7 (0.03)
对外开放程度		-0.025 9*** (-6.95)	-0.017 4*** (-4.71)	-0.025 2*** (-6.66)	-0.016 5*** (-4.39)
教育发展水平		0.000 1** (2.44)	0.000 0 (0.58)	0.000 1** (2.43)	0.000 0 (0.71)
信息化水平		-0.032 5** (-2.46)	-0.015 6 (-1.19)	-0.029 1** (-2.19)	-0.012 9 (-0.99)
规模以上企业密度		0.348 4*** (5.31)	0.319 1*** (4.80)	0.250 3*** (3.28)	0.211 5*** (2.73)
服务业就业占比		0.000 6 (1.21)	-0.000 1 (-0.05)	0.000 8 (1.49)	0.000 1 (0.23)
时间固定效应	未控制	未控制	控制	未控制	控制
省份固定效应	未控制	未控制	未控制	控制	控制
观测值	2 511	2 511	2 511	2 511	2 511

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别代表在 1%、5%、10% 的水平下显著,括号内数值为 t 值,下表同。

表3以“交通基础设施”为中介变量的检验结果显示,交通基础设施的部分中介效应显著。“节点枢纽性”和“交通基础设施”的估计系数均显著为正,表明样本城市在创新网络中节点枢纽性的提高可以促进其交通基础设施的改善,交通基础设施的改善则可以促进城市绿色创新效率的提高,交通基础设施在节点枢纽性促进城市绿色创新效率过程中起到正向的部分中介作用,即城市节点枢纽性的提高可以通过完善交通基础设施的路径来提升城市绿色创新效率,研究假说 H1 得到验证。

表3 “交通基础设施”在“节点枢纽性”影响“城市绿色创新效率”中的中介效应检验结果

变量	城市绿色 创新效率	交通 基础设施	城市绿色 创新效率	城市绿色 创新效率	交通 基础设施	城市绿色 创新效率
节点枢纽性	0.007 3*** (3.15)	0.005 9** (2.13)	0.007 0*** (3.08)	0.005 1** (2.22)	0.006 6** (2.39)	0.005 1** (2.21)
交通基础设施			0.161 7*** (6.37)			0.069 5** (2.44)
节点聚集度	0.046 5** (1.99)	0.115 5*** (3.31)	0.038 6* (1.66)	0.000 7 (0.03)	0.118 2*** (3.30)	-0.002 0 (-0.08)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	未控制	未控制	未控制	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
观测值	2 511	2 511	2 511	2 511	2 511	2 511
R <sup>2</sup>		0.734 3			0.744 3	

表4以“金融机构存款水平”为中介变量的检验结果显示,存在遮掩效应。“节点聚集度”对“金融机构存款水平”的估计系数显著为负,表明节点聚集度的提高会带来金融机构存款水平的降低;而“节点聚集度”和“金融机构存款水平”对“城市绿色创新效率”的估计系数均显著为正,表明存在遮掩效应。遮掩效应属于广义中介效应(温忠麟等,2014)<sup>[25]</sup>,仍可对该影响路径进行解释(罗一君等,2017)<sup>[33]</sup>,即城市节点聚集度的提高可以通过降低金融机构存款水平来为绿色创新活动提供更多资金支持,进而提高城市绿色创新效率,研究假说H2得到验证。

表4 “金融机构存款水平”在“节点聚集度”影响“城市绿色创新效率”中的中介效应检验结果

变 量	城市绿色 创新效率	金融机构 存款水平	城市绿色 创新效率	城市绿色 创新效率	金融机构 存款水平	城市绿色 创新效率
节点聚集度	0.046 5** (1.99)	-0.587 3* (-1.86)	0.046 0** (1.98)	0.000 7 (0.03)	-0.780 8** (-2.54)	0.000 8 (0.03)
金融机构存款水平			0.007 4*** (4.29)			0.000 4 (0.18)
节点枢纽性	0.007 3*** (3.15)	0.027 9 (1.12)	0.006 8*** (2.97)	0.005 1** (2.22)	0.026 5 (1.11)	0.005 1** (2.21)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	未控制	未控制	未控制	控制	控制	控制
省份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
观测值	2 511	2 511	2 511	2 511	2 511	2 511
R <sup>2</sup>		0.721 1			0.756 4	

