

长江中游城市群创新效率时空变化及溢出效应¹

仇 怡^{1,2} 郑 泽¹ 吴建军¹

(1. 湖南科技大学商学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南省高校哲学社会科学重点研究基地“产业经济高质量发展研究中心”, 湖南 长沙 410004)

【摘 要】: 选取 2008~2019 年长江中游城市群 28 个城市的面板数据, 构建创新效率评价指标体系, 运用三阶段 DEA 模型测算城市创新效率并揭示其时空变化特征。在此基础上, 构建多种空间权重矩阵, 运用空间杜宾模型分析影响城市创新效率的主要因素及其空间溢出效应。研究结果表明: (1) 长江中游城市群创新效率整体呈波动变化趋势, 各城市创新效率差异明显, 其中南昌、武汉、宜昌、荆州和长沙等城市创新效率相对较高, 景德镇、鹰潭、新余、孝感、岳阳和常德等城市相对较低。(2) 城市创新效率空间格局总体呈现以武汉为核心、南昌和长沙为重要创新节点, 向周围城市逐渐递减的特征, 其中高效率地区由西向东演化的趋势日益明显, 较高效率地区由分散布局转向相对集中分布, 中效率地区集中成片分布, 而低效率地区散落式分布且有减少趋势。(3) 城市创新效率存在显著为正的溢出效应, 并对关联城市的科技创新发展形成“涓滴效应”。(4) 地区经济发展、教育支持和交通水平对城市创新效率具有显著的促进作用, 而对外开放有负效应, 市场结构、金融发展和人力资本能促进本城市创新效率提升, 但对关联城市有负向溢出效应; 固定资产投资对本城市创新效率有阻碍作用, 但能促进关联城市创新发展。

【关键词】: 长江中游城市群; 创新效率; 时空变化; 溢出效应

【中图分类号】: F592. 7 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004- 8227(2022)12- 2582- 15

【DOI】: 10. 11870 / cjlyzyhj202212003

党的十九届六中全会指出, 坚持实施创新驱动发展战略, 把科技自立自强作为国家发展的战略支撑, 加快建设创新型国家和世界科技强国。近年来我国创新资源存量持续提升, R&D 经费与 R&D 投入强度分别从 2000 年的 895.7 亿元、1% 上升到 2020 年的 24 393.1 亿元、2.4%, 专利申请、专利授权以及技术市场成交额分别从 2000 年的 17.1 万件、10.5 万件、651 亿元增长到 2020 年的 519.4 万件、363.9 万件、28 252 亿元。但从衡量创新行为投入产出比的创新效率来看, 我国创新产出转化仍不及创新投入, 如 2020 年 R&D 经费 24 393.1 亿元中只有 6% 用于基础研究, 11.3% 用于应用研究, 82.7% 则投入了已有技术商业开发; 在专利申请和授权量中, 发明专利只占了 28.8% 和 14.6%。城市作为区域经济社会发展的中心, 是国家经济产出最重要的基地, 也是各类创新要素和资源的集聚地^[1]。长江中游城市群地跨湖北、湖南、江西 3 省, 不仅是长江经济带极具发展潜力和活力的区域,

¹ **【收稿日期】**: 2021- 12- 18; **【修回日期】**: 2022- 05- 16

【基金项目】: 湖南省社会科学成果评审委员会重点项目(XSP21ZDI001); 湖南省社科基金“学术湖南”精品培育项目(21ZDAJ007); 湖南省社科基金项目(21JD024)

