

# 科技投入、网络特征与生态效率

——以中原城市群为例

王文彬<sup>1,2</sup>, 马 歆<sup>2</sup>

(1. 河海大学 商学院, 南京 210098; 2. 华北水利水电大学 管理与经济学院, 郑州 450046)

**摘要:** 基于复杂网络研究的视角, 以城市群生态效率为研究对象, 探讨城市科技投入及网络特征对生态效率的影响。利用30个城市2003—2017年面板数据测度了中原城市群生态效率, 基于地理引力模型构建城市群生态关联网络, 获取城市个体网络特征指标, 并分析城市科技投入和网络特征对生态效率的影响效果。研究发现: ①中原城市群生态效率总体呈持续上升趋势, 表现出“一体两翼”的空间分布态势; 城市生态效率水平个体差异显著, 且差距不断扩大。②城市群网络连通性较高, 整体网络密度先升后降; 郑-焦-洛-新等构成城市群的核心极, 接近核心区域的城市生态水平较高; 城市个体中心度差异较大。③科技投入、接近中心度对生态效率有显著正向影响, 科技投入与接近中心度存在显著的交互作用且呈现正向影响; 产业结构和城镇化率也对生态效率有显著的正向影响, 而外资利用未表现出显著影响。

**关键词:** 科技投入; 网络特征; 生态效率; 中原城市群

**中图分类号:** F062.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1002—980X(2020)6—0109—10

城市群是经济活动空间格局分布的重要表现形式, 也是支配国家经济命脉的重要聚合载体, 相互联系的城市群已经成为优化区域资源配置的重要引擎<sup>[1-2]</sup>。中原城市群肩负着5省30市近1.65亿人民的福祉, 是实现中部崛起的重要支撑。2016年12月国家印发的《中原城市群发展规划》中明确提出“要将中原城市群建设成为内陆地区双向开放新高地和绿色生态发展示范区”。2019年“两会”期间, 习近平总书记在参加河南代表团座谈时, 强调河南“要扛稳粮食安全的重任, 要树牢绿色发展的理念”; 2019年9月视察河南期间, 再次强调要高度重视生态环境保护工作, 把黄河生态保护好, 提升自然生态系统质量和稳定性。高质量的生态文明建设不仅是中原城市群战略定位的要求, 也是保障中原经济区粮食主产区功能的必然要求。然而, 目前以河南省为主体的中原城市群生态效率水平并不容乐观, 不仅低于中部平均水平, 也低于全国平均水平, 经济发展-资源禀赋-生态环境的协调程度不容乐观<sup>[3-5]</sup>。

随着中国生态文明建设进程的加速, 生态效率的相关研究成果日渐丰富, 关注程度呈持续上升态势<sup>[6]</sup>。生态效率也由价值增量与环境影响增量比值的狭义理解, 扩展到能源投入、物质循环等更广阔的范围<sup>[7]</sup>。尽管生态效率的外延在不断丰富, 但其核心与本源仍是追求环境损耗最小化及社会效益最大化<sup>[8]</sup>。已有研究聚焦于城市群发展水平差异的形成原因及影响, 综合评价、空间计量分析及数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)等方法较为多见<sup>[9-11]</sup>, 在诸多影响要素中, 科技投入尤其得到学者广泛关注<sup>[12]</sup>; 另一方面, 随着社会流动性的加剧, “城市流”的概念也随之兴起<sup>[13]</sup>, 学者开始关注城市群之间、城市群内部的个体之间由于信息流、资金流、物流、人流而形成的网络。社会网络分析、复杂网络理论等方法由于能够对网络总体以及构成个体之间的关联特征等进行刻画和描述, 成为重要的研究手段, 针对城市群的社会网络分析(social network analysis, SNA)成果也逐渐涌现<sup>[14-16]</sup>。值得注意的是, 即使在外文文献中也以中国学者的成果居多, 可见, 城市群问题在某种意义上具有一定的“中国特色”, 这与中国正处于城镇化发展的黄金阶段不无关系。

回顾既有文献, 尽管城市群生态效率相关研究已取得一定的成果, 但仍存在改进的空间: 第一, 在研究对象上, 既有研究多以省际面板数据为主, 涉及城市群的又多集中在长江流域, 对于中部地区尤其是中原城市

**收稿日期:** 2019—11—08

**基金项目:** 国家社会科学基金“时空分异视角下碳交易对我国区域经济发展的影响”(16BJL076); 河南省科技厅软科学项目“河南省生态水利行业系统性风险传染机理与阻断策略研究”(202400410129); 河南省教育厅人文社会科学基金“河南省交通物流网络构建研究”(2020—ZZJH254)

**作者简介:** 王文彬(1983—), 男, 河南信阳人, 河海大学商学院博士研究生, 华北水利水电大学管理与经济学院讲师, 研究方向: 技术经济、区域经济; 马歆(1972—), 男, 天津市人, 华北水利水电大学管理与经济学院教授, 博士研究生导师, 研究方向: 生态管理、区域经济。

群的关注较少。第二,在研究方法上,多以空间计量分析为主,忽视城市之间的能动作用,易陷入空间计量的“相邻性”局限,缺乏全局视野。

基于上述分析,本研究可能的贡献包括以下两点:第一,丰富研究的应用层面。本研究既是对现有文献的有益补充,又可为中原城市群有效联动、强化合作、协调发展提供科学参考,也有助于增进黄河流域中下游地区的生态保护与高质量发展水平。第二,拓展既有的研究范式。城市群本质上是经济活动的空间格局,空间联系是形成区域空间结构的内在动力,空间内的城市以关联或非关联的方式产生作用,城市生态效率作为经济活动的产出,同样具备网络关联特征,因此使用网络分析方法探讨城市群生态效率的时空状态及影响因素具有天然的合理性和较好的可行性。基于上述逻辑,本研究以生态效率为因变量,以科技投入和城市个体网络特征值为自变量,构建计量分析模型,探讨科技投入、网络特征对生态效率的影响机制。

综上所述,本研究以中原城市群5省30市生态效率为研究对象,首先利用DEA扩展模型测算2003—2017年间生态效率,然后依据引力模型构建城市群生态关联网,应用SNA方法获得个体网络特征值,最后引入科技投入变量,揭示相关因素对中原城市群生态效率水平的影响作用,验证相关假设,并针对性地提出优化城市群生态效率的对策。