## 2. 稳健性检验与内生性处理

本文采用两种方法进行稳健性检验:(1)剔除直辖市样本。由于样本中的4个直辖市与其他城市具有明显差异,本文剔除直辖市后重新进行模型估计。(2)替换被解释变量。借鉴肖黎明等(2020)的做法<sup>[34]</sup>,改变投入产出指标,增加能源投入(采用“全社会用电量”来衡量)和反映绿色福利的期望产出(采用“建成区绿化覆盖率”来衡量),同时,用“绿色专利授权数”替换“专利授权数”,重新计算“城市绿色创新效率”后进行模型估计。估计结果见表5,“节点枢纽性”的估计系数均为正,且绝大部分显著,“节点聚集度”的估计系数也大多为正(仅1个为负且不显著),表明本文的分析结果基本稳健。

表5 稳健性检验结果

变 量	剔除直辖市样本			替换被解释变量		
节点枢纽性	0.004 3* (1.88)	0.007 1** (3.12)	0.005 0** (2.18)	0.013 5*** (2.79)	0.011 0* (2.27)	0.004 9 (1.04)
节点聚集度	0.007 1 (0.30)	0.044 9* (1.95)	-0.000 4 (-0.02)	0.179 1*** (3.45)	0.169 6*** (3.26)	0.050 2 (0.95)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	未控制	控制	未控制	未控制	控制
省份固定效应	未控制	控制	控制	未控制	控制	控制
观测值	2 475	2 475	2 475	2 511	2 511	2 511

从理论上讲,节点枢纽性、节点聚集度与城市绿色创新效率之间可能存在较强的内生性。一方面,节点枢纽性和节点聚集度与城市绿色创新效率可能存在反向因果关系,随着城市绿色创新效率的提高,城市经济发展水平进一步提升,促进创新要素和活动的聚集与流动,进而节点枢纽性和节点聚集度也会相应提高。另一方面,城市绿色创新效率受到多方因素的影响,可能存在遗漏变量偏误。基于此,本文进一步采用工具变量法进行内生性处理。选取“医院、卫生院数量”作为“节点枢纽性”的工具变量,“地表起伏度”作为“节点聚集度”的工具变量<sup>①</sup>,检验结果见表6。(1)(2)(3)列仅用“医院、卫生院数量”作为“节点枢纽性”的工具变量进行检验,(4)(5)(6)同时用“医院、卫生院数量”和“地表起伏度”作为“节点枢纽性”和“节点聚集度”的工具变量进行检验。检验结果显示,未出现弱工具变量问题,工具变量有效,“节点枢纽性”的估计系数均显著为正,“节点聚集度”的估计系数为正,与前文分析结果基本一致,验证了工具变量的合理性与实证结果的稳健性。

表6 内生性处理结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
节点枢纽性	0.059 7*** (6.70)	0.034 1*** (3.74)	0.052 8*** (6.02)	0.182 4*** (3.19)	0.105 4** (2.55)	0.105 2*** (2.99)
节点聚集度				3.217 5** (2.25)	1.200 1 (1.64)	0.967 6 (1.42)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	未控制	控制	控制	未控制	控制
省份固定效应	未控制	控制	控制	未控制	控制	控制
观测值	2 511	2 511	2 511	2 511	2 511	2 511
R <sup>2</sup>	0.245 0	0.315 9	0.327 4	0.246 6	0.318 7	0.330 2
第一阶段 F 统计量	73.400 0	284.120 0	163.230 0	68.600 0	291.600 0	160.970 0