【作者简介】: 仇 怡(1978 ~), 女, 教授, 主要研究方向为技术进步与区域创新. E-mail: joyqiuyi@163. com

也是带动中部地区经济增长的重要引擎。2015 年国务院批复出台《长江中游城市群发展规划》，明确提出要将长江中游城市群打造成我国经济发展新增长极。2019 年 12 月，武汉、长沙、南昌 3 省会城市共同发布《长江中游城市群省会城市高质量协同发展行动方案》，共同打造经济发展新增长极。2022 年 2 月国务院批复出台《长江中游城市群发展“十四五”实施方案》，再次明确强调要将长江中游城市群打造为长江经济带发展和中部地区崛起的重要支撑、全国高质量发展的重要增长极、具有国际影响力的重要城市群。然而，目前城市群内各城市经济发展不平衡、创新能力差异明显，如 2020 年武汉实现地区生产总值分别是景德镇、鄂州、娄底的 16.3、15.5、9.3 倍；在专利授权上只有武汉、南昌和长沙 3 个城市超过 1 万件。现阶段长江中游城市群各城市面临着不同程度的资源缺乏、创新人才不足、资金短缺等瓶颈束缚，科技创新效率仍有一定提升空间。因此，科学测算长江中游城市群创新效率，探讨城市创新效率的时空变化及其空间溢出效应，对提高长江中游城市群创新能力，打造中部“增长极”，推动中部地区高质量发展具有重要意义。

创新效率是指多种创新投入转化为创新产出的转化率，即在一定条件下，既定创新资源投入能达到的创新产出量或一定创新产出所需要的创新投入量^[2]。国内学者对于创新效率的研究主要基于区域创新系统理论，对区域创新效率进行测算评价进而分析区域创新发展不平衡的成因^[3,4,5]。现有文献关于创新效率的研究主要集中在两个方面，一是关于创新效率的测度与评价。目前大多使用随机前沿分析法(SFA)和数据包络分析法(DEA)。SFA 模型仅适用于单产出多投入的效率评价问题，需提前设定生产函数，且函数设定直接决定评价结果的准确性^[6,7,8,9,10]。DEA 模型现广泛应用于多投入多产出的效率评价问题，不需设定特定生产函数形式^[11,12,13,14,15]。此外，评价对象涉及产业、企业和区域等。已有研究普遍得到的结论都是我国区域创新发展不平衡。二是关于创新效率的影响因素。创新效率不仅与创新主体的直接创新活动有关，而且与社会经济环境、主体间的网络关系等因素相关^[16]。在创新环境方面，学者们多考虑产业结构、政府支持、对外开放和人力资本等因素^[17,18,19,20]。随着地区间经济联系日益紧密，部分学者将空间地理因素纳入考虑，考察创新空间外溢对创新效率的作用，如余泳泽等^[21]、李政等^[22]、原毅军等^[23]、盛彦文等^[24]、陈银娥等^[25]。

综上所述，学术界对城市创新效率的相关研究已取得一定成果，但仍有深入拓展的空间。首先，从研究对象来看，现有研究大多集中在省级层面或长三角城市群、长江经济带等区域，而有关长江中游城市群的文献主要集中在创新能力、协同创新等方面，研究其城市创新效率的文献相对较少；其次，从研究方法来看，已有文献运用 DEA、SFA 等模型时很少考虑外部环境因素的干扰，因而使用三阶段 DEA 模型测算城市创新效率的研究不多；第三，已有文献大多采用面板 Tobit 模型和 SFA 模型分析影响因素，考虑空间地理因素并采用空间计量模型的研究相对较少。为此，本文以长江中游城市群为研究对象，考虑到各城市所处外部环境的差异，运用三阶段 DEA 模型测算城市创新效率并分析其时空变化特征；在此基础上，采用多种空间权重矩阵，构建空间计量模型探讨城市创新效率的影响因素及空间溢出效应，以期为推进长江中游城市群经济高质量发展和科技创新提供政策参考。

1 测算方法、研究区域与数据选取

1.1 三阶段 DEA 模型

传统 DEA 模型在测算效率时未考虑环境因素和随机噪声的影响，会导致测算效率结果有所偏差。而三阶段 DEA 模型是在传统 DEA 模型的基础上构建 SFA 模型，充分发挥两种方法的优势，剔除外部环境因素和随机误差对创新效率的影响^[26]。当测算效率值为 1 时，该决策单元实现了效率有效。具体可分为以下 3 个阶段：

第一阶段：采用 DEA-BCC 模型对决策单元的投入产出进行效率评价，具体公式如下：

$$s. t. \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n X_j \lambda_j + S^- = \theta X_0 \\ \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j - S^+ = Y_0 \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \lambda_j \geq 0, S^- \geq 0, S^+ \geq 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中：j=1, 2, …, n 表示决策单元；X、Y 分别是投入、产出变量；S⁺为松弛变量；S⁻为产出松弛值；λ_j 为权重变量；ε 表示非阿基米德无穷小量。