## 一、理论分析与研究假设

### (一)科技投入与生态效率

杨传喜等<sup>[17]</sup>重点研究了科技投入对技术效率的影响,通过对中国农业科技资源的技术效率测算,发现农村科技对技术效率有显著的正向影响。陈新华等<sup>[18]</sup>认为科技进步是生态效率增长的源泉,并将其作用途径总结为人力资本积累、研究与开发、国际技术扩散、产业结构调整等4类形式,结合广东省21城市的实证分析,发现除研发投入外,其余因素均表现出正向影响。严翔和成长春<sup>[19]</sup>以长江经济带11省市科技创新效率为研究对象,发现其对生态环境的门槛效应显著,正向作用表现出倒“U”型变化趋势。郭莉等<sup>[20]</sup>认为环境技术创新变量对不同区域产业生态效率的影响作用并不一致,在中西部地区更为明显。孟凡生和邹韵<sup>[21]</sup>在对生态能源效率的研究过程中,也发现研发投入与生态能源效率存在显著正相关关系。相关研究在不同程度上验证了“科学技术是第一生产力”的理论,认为科技创新是改善生态环境的重要手段。基于此,本文提出假设1:

科技投入对生态效率有正向影响(H1)。

### (二)网络结构与生态效率

刘华军和刘传明<sup>[22]</sup>考察中国省际能源效率时,发现网络个体中心性的提升对能源效率改善有显著促进作用,点度中心度、中介中心度以及接近中心度均对效率水平有显著的正向影响。马军和马晓洁<sup>[23]</sup>运用协同理论和社会网络分析对内蒙古自治区的草原碳汇协同管理活动进行了量化分析,认为网络的凝聚度较弱、部分结点占据核心位置,无法实现权责平衡。刘蕴<sup>[24]</sup>认为社会网络关系嵌入过度对企业资源获取具有负面影响,所谓“过度”是指过度信任、非理性承诺、关系过度紧密等内容,认知偏差和网络锁定在其中起到中介作用。林黎和李敬<sup>[25]</sup>运用网络分析方法考察了长江经济带环境空间关联状况,认为城市的中间中心度越高,对其他地区环境污染的影响越大,而接近中心度越小,受其他地区污染影响的可能性也越小。基于此,本文提出假设2:

网络特征对生态效率有正向影响(H2);

点度中心度对生态效率有正向影响(H2a);

接近中心度对生态效率有正向影响(H2b);

中介中心度对生态效率有正向影响(H2c)。

## 二、研究设计

### (一)研究对象与数据

中原城市群位于中国“两横三纵”城市化战略格局陆桥通道与京广通道交汇处,区位优势明显,群内包括河南省郑州、洛阳、开封等18个城市,山西省长治、晋城、运城3个城市,河北省邢台与邯郸2个城市,山东省聊城与菏泽2个城市以及安徽省淮北、蚌埠、宿州、阜阳及亳州等5个城市,涵盖5省30市。截至2018年底,

中原城市群国土面积约 28.7 万平方公里,常住人口约 1.65 亿,GDP 总量约 7.18 万亿元,经济体量仅次于长三角、珠三角和京津冀等城市群,是中国经济发展的新增长极。研究期间选取为 2003—2017 年,研究数据主要来源于 2004—2018 年《国家统计年鉴》《河南省统计年鉴》《河北省统计年鉴》《山西省统计年鉴》《山东省统计年鉴》《安徽省统计年鉴》《中国城市统计年鉴》地区国民经济和社会发展统计公报、环保厅(局)地区环境状况公告。此外,城市空间距离按照两地火车通行里程计算,从火车网([www.huochet.net](http://www.huochet.net))查询获取。

## (二)研究理论与方法

### 1. 基于理想序列的 DEA 改进模型

DEA 由 Charnes 等<sup>[26]</sup>提出,是对决策单元(decision making units, DMU)的有效生产前沿面进行测算最常用的方法。为满足生态效率研究的需求,学者将环境污染纳入研究框架,提出包含非期望产出的 BCC/CCR-DEA 模型<sup>[27]</sup>。但传统的 DEA 模型所计算的效率最大值为 1,因此可能出现多个效率值为 1 的决策单元,从而无法进行有效识别。针对这一问题,学者提出两种解决办法:第一,使用超效率 SBM-DEA 模型,允许效率值大于 1。但该方法的缺点是不利于进行时序分析,即影响因素的增量与效率水平的增量并非一致。第二,引入“理想”序列,即取面板数据中各期最优值构建人工序列,该序列的效率水平为 1,所有的决策单元均与理想序列进行比较,所得效率水平兼具纵向与横向的比较意义<sup>[28]</sup>。

建立生态效率测算的 DEA 模型:如果第  $k$  个决策单元  $DMU_k$  是有效的( $j$  为除  $k$  外的其他决策单元),那么包含非期望产出的改进 DEA 模型如式(1)所示。

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}_i}{x_{ik}}}{1 + \frac{1}{r_1 + r_2} \left( \sum_{p=1}^{r_1} \frac{\bar{y}_p^d}{y_{pk}^d} + \sum_{q=1}^{r_2} \frac{\bar{y}_q^u}{y_{qk}^u} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \bar{x}_i \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j, i = 1, 2, \dots, m \\ \bar{y}_p^d \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{pj}^d \lambda_j, p = 1, 2, \dots, r_1 \\ \bar{y}_q^u \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{qj}^u \lambda_j, q = 1, 2, \dots, r_2 \\ \bar{x} \geq x_k, \bar{y}^d \leq y_k^d, \bar{y}^u \geq y_k^u, \lambda \geq 0 \end{cases}$$

其中: $\rho$  为决策单元效率值; $n$  为决策单元数量; $x$  为投入向量; $y^d$  为期望产出向量; $y^u$  为非期望产出向量; $m$ 、 $r_1$ 、 $r_2$  分别为投入变量、期望产出变量以及非期望产出变量的数量; $i$ 、 $p$ 、 $q$  分别表示第  $i$  种投入、第  $p$  种期望产出和第  $q$  种非期望产出; $\lambda$  表示对应权重向量。根据式(1),可以计算中原城市群 30 个城市在 2003—2017 年间的生态效率  $\rho_{kt}$ ,其中: $k=1, 2, \dots, 31$ ;  $t=2003, 2004, \dots, 2017$ 。需要注意的是, $k=31$  表示人工构建的“理想”序列,产出导向下相应的指标取值均为该时序数据中的最大值。