### 3. 区域异质性分析

中国幅员辽阔,东、中、西部地区在经济发展水平、资源禀赋、创新政策等方面存在差异性。总体来看,城市密度和城市经济发展水平在东、中、西部地区依次递减,因此本文分别对东、中、西部3个子样本进行模型回归<sup>②</sup>,以考察节点枢纽性和节点聚集度对城市绿色创新效率的影响是否有区域差异,分析结果见表7。“节点枢纽性”的估计系数在东部和中部地区均在1%的水平上显著为正(且东部地区的系数值显著大于中部地区),而在西部地区不显著;“节点聚集度”的估计系数在西部和中部地区分别均在1%和5%的水平上显著为正,而在东部地区不显著。可见,随着城市密度和经济发展水平的提高,城市在创

① 随着医疗健康逐渐为大众所重视,医疗水平的差异能够在一定程度上影响城市间创新要素(尤其是创新人才)的流动,进而影响城市的节点枢纽性,但其对城市绿色创新效率基本没有直接影响,故本文选择以“医院、卫生院数量”作为“节点枢纽性”的工具变量。自然地理因素在城市经济领域是较为优良的外生冲击(Combes et al, 2015)<sup>[35]</sup>。自然地理因素基本不会受城市经济水平与城市绿色创新效率的影响,但可以间接地影响城市创新活动的开展,这保证了其具有外生性(王峻等, 2021)<sup>[36]</sup>。河流和地形等自然地理因素能够影响创新要素的积聚,进而可以在一定程度上影响城市的节点聚集度,而地表起伏度能够客观地反映城市地形,故本文选择以“地表起伏度”作为“节点聚集度”的工具变量。

② 东部地区包括北京、天津、上海、河北、辽宁、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南,中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南;西部地区包括重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、宁夏、新疆、广西、内蒙古、青海,本文将279个样本城市按所属省市区划分至东、中、西部地区3个子样本进行异质性研究。

新网络中节点枢纽性的提高对其绿色创新效率提升的促进作用趋于增强,而节点聚集度的提高对其绿色创新效率提升的促进作用趋于减弱,研究假说 H3 得到验证。

表 7 区域异质性回归结果

变 量	东部地区	中部地区	西部地区	东部地区	中部地区	西部地区
节点枢纽性	0.013 8*** (2.98)	0.007 0*** (2.61)	0.002 9 (1.14)	0.014 1*** (3.05)	0.007 0*** (2.62)	0.002 1 (0.86)
节点聚集度	0.058 4 (0.84)	0.085 3** (2.05)	0.057 8*** (2.58)	0.055 8 (0.80)	0.075 5* (1.82)	0.058 9*** (2.63)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	未控制	未控制	未控制	未控制	未控制	未控制
省份固定效应	未控制	未控制	未控制	控制	控制	控制
观测值	1 215	657	639	1 215	657	639

## 五、结论与启示

在新发展阶段,要贯彻新发展理念,构建新发展格局。创新发展和绿色发展是新发展理念的两个重要内容,城市网络则是新发展格局的一个重要维度。创新发展和生态文明建设将促进城市创新网络的形成、发展和优化,城市创新网络的发育、成熟和进化也会促进创新驱动与绿色发展的融合。在城市创新网络的形成和发展过程中,创新资源和活动在城市节点的聚集(创新聚集)会形成规模效应,创新资源和活动在城市节点间的流动(创新联系)则会产生溢出效应,两者均会促进城市绿色创新效率的提升。本文以 2010—2018 年中国 279 个地级以上城市为样本,采用引力模型基于创新联系强度构建城市创新网络,测度城市在创新网络中的节点枢纽性和节点聚集度,进而检验节点枢纽性和节点聚集度对城市绿色创新效率的影响及其机制,研究发现:样本城市在创新网络中的节点枢纽性和节点聚集度与城市绿色创新效率显著正相关,表明节点枢纽性和节点聚集度的提高均会促进城市绿色创新效率提升;城市交通基础设施在节点枢纽性促进城市绿色创新效率中具有显著的正向部分中介效应,表明节点枢纽性提高可以通过完善交通基础设施的路径促进城市绿色创新效率提升;城市金融机构存款水平在节点聚集度促进城市绿色创新效率中具有显著的正向遮掩效应,表明节点聚集度提高可以通过降低金融机构存款水平的路径促进城市绿色创新效率提升;节点枢纽性对城市绿色创新效率的促进效应在东、中、西部地区依次减弱,而节点聚集度对城市绿色创新效率的促进效应在东、中、西部地区依次增强。基于上述结论,可得到以下启示:

第一,通过创新聚集和创新联系的相互促进优化城市创新网络,进而推动创新驱动与绿色发展的融合。在城市创新网络形成的初期,创新资源和活动的流动主要表现为向城市节点聚集,创新聚集带来的规模效应是创新效率提升的主要来源;当各城市的创新聚集到一定程度后,充分发挥比较优势的創新联系及其溢出效应也成为创新效率提升的重要来源。因此,要完善创新资源配置的市场机制与政府引导,在促进创新合理聚集的同时更要加强城市间的创新联系。要在持续培育各节点城市创新优势的基础上形成高效的创新分工体系,并积极搭建优势互补的创新共享平台,促进城市间的创新联系,推动各城市的创新和绿色发展。

第二,通过创新网络结构优化促进不同地区、不同类型的城市塑造自身创新优势,进而实现城市间创新合作的共赢。在城市密度和经济发展水平较高的东部地区,各城市的创新优势基本形成,应充分利用自身的创新优势与其他城市开展创新交流合作;而在城市密度和经济发展水平较低的西部地区,各城

市的创新优势正在培育,需要进一步集聚相应的创新资源和活动以形成显著的比较优势,同时也应积极寻求与其他城市的创新交流,在创新合作中加快创新优势的确立。

第三,通过加快城市基础设施建设促进创新资源流动和创新活动合作,进而强化创新联系对绿色创新效率提升的溢出效应。尤其要完善交通和通信基础设施,降低城市间、城市内的创新联系成本,打破创新合作的空间限制。同时,也要深入贯彻绿色发展理念,依靠人工智能与新能源科技全方位、全地域、全过程地推进绿色交通发展。

第四,通过数字金融等现代化多样化的投融资服务为各类创新主体和创新活动提供资金支持,进而强化创新聚集对绿色创新效率提升的规模效应。要继续实施和优化科技创新激励措施,不断健全创新风险防范体系。推行有效的绿色创新信贷与投资政策,合理配置一定比例的金融机构存款进入科技创新投资领域。同时,建立有效的创新风险分担机制,最大限度保障各类创新主体的合法利益,进而促进创新资源的有效调动与利用。

本文基于节点枢纽性与节点聚集度两个维度分析城市在创新网络中的节点特征对其绿色创新效率的影响及机制,对已有研究进行拓展与深化,但仍存在不足,有待进一步研究,包括:(1)经验分析的时段相对较短,后续研究可进行长期动态分析,提高分析结果的稳健性;(2)网络节点特征是多样化的,可进一步研究其他节点特征的相关经济效应;(3)节点枢纽性与节点聚集度对城市绿色创新效率的影响可能具有多条路径,可尝试分析其他路径的影响机制;(4)在异质性分析上也可拓展到其他层面,同时还可对不同的城市创新网络(如不同城市群的创新网络)进行比较分析。