第二阶段：由于效率值主要受管理无效率、外部环境因素和随机误差等影响，而三阶段 DEA 模型最关键一步是借助 SFA 模型来分离出外部环境因素和随机误差，从而得到只反映经营管理水平的创新效率值。将由第一阶段得到的投入松弛变量作为被解释变量，外部环境变量作为解释变量，构建 SFA 模型：

$$S_{ij} = f^j(z_i, \beta^j) + v_{ij} + u_{ij}, \quad (2)$$

(i = 1, 2, …, N; j = 1, 2, …, P)

式中：s_{ij} 为投入松弛变量；f^j(z_i, β^j) 为随机前沿函数；z_i=(z_{1i}, z_{2i}, …, z_{ki}) 为外部环境因素；β^j 为相应系数；v_{ij} 和 u_{ij} 分别表示随机误差和管理无效率。

第三阶段：将经第二阶段调整后的投入变量和原产出变量，重新运用 DEA-BCC 模型测算效率，就能得到剔除掉外部环境因素和随机误差、仅反映经营管理水平的效率值，能更真实客观反映各决策单元的效率情况。由于长江中游城市群各城市经济水平、地理条件等外部环境都有所差异，因此本文运用三阶段 DEA 模型测算城市创新效率，科学准确评价其创新发展态势。

1.2 研究区域概况

长江中游城市群位于我国中部地区，是长江经济带的重要地带，基本涵盖了江西、湖北和湖南三省的主要城市。根据 2015 年国务院出台的《长江中游城市群发展规划》，长江中游城市群范围包括：江西省的南昌、景德镇、萍乡、九江、新余、鹰潭、吉安、宜春、抚州、上饶；湖北省的武汉、黄石、宜昌、襄阳、鄂州、荆门、孝感、荆州、黄冈、咸宁、天门、仙桃、潜江；湖南省的长沙、株洲、湘潭、衡阳、岳阳、常德、益阳、娄底(如图 1 所示)。该区域占地面积超过 30 万 km²，2020 年年末总人口约 1.27 亿人，实现地区生产总值约为 9.39 万亿元，分别占全国的 8.96%、9.25%；科技创新资源丰富，2020 年规模以上 R&D 经费内部支出、专利授权和发明专利授权分别占全国的 9.62%、6.52%、7.17%。本文探讨城市创新效率是基于上述区域范围进行测度。

2 长江中游城市群创新效率时空变化

2.1 传统 DEA 模型测算结果

选取基于投入导向的 DEA-BCC 模型,运用 DEAP2.1 软件对 2008~2019 年长江中游城市群 28 个城市的创新效率进行测算,结果如表 2 所示。

表 1 变量说明及描述性统计

	变量(单位)	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
创新投入	规模以上工业企业 R& D 人员(人)	336	8 851.26	10 782.68	533.83	57 469.01
	规模以上工业企业 R& D 经费支出(万元)	336	171 406.36	223 514.27	4 903.99	1 184 001.58
创新产出	专利申请(件)	336	4 069.57	7 754.59	112.00	77 097.00
	专利授权(件)	336	2 530.46	4 535.66	73.00	39 258.00
环境变量	财政科技支出/政府支出(%)	336	1.39	1.68	0.16	16.27
	互联网宽带接入用户数(万户)	336	69.58	78.40	4.78	532.00
	第三产业产值/第二产业产值 (%)	336	76.71	24.49	40.00	179.97

资料来源:作者计算整理。

表 2 第一阶段长江中游城市群创新效率值

城市	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
南昌	0.459	0.390	0.455	0.829	0.665	0.893	0.772	0.492	0.623	0.831	0.478	0.709
景德镇	0.336	0.252	0.325	0.563	0.343	0.435	0.452	0.266	0.313	0.440	0.297	0.675
萍乡	0.458	0.341	0.749	0.814	0.536	0.795	0.773	0.500	1.000	1.000	0.806	0.514
九江	0.476	0.303	0.356	0.752	0.596	0.757	0.851	0.852	0.877	0.763	0.746	0.698
新余	0.219	0.198	0.227	0.381	0.260	0.400	0.523	0.473	0.393	0.342	0.242	0.449
鹰潭	0.589	0.260	0.267	0.524	0.296	0.282	0.474	0.545	0.486	0.493	0.477	0.355
吉安	0.236	0.214	0.246	0.509	0.342	0.770	0.935	0.694	1.000	1.000	0.701	0.642