生态效率的投入主要表现为资源投资,包括土地投入(城市建设用地面积)、能源投入(全社会用电总量、城市用水总量)、人力投入(三产从业人数)、资本投入(固定资产投资总额)等;期望产出包括经济产出(人均 GDP)、生态产出(绿化面积);非期望产出包括废水排放、废气排放、烟尘排放等。

### 2. 空间作用万有引力理论

地理学家和社会科学家较早就将万有引力理论引入经济地理研究,成为经济地理学研究的重要基石。该理论认为人口迁移与城市质量以及城市距离存在密切关系,利用该模型能够测算城市之间的联系强度<sup>[29]</sup>。

根据生态效率测度结果,构建中原城市群生态联系模型,如式(2)所示。

$$R_{ij} = k_{ij} \frac{\sqrt[3]{P_i \rho_i G_i} \sqrt[3]{P_j \rho_j G_j}}{D_{ij} \sqrt{PerG_i - PerG_j}} \quad (2)$$

其中:  $k_{ij} = \frac{\rho_i}{\rho_i - \rho_j}$ ;  $R_{ij}$  表示城市  $i$  与城市  $j$  之间的生态联系强度;  $k_{ij}$  为城市  $i$  对  $R_{ij}$  的影响强度;  $P_i$  和  $P_j$  分别表示城市  $i$  和城市  $j$  的城镇人口数量;  $\rho_i$ 、 $\rho_j$  分别为城市  $i$  和城市  $j$  的生态效率值;  $G_i$  和  $G_j$  分别表示城市  $i$  和城市  $j$  的 GDP 水平;  $D_{ij}$  表示城市  $i$  和城市  $j$  之间的距离;  $PerG_i$  和  $PerG_j$  分别表示城市  $i$  和城市  $j$  的人均 GDP 水平, 以城市  $i$  和城市  $j$  之间的地理距离 ( $Dis_{ij}$ ) 比上城市  $i$  和城市  $j$  人均 GDP 的差值 ( $PerG_i - PerG_j$ ) 用以表示城市之间的“距离”。

基于各城市之间的生态联系强度, 可构造出  $30 \times 30$  的生态联系邻接矩阵  $A_{ij}$ ; 进而以矩阵  $A_{ij}$  各行均值  $\bar{R}_i$  为阈值, 比较城市  $i$  和城市  $j$  之间的生态联系强度与阈值大小: 若  $R_{ij} > \bar{R}_i$ , 则认为二者存在生态联系, 记城市  $i$  和城市  $j$  之间的邻接关系  $e_{ij} = 1$ , 否则认为城市  $i$  和城市  $j$  之间没有生态联系, 记  $e_{ij} = 0$ , 最终获得城市群生态关联网络  $E_{ij}$ 。

### 3. 社会网络分析(SNA)理论

SNA 以关联节点组成的网络为研究对象, 重点关注网络结构特征、拓扑性质, 以及网络中节点特征、动力特性等, 借助复杂网络等理论, SNA 在金融系统、电力系统、社会系统等领域均有较广泛的应用。经济地理学家引入网络系统分析思想, 将城市群或经济带中的节点城市通过信息、资金、物资、人口等流动要素联结起来, 构造城市网络, 用以分析网络整体、局部及个体特征。

对于网络中的城市个体, 研究者多关注其中心性, 这是衡量城市地位的重要指征。主要涉及 3 个指标: 点度中心度(或度数中心度)、接近中心度和中介中心度(或中间中心度)。点度中心度(degree)是衡量节点城市在网络中心位置的主要指标。城市的绝对中心度指与该城市直接联系的城市数量, 内向点度中心度(入度)反映城市的凝聚力, 外向点度中心度(出度)则反映了城市的辐射力。为便于比较, 可将绝对点度中心度转化为相对点度中心度, 即计算节点的绝对点度中心度与图中最大可能度数( $n - 1$ )的比值。接近中心度(closeness)用于衡量节点城市与其他城市总体距离的大小, 指该城市与其他所有城市的捷径距离之和, 在实际分析中, 多用相对接近中心度进行分析。城市的接近中心度越小, 表明该城市越有可能居于网络中心位置。中介中心度(betweenness)用于衡量节点城市控制信息传递的能力, 即该城市会影响其他城市之间的联系。中介中心度越大意味着越有可能控制其他城市之间的沟通。

## 三、中原城市群生态效率测算及网络特征分析

### (一)生态效率测算

考虑构建的“理想”序列, 应用 DEA-Solver Pro5.0 软件对中原城市群 2003—2017 年度 30 城市生态效率水平进行测定, 同时运用 ArcGIS10.2 绘制代表性年份(2003 年、2007 年、2013 年和 2017 年)中原城市群生态效率的空间分布情况(图 1)。

由 2003—2017 年城市生态效率测算结果可知: 第一, 宏观层面来看, 中原城市群生态效率整体呈显著上升趋势。城市群生态效率均值从 2003 年的 0.08 上升至 2017 年的 0.29, 效率提升近似于线性增长。通过线性拟合可以发现, 年均增长量约为 0.0155, 拟合优度达到 0.99, 表明中原城市群生态状况呈现持续、稳定的改善态势。第二, 中观层面来看, 中原城市群生态水平呈现“一体两翼”的空间分布, 但生态多极化已初见端倪。“一体”主要由东北至西南一线的邯郸、聊城、新乡、郑州、焦作、洛阳构成, 该主轴线上的地区生态水平相对较高; “两翼”则以轴线为中心, 向两端扩散, 且生态效率水平呈下降趋势。越接近轴线的城市生态效率越高, 如濮阳、开封、平顶山、许昌、长治、南阳等, 而远离轴线的城市其生态效率水平也相对较低, 如运城、三门峡、周口、菏泽、驻马店、阜阳、亳州等; 另一方面, 邯郸、聊城以及蚌埠逐渐成为新的生态增长极, 城市群生态空间碎片化程度有所加剧。第三, 从微观层面来看, 城市个体生态效率水平差异显著。郑州、洛阳、邯郸、聊城、焦作等城市生态效率水平均值较高, 而运城、亳州、三门峡、周口、晋城等城市生态效率水平均值较低。排名首位的郑州市生态效率均值(1.00)几乎是末位城市运城(0.17)的 6 倍。值得注意的是, 城市群内生态效率水平的标准差也呈逐年增加的趋势, 表明城市之间生态水平的差距在拉大。进一步考察, 发现城市之间的生态效率水平差异(离散系数)呈现先降后升的变化趋势, 2006 年和 2014 年为两个阶段的峰值, 而 2010 年则为谷值<sup>①</sup>。