#### 参考文献:

- [1] 邓玉萍,王伦,周文杰.环境规制促进了绿色创新能力吗?——来自中国的经验证据[J].统计研究,2021(7):76-86.
- [2] 马静,邓宏兵,蔡爱新.中国城市创新产出空间格局及影响因素——来自285个城市面板数据的检验[J].科学学与科学技术管理,2017(10):12-25.
- [3] 李金艳,李泽宇,李超.城市绿色创新效率实证研究——来自长江中游城市群的证据[J].江西财经大学学报,2016(6):3-16.
- [4] 余淑均,李雪松,彭哲远.环境规制模式与长江经济带绿色创新效率研究——基于38个城市的实证分析[J].江海学刊,2017(3):209-214.
- [5] 易明,程晓曼.长江经济带城市绿色创新效率时空分异及其影响因素[J].城市问题,2018(8):31-39.
- [6] 张静晓,刘润畅.环境规制下城市绿色创新效率演变研究——以西安市为例[J].城市与环境研究,2019(4):34-50.
- [7] 李健,马晓芳.京津冀城市绿色创新效率时空差异及影响因素分析[J].系统工程,2019(5):51-61.
- [8] 张节,李千惠.智慧城市建设对城市绿色创新效率的影响[J].统计与决策,2020(19):83-87.
- [9] 黄小勇,李怡.产城融合对大中城市绿色创新效率的影响研究[J].江西社会科学,2020(8):61-72.
- [10] 刘习平,马丽君.金融发展、投资水平与城市绿色创新效率[J].财会月刊,2020(10):137-144.
- [11] 王巧,余硕,曾婧婧.国家高新区提升城市绿色创新效率的作用机制与效果识别——基于双重差分法的检验[J].中国人口·资源与环境,2020(2):129-137.
- [12] 董会忠,李旋,张仁杰.粤港澳大湾区绿色创新效率时空特征及驱动因素分析[J].经济地理,2021(5):134-144.
- [13] 田贵贤,谢子远,郑长娟.中国城市绿色创新效率的空间演化及影响因素[J].江西社会科学,2021(8):60-69.
- [14] 鲍涵,滕堂伟,胡森林,等.长三角地区城市绿色创新效率空间分异及影响因素[J].长江流域资源与环境,2022(2):273-284.
- [15] 肖沁霖,肖黎明.绿色创新效率与生态治理绩效耦合协调的时空分异及响应——以长江经济带108个城市为例[J].世界地理研究,2022(1):96-106.
- [16] 王问芳,时培豪,黄庆华.成渝地区双城经济圈绿色创新效率、演变趋势与影响因素研究[J].西南大学学报(自然科学

- 学版),2022(3):172-182.
- [17] 盛彦文,苟倩,宋金平.城市群创新联系网络结构与创新效率研究——以京津冀、长三角、珠三角城市群为例[J].地理科学,2020(11):1831-1839.
- [18] 刘佳,安珂珂.环渤海城市旅游产业绿色创新效率的空间格局[J].华东经济管理,2020(6):27-37.
- [19] 陆菊春,王新怡.长江经济带城市绿色创新效率的时空特征及影响因素[J].科技管理研究,2021(20):224-232.
- [20] COLEMAN J S. Foundations of social theory[M]. Cambridge,MA:Harvard University Press,1994.
- [21] CAPELLO R. The city network paradigm:Measuring urban network externalities[J]. Urban Studies,2000,37(11):1925-1945.
- [22] KOKA B R,PRESCOTT J E. Designing alliance networks:The influence of network position,environmental change,and strategy on firm performance[J]. Strategic Management Journal,2008,29(6):639-661.
- [23] 陈子凤,官建成.合作网络的小世界性对创新绩效的影响[J].中国管理科学,2009(3):115-120.
- [24] MOTE J E. R&D ecology:Using 2-mode network analysis to explore complexity in R&D environments[J]. Journal of Engineering and Technology Management,2005,22(1-2):93-111.
- [25] 温忠麟,叶宝娟.中介效应分析:方法和模型发展[J].心理科学进展,2014,22(05):731-745.
- [26] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research,2001,130(03):498-509.
- [27] 吕岩威,谢雁翔,楼贤骏.中国区域绿色创新效率时空跃迁及收敛趋势研究[J].数量经济技术经济研究,2020(5):78-97.
- [28] 彭文斌,文泽宙,邝嫦娥.中国城市绿色创新空间格局及其影响因素[J].广东财经大学学报,2019(1):25-37.
- [29] 吕拉昌,梁政骥,黄茹.中国主要城市间的创新联系研究[J].地理科学,2015(1):30-37.
- [30] 吴登生,李若筠.中国管理科学领域机构合作的网络结构与演化规律研究[J].中国管理科学,2017(9):168-177.
- [31] 郁湧,王莹港,罗正国,等.基于聚类系数和节点中心性的链路预测算法[J].清华大学学报(自然科学版),2022(1):98-104.
- [32] 徐志伟.工业经济发展、环境规制强度与污染减排效果——基于“先污染,后治理”发展模式的理论分析与实证检验[J].财经研究,2016(3):134-144.
- [33] 罗一君,孔繁昌,牛更枫,等.压力事件对初中生抑郁的影响:网络使用动机与网络使用强度的作用[J].心理发展与教育,2017(3):337-344.
- [34] 肖黎明,肖沁霖,张润婕.城市绿色创新效率与生态治理绩效协调的时空演化及收敛性分析——以长江经济带城市为例[J].地理与地理信息科学,2020(6):64-70.
- [35] COMBES P,GOBILLON L. The empirics of agglomeration economies[J]. Handbook of Regional and Urban Economics,2015,5(3):247-348.
- [36] 王峤,刘修岩,李迎成.空间结构、城市规模与中国城市的创新绩效[J].中国工业经济,2021(5):114-132.