宜春	0.201	0.232	0.272	0.464	0.296	0.516	0.940	0.802	0.401	0.516	0.364	0.519
抚州	0.282	0.300	0.313	0.564	0.528	0.866	1.000	1.000	0.819	1.000	0.904	1.000
上饶	0.268	0.316	0.453	0.541	0.510	0.748	0.872	0.976	0.709	0.995	0.836	0.873
武汉	0.490	0.525	0.608	0.921	0.647	1.000	0.884	0.784	0.862	0.942	0.570	1.000
黄石	0.504	0.494	0.667	0.882	0.340	0.478	0.358	0.276	0.548	0.429	0.334	0.399
宜昌	0.454	0.523	0.556	0.782	0.488	0.854	0.846	0.410	0.271	0.531	0.223	0.361
襄阳	0.216	0.245	0.311	0.629	0.271	0.483	0.414	0.034	0.075	0.319	0.032	0.274
鄂州	0.756	0.865	0.955	1.000	0.808	0.872	0.846	0.685	0.648	0.446	0.707	0.367
荆门	0.530	0.521	0.457	0.905	0.368	0.591	0.450	0.316	0.260	0.272	0.255	0.312
孝感	0.205	0.228	0.255	0.446	0.353	0.490	0.474	0.235	0.192	0.337	0.240	0.438
荆州	0.935	0.972	1.000	0.905	1.000	1.000	0.954	1.000	1.000	0.583	1.000	0.696
黄冈	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.465	0.447	0.492	0.579	0.848
咸宁	0.323	0.364	0.345	1.000	0.495	0.922	0.937	0.637	0.655	1.000	0.491	0.534
长沙	0.337	0.305	0.432	0.765	0.611	0.646	0.587	0.354	0.341	0.392	0.338	0.537
株洲	0.577	0.437	0.421	0.797	0.497	0.589	0.674	0.473	0.311	0.376	0.236	0.374
湘潭	0.580	0.442	0.426	0.804	0.502	0.501	0.524	0.459	0.330	0.354	0.271	0.220
衡阳	0.209	0.148	0.293	0.625	0.314	0.739	0.741	0.407	0.338	0.351	0.293	0.368
岳阳	0.132	0.144	0.243	0.434	0.362	0.365	0.342	0.311	0.156	0.177	0.146	0.223
常德	0.198	0.143	0.301	0.409	0.297	0.423	0.349	0.328	0.190	0.235	0.184	0.263
益阳	0.253	0.197	0.318	0.958	0.753	1.000	0.934	0.464	0.389	0.327	0.195	0.340
娄底	0.474	0.323	0.478	0.632	0.597	0.882	0.832	0.520	0.446	0.673	0.374	0.295
均值	0.418	0.381	0.455	0.708	0.503	0.689	0.705	0.527	0.503	0.558	0.440	0.510

由表 2 可知，整体上长江中游城市群创新效率均值由 2008 年的 0.418 上升为 2019 年的 0.51, 其中在 2011 年达峰值。从各个城市看，创新效率波动幅度较大，其中景德镇、抚州、上饶等城市创新效率有所提高；鹰潭、鄂州、湘潭等城市有所下降。另外黄冈、荆州、抚州分别实现了 7、6、4 年的效率有效，创新效率相对较高；萍乡、吉安、武汉和咸宁也都实现了 2 年的效率有效。而南昌、武汉和长沙在部分年份效率值均只有 0.5 左右，处于创新效率较低的状态。2019 年，江西省内除抚州效率值为 1 外，只有上饶创新效率在 0.8 以上；湖北省内只有武汉和黄冈处于效率值相对较高的状态；而湖南省内只有长沙效率值在城市群平均值以上，其余城市效率值均只有 0.3 左右。可见，传统 DEA 模型的测算结果中，部分城市的创新效率值与现实情况存在偏差，这可能是由于未考虑各城市所处外部环境的差异而导致测算误差，需要采用三阶段 DEA 模型进行分析。