① 限于篇幅, 各年各城市生态效率水平未予展示, 如有需求, 可向作者索取。

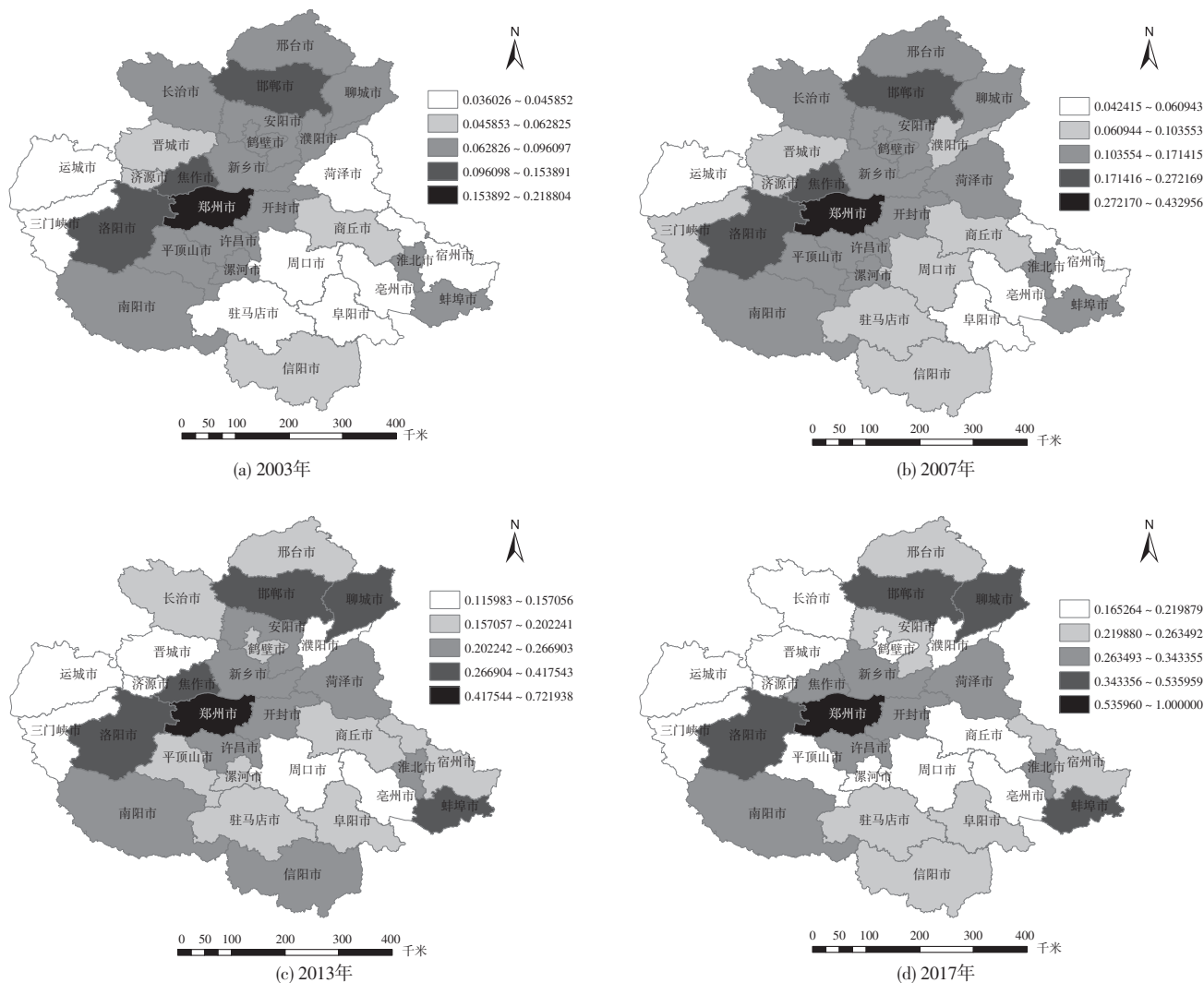


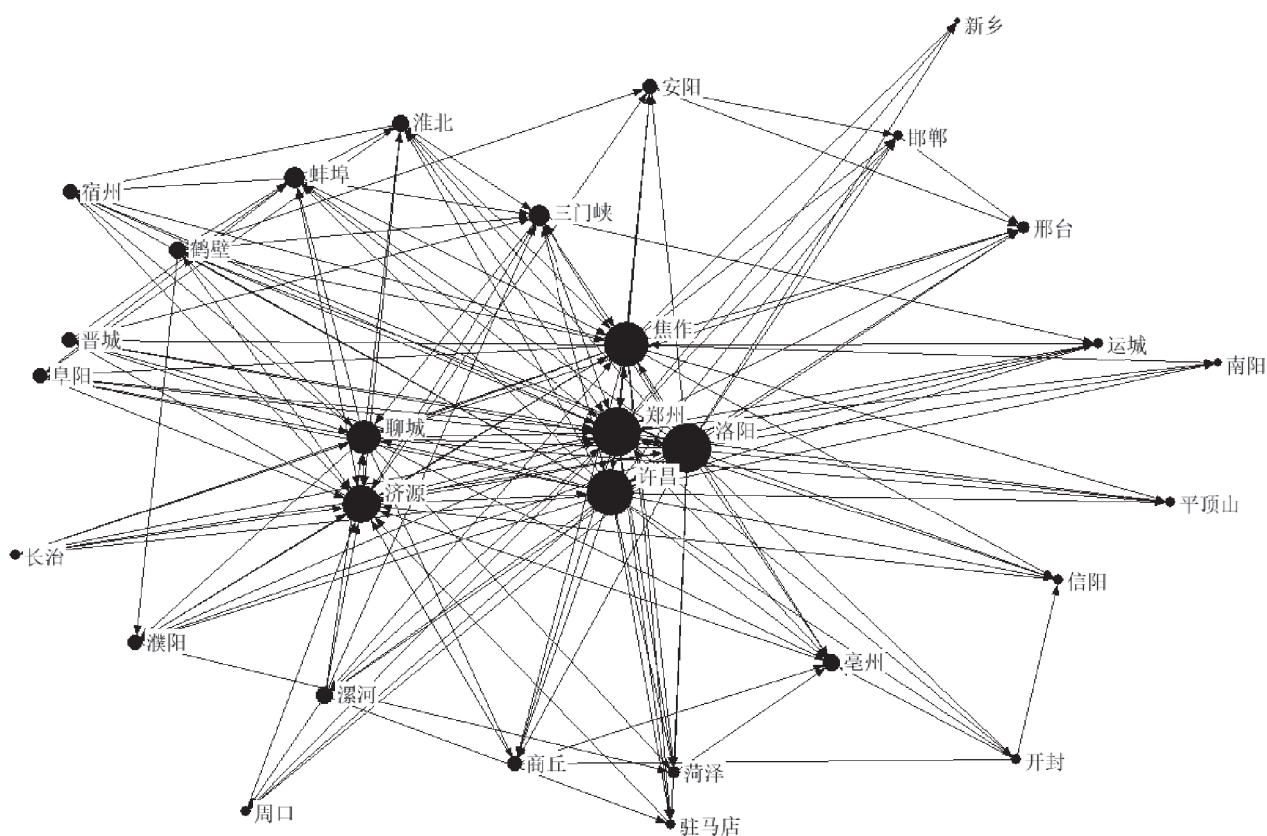
图1 2003—2017年间中原城市群各城市生态效率空间分布

(二)网络特征分析

运用万有引力模型,计算中原城市群各城市经济联系强度,通过与行阈值进行比较,构建生态联系的0-1邻接关系矩阵,使用UCINET6.0获取中原城市群网络整体以及个体的特征。

1. 整体网络特征分析

中原城市群经济联系空间网络结构如图2所示(以2017年为例)。图中节点大小表示相应城市的点度中心度,度值越大节点图标也越大。分析可以发现中原城市群网络呈现以下特征:第一,网络整体关联度为1,即城市群中没有孤立的节点。这表明中原城市群中各城市之间的联系较为密切,整体关联性显著,城市群比较稳定。城市群中任意节点均有多条关系直接连通其他节点,这意味着城市群中各成员之间的经济交流较为频繁。这既有利于城市群总体的发展,也在一定程度上保障核心城市的发展惠及其他成员。第二,网络整体密度为0.23。表明中原成员之间具有较好的生态关联基础,城市群规划具备合理性。第三,网络平均度值为6.60。表明每个城市平均与另外近7个城市有着直接的经济联系,对于只有30个城市的网络来说,城市之间的经济往来频度较高,城市联系较为活跃。其中度值最大的郑州达到26(其中入度值为20,出度值为6),表明城市群中大多数城市都与郑州存在直接经济联系。第四,节点平均距离为2.34。表明每个城市平均经过不到3个城市就可以与其他任一个城市建立经济联系。平均距离越短,城市之间发生经济往来所需的成本就越低,越有利于城市群整体发展。



同发展的骨架,结果见表1。

3. 城市个体网络特征分析

通过对城市个体进行中心性分析,可以获取每个城市在网络中的点度中心度、接近中心度和中介中心度,进而考察并揭示各城市在关联网络中的特征和作用<sup>②</sup>。