## Characteristics of Network Node and Improvement of Urban Green Innovation Efficiency: Based on the Perspective of Node Centrality and Node Aggregation

ZHANG Ming-dou<sup>a</sup>, LI Xue-si<sup>b</sup>

(*a. School of Economics; b. Economic and Social Development Research Institute, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, Liaoning, China*)

**Abstract:** With the continuous enhancement of innovation links between cities, the optimization and

development of urban innovation networks will play an increasingly prominent role in promoting the efficiency of urban green innovation. Some studies have examined the spatial spillover effect of urban green innovation efficiency and the influence of urban innovation network characteristics, but few works of literature focus on the impact of urban network node characteristics on its green innovation efficiency, especially lack of corresponding empirical analysis.

This paper believes that in the urban innovation network, each city is a node in the network. The aggregation of innovation resources and activities at nodes produces scale effects, and the flow of innovation resources and activities between nodes brings spillover effects, both of which are conducive to the improvement of urban green innovation efficiency. Therefore, the centrality of nodes, which reflects the importance of nodes in network connections, and the increase in the degree of node aggregation, which reflects the degree of clustering of different nodes in the network, are both conducive to the improvement of urban green innovation efficiency. The improvement of node centrality puts forward higher requirements for the city's infrastructure construction, so it can promote the efficiency of urban green innovation by improving the path of infrastructure; the improvement of node aggregation degree brings more demands and opportunities for urban financial development, so it can promote the efficiency of urban green innovation by increasing the scale of innovation investment and financing. In areas with high urban density and economic development level, the innovation connection between cities is more convenient, and the improvement of node centrality has a greater role in promoting the efficiency of urban green innovation; however, in areas with low urban density and economic development level, the efficiency of innovation aggregation is relatively high, and the improvement of node aggregation degree has a greater role in promoting the improvement of urban green innovation efficiency. Taking 279 cities in China from 2010 to 2018 as a sample, the urban innovation network is constructed through the gravity model, and the node centrality and node aggregation degree are measured. The analysis found that the node centrality and node aggregation degree have a significant positive impact on the efficiency of urban green innovation; urban transportation infrastructure has a significant partial intermediary effect in the promotion of urban green innovation efficiency by node hub, and the deposit level of urban financial institutions has a significant masking effect in the promotion of urban green innovation efficiency by node agglomeration; the promotion effect of node centrality on urban green innovation efficiency weakens in turn in the eastern, central and western regions, while the promotion effect of node agglomeration increases in turn.

Compared with the existing literature, this paper mainly expands and deepens this study from three aspects: one is to expand the research on the influencing factors of urban green innovation efficiency from the perspective of network node characteristics; the other is to deepen the network node characteristics from the perspective of influencing paths and regional heterogeneity; the third is to provide empirical evidence for promoting the efficiency of green innovation by improving the characteristics of network nodes.

This paper reveals the important role of the evolution of urban innovation network (the improvement of node centrality and node aggregation) in improving the efficiency of green innovation, its influence path and regional heterogeneity, which is conducive to further promoting innovative development and green development by optimizing the development pattern of the urban network in the new development stage.

**Key words:** urban innovation network; node characteristics; green innovation efficiency; innovation aggregation; innovation connection; node centrality; node aggregation degree

**CLC number:** F224.33; F290

**Document code:** A

**Article ID:** 1674-8131(2022)02-0001-15

(编辑:刘仁芳)