2.2 基于相似 SFA 模型的随机前沿分析

将第一阶段测算得到的规模以上工业企业 R&D 人员和 R&D 经费内部支出松弛变量作为被解释变量，选取财政科技支持、基础设施和产业结构为解释变量，构建相似 SFA 模型来考察环境变量对投入松弛变量的影响。运用 Frontier4.1 软件计算，回归结果如表 3 所示。

表 3 基于 SFA 模型的第二阶段估计结果

控制变量	R& D 人员松弛变量	R& D 经费松弛变量
常数项	8 990.39*** (899.31)	53 586.66*** (58 914.36)
sct	-944.78*** (-944.89)	-7 152.64*** (-9 425.71)
int	30.21*** (30.94)	391.17*** (2.87)
stru	-107.01*** (-113.69)	-1 247.83*** (-13.03)
$\delta 2$	50 134 726*** (50 134 726)	32 210 746 000*** (32 210 746 000)
γ	0.99*** (449 764.52)	0.99*** (34 749.15)
LR 值	7.55***	7.79***
Log 值	-274.744	-363.07

注：括号内为 t 统计值；***、**、*分别表示在 1%、5%、10%水平下显著。

由表 3 可知， $\delta 2$ 、 γ 和 LR 值以及各环境变量对投入松弛变量的回归系数均通过显著性检验，这表明外部环境因素对创新效率有显著影响，也说明有必要运用 SFA 模型来调整外部环境因素。当环境变量的回归系数为正值时，增加环境变量会导致投入松弛变量的增加，不利于创新效率提高；反之亦然。因此，从回归系数可知：财政科技支持和产业结构的投入松弛变量回归系数均为负，这表明财政科技支持力度加大、产业结构改善，有利于减少冗余，这些地区会有更充裕的资金、人才等创新要素，从而有助于提高创新效率；而基础设施的投入松弛变量回归系数为正，这可能由于基础设施资源若未得到合理配置，会造成一定程度的资源浪费，不利于创新发展。

2.3 调整后第三阶段创新效率结果分析

将由 SFA 回归调整后的投入变量与原产出变量重新运用 DEAP2.1 软件测算，可得到 2008~2019 年长江中游城市群在假定相同环境条件下的城市创新效率，如表 4 所示。总体上长江中游城市群创新效率呈波动变化发展态势，从 2008 年的 0.562 下降为 2019 年的 0.445，其中在 2012 年达峰值，相比第一阶段创新效率有所提高。这与近年来长江中游城市群积极开展科技创新联盟、重视科技创新发展实际相符。从各个城市看，在剔除环境变量和随机误差之后，南昌、武汉、宜昌、荆州和长沙等城市创新效率均有不同程度的提高，其中武汉实现了 11 年的效率有效，并且在未达到有效状态的 2018 年效率值在城市群内也属

于较高的状态；荆州、宜昌、黄冈分别实现了 7、5、3 年的效率有效。而南昌和长沙在多个年份效率值均在 0.8 左右，处于创新效率较高的状态。这些城市科技创新资源相对较为丰裕，创新人才比较集中，创新效率相对较高。景德镇、鹰潭、新余、孝感、襄阳、岳阳、常德等城市创新效率相对较低，在部分年份效率值甚至低于城市群平均值，这些城市研发资金和创新人才都相对缺乏，在资源配置上有待加强。此外，表中大部分城市在 2015 年创新效率都有明显下降，其中襄阳下降幅度尤其明显，效率值仅为 0.058, 这可能是由于襄阳创新产出急剧减少，创新资源未得到有效配置。

为更直观地了解长江中游城市群创新效率区域分布情况，参考白俊红和蒋伏心[32]的研究，运用 Arcgis 软件将各城市创新效率均值划分为 4 个等级(图 2)。即高效率地区(效率值在 0.721~1 之间), 只有南昌、武汉、宜昌、荆州和长沙 5 个城市，其中调整前南昌和宜昌属于较高效率地区，长沙处于中效率地区。较高效率地区(效率值在 0.501~0.72 之间), 九江、上饶、宜春、吉安、荆门、黄冈、黄石、鄂州、株洲、湘潭都是较高效率地区，其中宜春、黄石、荆门、株洲和湘潭在调整前都处于中效率地区，黄冈和鄂州在调整后都下降为较高效率地区。中效率地区(效率值在 0.311~0.5 之间), 襄阳、孝感、咸宁、景德镇、萍乡、鹰潭、抚州、益阳、娄底和衡阳等城市都处于中效率地区。咸宁、萍乡、景德镇、抚州、益阳和娄底在调整前都处于较高效率地区，襄阳在调整后上升为中效率地区。第四种是低效率地区，主要分布在江西省和湖南省，其中新余在调整前处于中效率地区。相比湖南省和江西省，湖北省拥有更为丰裕的劳动力和科教资源，在创新发展中也已逐步形成规模，创新效率相对更高。这有效支持了中央 2018 年 11 月提出的以武汉为中心引领长江中游城市群发展的战略部署。可见，外部环境因素可能会掩盖城市群创新效率真实情况，运用三阶段 DEA 模型测算更能真实反映长江中游城市群科技创新状况。