(1)点度中心度。各成员城市外向点度中心度均值为0.23,高于该均值的城市有12个,排在前三位的是洛阳、运城和新乡,表明这些城市经济外向度较高,辐射能力较强;排在后三位的则是邢台、邯郸和济源,对邻近城市辐射作用较小。内向点度中心度均值为0.23,高于该均值的城市有13个,排在前三位的是郑州、新乡和洛阳,表明这些城市具有较高的凝聚力和吸引力;排在后三位的是运城、聊城和长治。总的来看,无论是内向性还是外向性,河南省的核心城市郑(州)-新(乡)-洛(阳)形成的三角区域具有较高的经济活跃度;而中原城市群的边缘城市多属山西、山东、河北等省,安徽省的宿州和淮北同样有着较低的内外中心度和外向中心度。因此,中原城市群的发展整体均衡度仍较低,以郑州为代表的核心城市,应当更多发挥引领作用,提升辐射性,增强对周边城市的经济关注,提高城市群的凝聚力。

(2)接近中心度。外向接近中心度均值为0.43,高于该均值的城市有15个,其中前三位的城市分别是运城、洛阳和开封,表明这些城市能够较便捷的达到网络中的其他城市,在外向投资方面具有可达性的优势;后三位的城市分别是邢台、邯郸和安阳,这些城市与其他城市的平均距离最远。内向接近中心度均值为0.44,高于该均值的城市有12个,其中前三位的城市分别是郑州、新乡和开封,表明这些城市在吸引投资方面具有较好的区位优势,便于其他城市资金的进入;后三位的是运城、蚌埠和淮北,这些城市处于中原城市群的外围区域,与其他成员建立联系的成本较高,经济联系强度较弱。总的来看,接近中心度较高的城市集中于城市群核心区域,无论是引进资本还是向外投资均有较大的便利性。此外,外向接近中心度较内向接近中心度的分布更为均匀、差异更小,意味着资本“走出去”比“请进来”更为容易;从接近中心度的角度来看,城市群中的核心区域仍是郑-汴(开封)-洛的横向地带,地理上较近的山东省和山西省相关城市接近中心度也相对较高,而偏离中心的河北省与安徽省相关城市接近中心度则较低。

(3)中介中心度。中介中心度均值为0.05,高于该均值的城市有10个,前三位的城市分别是新乡、郑州和洛阳,表明这些城市居于其他城市发生经济联系的“咽喉要道”上,能够对其他城市的经济联系起到干预作用,也有可能从其他城市的经济往来中获取便利。后三位的城市分别是邢台、蚌埠和济源,前两者由于位于城市群的边缘地带,无法形成“中介”效应,济源则是由于体量较小,无法承担“中介”角色。总的来看,中介度的集中程度是个体网络各指标中最高的,中原城市群中多数成员的间接联系往往经由郑-新-洛等城市搭建起来,网络成员的影响力差异较大,网络非均质特征突出。