表 4 第三阶段调整后长江中游城市群创新效率值(2008~2019 年)

城市	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
南昌	0.751	0.722	0.667	0.892	0.985	0.974	1.000	0.631	0.837	0.754	0.600	0.848
景德镇	0.371	0.262	0.314	0.511	0.459	0.421	0.355	0.220	0.242	0.281	0.332	0.406
萍乡	0.413	0.200	0.544	0.667	0.548	0.568	0.510	0.364	0.348	0.408	0.803	0.356
九江	0.514	0.319	0.320	0.694	0.881	0.669	0.720	0.566	0.803	0.709	0.770	0.793
新余	0.307	0.209	0.272	0.378	0.375	0.334	0.490	0.395	0.224	0.181	0.268	0.280
鹰潭	0.392	0.179	0.170	0.470	0.451	0.268	0.259	0.401	0.409	0.238	0.495	0.190
吉安	0.340	0.284	0.290	0.571	0.641	0.857	1.000	0.636	0.878	0.650	0.751	0.732
宜春	0.338	0.332	0.348	0.519	0.525	0.607	1.000	0.851	0.319	0.511	0.509	0.519

抚州	0.301	0.261	0.245	0.478	0.667	0.690	0.759	0.692	0.479	0.529	0.993	0.806
上饶	0.253	0.215	0.340	0.465	0.751	0.463	0.565	0.472	0.482	0.636	0.760	0.684
武汉	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.755	1.000
黄石	0.955	0.695	0.947	0.990	0.637	0.544	0.390	0.288	0.619	0.308	0.352	0.392
宜昌	1.000	0.990	1.000	0.992	1.000	1.000	1.000	0.589	0.342	0.504	0.277	0.374
襄阳	0.667	0.560	0.609	0.804	0.702	0.673	0.700	0.058	0.116	0.318	0.045	0.268
鄂州	0.455	0.406	0.548	1.000	1.000	0.683	0.475	0.511	0.289	0.126	0.631	0.230
荆门	0.787	0.656	0.603	0.960	0.889	0.741	0.481	0.390	0.283	0.224	0.314	0.303
孝感	0.454	0.438	0.494	0.552	0.506	0.568	0.524	0.329	0.218	0.374	0.298	0.356
荆州	1.000	1.000	1.000	0.872	1.000	0.994	0.720	1.000	1.000	0.357	1.000	0.575
黄冈	0.742	1.000	1.000	0.861	1.000	0.701	0.988	0.323	0.253	0.388	0.560	0.651
咸宁	0.462	0.549	0.417	0.791	0.601	0.621	0.675	0.368	0.315	0.300	0.421	0.380
长沙	0.725	0.814	0.902	0.836	0.972	0.853	0.840	0.545	0.589	0.632	0.453	0.561
株洲	1.000	1.000	0.727	0.879	0.792	0.777	0.776	0.536	0.387	0.441	0.312	0.344
湘潭	0.962	0.922	0.753	0.831	0.756	0.677	0.587	0.422	0.333	0.255	0.331	0.187
衡阳	0.351	0.285	0.456	0.723	0.523	0.797	0.579	0.324	0.307	0.392	0.406	0.282
岳阳	0.199	0.220	0.308	0.450	0.521	0.362	0.269	0.249	0.161	0.201	0.184	0.178