综合各类个体网络指标,可以发现:第一,郑-汴-洛-新构成中原城市群的核心极。在外向点度中心度、内向点度中心度、外向接近中心度、内向接近中心度和中介中心度5项指标排序中,有4项第一、2项第四、3项第五落在郑-汴-洛-新四城中,核心城市集聚程度较强。郑-汴-洛-新四城地理相邻,形成了“核心增长极”,对周围城市有较强的辐射作用,山东、山西及河北城市受影响较强,安徽相关城市距离较远,受影响较小。第二,运城、三门峡、阜阳等属于较为典型的外向型城市。外向型城市主要特点是GDP总量偏低,人口较多,发展水平相对较低,因此在经济往来中,往往处于“流出”位置。外向型城市从城市群发展中获益相对较小,属于城市群全面协调发展过程中需要重点关注的对象。第三,郑州、许昌、焦作等属于较为典型的内向型城市。与外向型城市相反,这类城市GDP总量相对较大,城镇化水平较高,经济发展水平相对领先,对周围城市有较强的吸引力。以郑州市为例,2018年新增常住人口26万,居全省首位,其中外省流入河南的人口中有36.8%流入到郑州市,而省内跨市流动人口中的59.8%流入到郑州市,且持续表现出上升趋势,对周围城市的“虹吸效应”显著。第四,开封、洛阳、新乡等属于较为典型的均衡型城市。开封、洛阳、新乡作为中原城市群的副中心,自身经济发展水平良好,在城市群发展过程中发挥了支点与纽带的作用,避免城市群陷入过度的不均衡状态。总的来看,中原城市群仍处在快速发展过程中,整体联系较为密切,核心极业已形成,但内向程度偏高,对于非河南省份城市的辐射作用不强,城市群发展质量仍待提高。

表1 中原城市群生态效率关联板块的溢出效应

| 板块  | 接收关系数 |     | 发出关系数 |     | 期望     | 实际     |
|-----|-------|-----|-------|-----|--------|--------|
|     | 板块内   | 板块外 | 板块内   | 板块外 | 内部关系比例 | 内部关系比例 |
| 板块1 | 13    | 33  | 13    | 110 | 13.79% | 10.57% |
| 板块2 | 2     | 27  | 2     | 23  | 3.45%  | 8.00%  |
| 板块3 | 6     | 62  | 6     | 9   | 41.38% | 40.00% |
| 板块4 | 7     | 59  | 7     | 39  | 31.03% | 15.22% |

② 限于篇幅,仍以2017年为例进行说明,其他年份结果未予展示。

## 四、科技投入、网络特征对生态效率的影响

### (一) 变量选取与模型构建

本文重点关注城市的科技投入以及网络特征对其生态效率水平( $Ecoeffi$ )的影响作用。科技投入强度( $Sinvest$ )用科学技术支出占一般公共预算支出的比重表示;城市的网络特征分别使用点度中心度( $Degree$ )、接近中心度( $Close$ )和中间中心度( $Between$ )表示。由于城市的外向点度中心度与内向点度中心度、外向接近中心度与内向接近中心度的相关性较强,因此仅保留外向点度中心度用以体现城市的直接关联数量,保留外向接近中心度用以体现城市与网络的整体接近程度。

借鉴已有成果<sup>[30-31]</sup>,将产业结构( $Stru$ )、城镇化率( $Citizen$ )以及外资利用强度( $FDI$ )作为控制变量纳入分析,分别用第三产业占比、城镇化人口占比以及人均  $FDI$  表示,为减少误差,对  $FDI$  变量进行对数化处理( $\ln FDI$ )。相关数据均来自于 2004—2018 年《中国城市统计年鉴》及地区(经济)统计年鉴。模型设定如下:

$$Ecoeffi_{it} = \alpha + \beta_1 Sinvest_{it} + \beta_2 Degree_{it} + \beta_3 Close_{it} + \beta_4 Between_{it} + \beta_5 X_{it} + \varepsilon_{it} + \eta_i + \mu_t \quad (3)$$

其中: $X_{it}$ 表示控制变量, $i$ 表示城市个体, $t$ 表示观察年份,包括产业结构、城镇化率、利用外资强度; $\varepsilon_{it}$ 表示残差项; $\eta_i$ 表示未观察到的城市固定效应; $\mu_t$ 表示未观察到的时间固定效应。研究基于中原城市群 30 城市 2003—2017 年的面板数据,包括 30 个截面单元的 15 年时间序列数据,共计 450 个样本观测值。

### (二) 实证结果与分析

构建模型(1)、模型(2),先对科技投入、网络特征的影响作用单独进行检验,接下来考虑科技投入与网络特征的交互影响并构建模型(3),最后引入控制变量构建模型(4)再次进行检验。采用个体、时间双控制静态面板模型,在分析前首先使用 Hausman 检验方法进行固定效应(FE)和随机效应(RE)的判别。检验结果发现,模型(1)和模型(3)支持随机效应检验,模型(2)和模型(4)支持固定效应检验。具体的回归结果见表 2。

#### 1. 科技投入与生态效率

模型(1)结果表明科技投入对生态效率影响为正且在 1% 的水平上显著,验证了假设 H1 的成立,科技投入的增加能够提升中原城市群生态效率水平。

公共财政支出中科技支出的占比每提高一个百分点,能够使得生态效率提高 7.19 个百分点,大大超过了观察期内的年均增长水平,作用显著。可见,通过加大科技投入、提升创新水平,能够促进全要素生产率的提高,并对产业结构的升级起到深远的影响。

#### 2. 网络特征与生态效率

模型(2)结果表明接近中心度对生态效率有显著的正向影响,而点度中心度以及中介中心度未表现出显著的作用,即在独立作用的情况下,假设 H2b 得到支持,而假设 H2a 和假设 H2c 未得到支持。一般来说,接近程度越高,相同的物流传输量到达共同目的地所需的成本就越低,更有利于城市交通物流竞争力的提升。当然,也有个别城市并未服从该规律的作用,如运城市外向接近中心度排名靠前,而内向接近中心度排名靠后,表明该城市向外流动较为容易,但其他城市向该城市流动则较为困难,城市资源外流严重。