常德	0.267	0.234	0.402	0.422	0.445	0.420	0.312	0.218	0.157	0.199	0.239	0.229
益阳	0.323	0.317	0.417	0.835	0.852	0.804	0.564	0.284	0.203	0.248	0.247	0.341
娄底	0.415	0.313	0.418	0.605	0.934	0.581	0.407	0.240	0.317	0.231	0.357	0.205
均值	0.562	0.514	0.554	0.716	0.729	0.666	0.641	0.461	0.425	0.407	0.481	0.445

2.4 城市创新效率时空变化特征

基于三阶段 DEA 模型测算的创新效率值，选取 2008、2012、2016 和 2019 年 4 个时间截面，运用 ArcGIS 软件将所有城市划分为四个类型地区(高效率地区、较高效率地区、中效率地区和低效率地区),探讨长江中游城市群创新效率的时空演变特征(图 3)。

总体来看，长江中游城市群城市创新效率呈现以武汉为核心、南昌和长沙为重要创新节点的空间格局，且向周边城市逐渐递减的态势日益凸显。核心城市聚集着城市群内大部分的科技人才、研发资金等创新资源，创新基础相对较好，其创新发展水平也相对较高，创新资源在空间上的不均匀分布也导致城市群内城市创新效率差异明显。具体来看，2008~2019 年高效率地区大致呈现由西向东变化的趋势，由 2008 年的 10 个下降为 2019 年的 5 个，其中江西省多数城市呈现平稳增长趋势，湖北省和湖南省部分城市有不同程度下降。较高效率地区呈现由分散布局转向相对集中分布的演变趋势，且主要分布在高效率地区周围。中效率地区主要集中成片分布，2008、2012、2016 和 2019 年占城市群比重分别为 39.3%、14.3%、35.7%、28.6%,大部分城市都处于中效率地区。低效率地区大多远离核心城市，呈散落式分布，这些城市在创新资源供给上相对不足，高新技术产业发展略显劣势。不过，近年来低效率地区有明显下降趋势，这表明城市群整体创新效率水平有显著提升。这可能是由于随着长江中游城市群的经济的发展，城市群内各城市创新活动紧密合作，促进了创新资源和隐形知识在城市群内的自由流动，有助于城市群创新效率的提高。

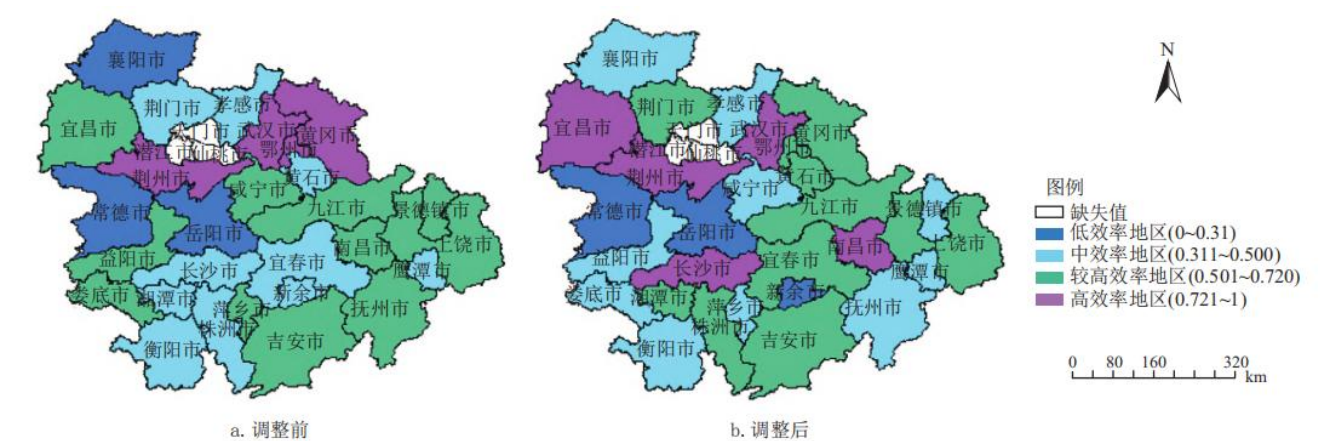


图 2 调整前后长江中游城市群创新效率均值对比

Fig. 2 Comparison of mean value of innovation efficiency of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River before and after adjustment