#### 3. 科技投入、网络特征与生态效率

模型(3)在引入科技投入与网络特征的交互项后,点度中心度和接近中心度均受到一定程度的影响,假设 H1 和假设 H2a 得到支持。具体来看,第一,在网络特征影响下,科技投入对生态效率仍然存在显著的正向影响,但系数值由 0.0719 降至 0.0454,表明通过网络调节,科技投入的影响效应借助城市网络属性得以间接体现。第二,点度中心度表现出显著的正向影响。一般地,关联城市越多,城市受益就越多,如郑州在吸引投

表 2 个体网络结构效应回归结果

| 变量                       | (1)                | (2)                | (3)                | (4)                |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                          | RE                 | FE                 | RE                 | FE                 |
|                          | Coef.(Std. Err.)   | Coef.(Std. Err.)   | Coef.(Std. Err.)   | Coef.(Std. Err.)   |
| $Sinvest$                | 0.0719*** (0.0048) |                    | 0.0454*** (0.0140) | 0.2212*** (0.0041) |
| $Degree$                 |                    | 0.0345 (0.0635)    | 0.0896** (0.0393)  | 0.2587* (0.0356)   |
| $Close$                  |                    | 0.1112*** (0.0473) | 0.0776 (0.0486)    | 0.0523** (0.0261)  |
| $Between$                |                    | 0.1243 (0.0939)    | 0.0050 (0.0606)    | 0.0771 (0.0518)    |
| $Sinvest \times Degree$  |                    |                    | 0.0032 (0.0227)    |                    |
| $Sinvest \times Close$   |                    |                    | 0.2434*** (0.0319) |                    |
| $Sinvest \times Between$ |                    |                    | 0.0260 (0.0367)    |                    |
| $Stru$                   |                    |                    |                    | 0.0034*** (0.0005) |
| $Citizen$                |                    |                    |                    | 0.0057*** (0.0003) |
| $\ln FDI$                |                    |                    |                    | -0.0014 (0.0203)   |
| _Cons                    | 0.1149***          | 0.1354***          | 0.0723***          | -0.1973***         |
| $R^2$                    | 0.2423             | 0.2526             | 0.6142             | 0.6593             |
| $Prov > F$               | 0.0000             | 0.0000             | 0.0000             | 0.0000             |

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示变量在 1%、5% 和 10% 的水平上显著;Coef.(Std. Err.)表示系数估计值(标准误差)。

资、人口流入、资源输入方面均有较强的优势。第三,接近中心度与科技投入存在显著的交互作用,二者共同作用对生态效率有较大的影响,系数值达到0.2434,表明利用与核心城市的邻近地位,合理引导科技资金的流动,有利于自身在城市群中地位的提升。总体上,生态效率存在“蔓延”效应,即接近核心区域的城市生态效率水平也相对较高。第四,接近中心度无论是单独还是交互项均未表现出显著影响,表明居于中介地位的城市未能在城市群发展过程中获益,更多沦为“通道”。

模型(4)中除中介中心度外,其余核心变量均表现出显著的正向影响,假设H1、假设H2a、假设H2b得到支持,假设H2c未得到支持。控制变量中产业结构和城镇化率均表现出显著的正向影响,外资投入未表现出显著影响。产业结构升级有利于淘汰高污染、高耗能的落后产能,减少地区经济产出的非期望产出;城镇化率的提升有利于资源的集约化利用,尤其是对农业生态效率有促进作用。*FDI*因素则未表现出显著影响,其原因可能是*FDI*对生态效率的影响需要在从数量角度、质量角度、区域划分等方面进行细化。

## 五、研究结论

本文应用DEA扩展模型测算中原城市群30城市2003—2017年间生态效率水平,并构建城市生态关联网络,获取城市个体网络特征,以科技投入及网络特征为核心变量,分析了生态效率影响因素,得出以下主要结论:第一,中原城市群生态效率整体呈显著上升趋势,表现出“一体两翼”的空间分布,但生态多极化已初见端倪,城市个体生态效率水平差异显著。第二,各城市之间的联系较为密切,具有较好的生态关联基础,中原城市群规划具备合理性。郑州-开封-洛阳-新乡构成中原城市群的核心极,但对于非河南省城市的辐射作用不强,河北、安徽等省已逐渐形成较为独立的增长点,城市群发展质量仍待提高。第三,科技投入、产业结构和城镇化率对生态效率有正向影响,网络特征中心度和接近中心度对生态效率也有正向影响,而中介中心度和外资利用水平未表现出显著影响。

基于上述研究,本文认为应从以下几点入手着力提升中原城市群生态效率水平,实现城市群全面、均衡发展。

第一,持续加大科技投入力度。考虑到中原经济区的粮食主产区地位,应注重农业科技人员、扶农助农资金、现代化农业装备等内容的投入,强化对农业发展的支撑。要合理利用财政工具,发挥市场机制的激励作用,避免财政资金“大水漫灌”。

第二,加强城际交流和融合。城市群是区域经济发展的重要表现形式,城市之间通过资源、要素的流动形成有机组合,依托核心城市实现“以点带面”的网状增长。直接关联城市的数量以及快速到达群中其他城市的能力,对于城市生态效率的改善都有显著的积极影响。因此,一方面应当积极提升城市自身的“硬实力”,加强与核心城市的联系;另一方面,借助比较优势,分流核心城市部分功能,形成利益共享,也是实现“弯道超车”的有效途径。

第三,注重城市群发展的平衡性与全面性。中原城市群作为促进中部崛起的主体城市群,需要通过区域联动、城市互助,建设更大范围、更高层次的生态文明,要防止出现“行政区划壁垒效应”、地方政府“逐底竞争”,强化“产城融合”“要素整合”。作为核心城市和核心区域有必要加强对边缘城市的扶持,强化生态联系,增强城市群网络的联结性,降低城市之间信息传递的成本。

第四,优化产业结构,推进城镇建设。多措并举,改善产业结构,提升农业现代化水平,淘汰落后制造业;持续推进新型城镇化建设,强化绿色GDP发展理念,制定适合不同城市特点的差异化生态发展目标和政策工具。

## 参考文献

- [1] 马学广,唐承辉.新国家空间理论视角下城市群的国家空间选择性研究[J].人文地理,2019,34(2):105-115.
- [2] CAMAGNI R, CAPELLO R, CARAGLIU A. Static vs. dynamic agglomeration economies: Spatial context and structural evolution behind urban growth[J]. Papers in Regional Science, 2017, 95(1): 133-158.
- [3] 吴鸣然,马骏.中国区域生态效率测度及其影响因素分析——基于DEA-Tobit两步法[J].技术经济,2016,35(3):75-80,122.
- [4] 姜磊,柏玲,吴玉鸣.中国省域经济、资源与环境协调分析——兼论三系统耦合公式及其扩展形式[J].自然资源学报,2017,32(5):788-799.
- [5] 屈文波.中国区域生态效率的时空差异及驱动因素[J].华东经济管理,2018,32(3):59-66.
- [6] 治丹丹,孔伟,王淑佳,等.国内生态经济研究热点与趋势——基于12种中文核心期刊[J].科技管理研究,2019,39(15):237-245.
- [7] SCHALTEGGER S, STURM A. Ökologische rationalität: Ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten[J]. Die Unternehmung, 1990, 44(4): 273-290.
- [8] 马勇,童昀,任洁.多源遥感数据支持下的县域尺度生态效率测算及稳健性检验——以长江中游城市群为例[J].自

- 然资源学报, 2019, 34(6): 1196-1208.
- [9] ZHANG Z, SU S, XIAO R, et al. Identifying determinants of urban growth from a multi-scale perspective: A case study of the urban agglomeration around Hangzhou Bay, China[J]. *Applied Geography*, 2013, 45(45): 193-202.
- [10] 尚永珍, 陈耀. 功能空间分工与城市群经济增长——基于京津冀和长三角城市群的对比分析[J]. *经济问题探索*, 2019(4): 77-83.
- [11] 杨守德, 赵德海. 城市群要素集聚对区域经济效益的增益效应——以哈长城市群为例[J]. *技术经济*, 2017, 36(4): 100-109.
- [12] 林小玲. 中国财政科技支出与技术创新——基于金融发展调节效应视角的研究[J]. *广西财经学院学报*, 2019, 32(4): 68-80.
- [13] TAYLOR P J. Specification of the world city network[J]. *Geographical Analysis*, 2010, 33(2): 181-194.
- [14] WANG S, CHEN B. Energy - water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 773-783.
- [15] 王圣云, 翟晨阳. 长江经济带城市群网络结构与空间合作路径[J]. *经济地理*, 2015, 35(11): 61-70.
- [16] 梁晨, 曾坚. 城市流视角下京津冀城市群网络联系测度[J]. *城市问题*, 2019(1): 78-83.
- [17] 杨传喜, 张俊飏, 李树明. 农业科技资源技术效率的测算与分析——基于农业生态区划的视角[J]. *中国科技论坛*, 2011(6): 138-143.
- [18] 陈新华, 方凯, 刘洁. 科技进步对广东省生态效率的影响及作用机制[J]. *科技管理研究*, 2017, 37(1): 82-87.
- [19] 严翔, 成长春. 长江经济带科技创新效率与生态环境非均衡发展研究——基于双门槛面板模型[J]. *软科学*, 2018, 32(2): 11-15.
- [20] 郭莉, LAWRENCE M, 胡筱敏. 环境技术创新对产业生态管理的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(2): 78-82.
- [21] 孟凡生, 邹韵. 中国生态能源效率时空格局演化及影响因素分析[J]. *运筹与管理*, 2019, 28(7): 100-107.
- [22] 刘华军, 刘传明. 环境污染空间溢出的网络结构及其解释——基于 1997—2013 年中国省际数据的经验考察[J]. *经济与管理评论*, 2017, 33(1): 57-64.
- [23] 马军, 马晓洁. 基于社会网络分析的草原碳汇协同管理研究——以内蒙古地区调查数据为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(10): 138-143.
- [24] 刘蕴. 社会网络关系嵌入过度与企业资源获取: 双中介模型[J]. *企业经济*, 2018(4): 36-41.
- [25] 林黎, 李敬. 长江经济带环境污染空间关联的网络分析——基于水污染和大气污染综合指标[J]. *经济问题*, 2019(9): 86-92, 111.
- [26] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [27] 胡彪, 李健毅. 生态文明视角下的区域环境效率时空差异评价[J]. *中国科技论坛*, 2015(5): 82-88.
- [28] 陆砚池, 方世明. 基于 SBM-DEA 和 Malmquist 模型的武汉城市圈城市建设用地生态效率时空演变及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(10): 1575-1586.
- [29] 王莎, 童磊, 贺玉德. 京津冀城市群经济联系的定量测度[J]. *技术经济*, 2019, 38(10): 74-81.
- [30] 张广胜, 陈晨. 产业集聚与城市生态效率动态关系研究[J]. *科技进步与对策*, 2019, 36(13): 48-57.
- [31] 吴文洁, 刘雪梦, 唐娟莉. FDI 与中国工业生态效率——基于面板联立方程模型的实证分析[J]. *商业研究*, 2019(6): 63-72.

## Science and Technology Investment, Networks Characteristics and Ecological Efficiency: A Case Study of Central Plains Urban Agglomerations

Wang Wenbin<sup>1, 2</sup>, Ma Xin<sup>2</sup>

(1. Business School, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** On the perspective of complex network, taking the ecological efficiency of urban agglomerations as the research object, the impacts of S&T investment and network characteristics on ecological efficiency have been explored. Using panel data of 30 cities from 2003 to 2017 to measure the ecological efficiency of the Central Plains urban agglomeration, the characteristics of network nodes are obtained. Applying the geographic gravity model, the eco-affiliated network has been constructed. Finally, the impacts of S&T investment and network characteristics on ecological efficiency have been analyzed. The results show as follows. The overall ecological efficiency of the Central Plains urban agglomeration shows a continuous upward trend, and the spatial distribution of “one body, two wings”. The individual differences of urban ecological efficiency level are significant, and the gap is expanding. Connectivity of urban agglomeration network is high-level, and the overall network density first rises and then falls. Zhengzhou-Jiaozuo-Luoyang-Xinxiang constitute the core pole of urban agglomeration, cities which are close to the core area have a high ecological level, and there is obvious difference among cities. S&T investment and closeness have significant positive impacts on ecological efficiency, while they interact with each other and lead to positive effects, industrial structure and urbanization rate also have significant positive impacts on ecological efficiency, while FDI has no significant impact.

**Keywords:** science and technology investment; networks characteristics; ecological efficiency; Central Plains urban agglomerations