3 城市创新效率影响因素及空间溢出效应

3.1 空间自相关分析

基于三阶段 DEA 模型测算的城市创新效率,使用全局莫兰指数来考察长江中游城市群创新效率的空间集聚形式。首先,主要构建以下 3 种空间权重矩阵:考虑到城市创新与经济发展的密切联系,构建经济距离权重矩阵(W1),主对角元素全为 0,非主对角元素为 2 个城市人均实际 GDP 差值的绝对值倒数。现有研究大多采用地理距离权重矩阵,城市间距离越近则空间效应越强,为此构建地理距离权重矩阵(W2),主对角元素为 0,非对角元素为两城市距离平方的倒数,通过经纬度计算得来。此外,结合经济特征和地理属性来构建经济地理嵌套权重矩阵(W3),即 $W3=aW1+(1-a)W2$,a 表示经济距离权重矩阵的权重,取值 0.5。

基于经济距离权重矩阵下,运用 stata15 软件对长江中游城市群创新效率测度莫兰指数,结果如表 5 所示。只有 2014、2018 和 2019 年存在较为显著的空间全局自相关,这说明长江中游城市群内城市创新效率还没有存在很显著的正向空间相关性,城市创新生产活动全局范围内并没有形成紧密联系,但局部空间自相关检验表明城市创新效率存在局部自相关^①。由此,采用空间计量模型对城市创新效率的影响因素以及空间溢出效应进行深入探讨。

表 5 长江中游城市群城市创新效率全局莫兰指数

年份	Moran' s I	z 值	p 值
2008	0.007	0.531	0.595
2009	-0.003	0.413	0.679
2010	-0.029	0.092	0.926
2011	-0.079	-0.501	0.616
2012	0.002	0.470	0.638
2013	0.022	0.715	0.474
2014	0.138	2.109	0.035
2015	0.047	1.036	0.300
2016	0.032	0.852	0.394
2017	0.040	0.957	0.339
2018	0.130	2.036	0.042
2019	0.140	2.157	0.031

数据来源:作者计算整理。

3.2 空间计量分析

3.2.1 模型构建

传统计量模型在实证分析时没有考虑空间效应对模型估计结果产生的偏差。地理学第一定律表明,不同地区间的经济事物

往往存在空间相关性^[33]。为准确反映长江中游城市群创新效率影响因素以及空间溢出效应，采用空间计量模型进行实证分析。空间计量模型主要包括空间杜宾模型(SDM)、空间滞后模型(SAR)和空间误差模型(SEM)等形式，其中SDM是更为一般化的空间计量模型^[34]。由此设置模型如下：

$$y_{it} = \rho \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{jt} + \beta X_{it} + \varphi \sum_{j=1}^n w_{ij} X_{jt} + \mu_t + \delta_i + \varepsilon_{it} \tag{3}$$

式中：i 表示城市；t 表示年份；y 表示被解释变量创新效率；X 为解释变量即创新效率影响因素；w 为空间权重矩阵，这里同样使用经济距离权重矩阵(W1)、地理距离权重矩阵(W2)和经济地理嵌套矩阵(W3)，wy 与 wX 分别将空间关联因素纳入被解释变量和解释变量分析；ρ、β 和 φ 分别为 wy、X 和 wX 的回归系数；δ 和 μ 分别表示空间和时间固定效应，ε 为随机误差项。当 φ =0 时，SDM 退化为 SAR；当 ρ + ρ β =0 时，SDM 退化为 SEM。

3.2.2 影响因素指标选取

由于城市创新效率受多方面因素共同作用，结合长江中游城市群现实情况，基于数据可得性，主要从以下 8 个方面来考虑：(1)地区经济发展水平(gdp), 经济发展是城市创新活动的重要动力来源，提升经济发展质量能为其提供充裕的人才、资金等要素支持，参考冯根福等[35]的研究，选取 gdp 增长率来衡量。(2)市场结构(ind), 已有研究表明市场结构优化能极大程度激发创新活力，从而促进创新效率提高，借鉴刘伟[36]的研究，选取规模以上工业企业数来衡量。(3)人力资本(hc), 人力资本是富含知识、技术的创新要素，对吸收知识溢出效应和促进再创新都具有重要作用。鉴于不同教育水平下的人力资本差异性，参考王雨飞和倪鹏飞等[37]的研究，使用平均受教育年限来表示。(4)对外开放(fdi), 高质量的对外开放能促进创新资源流动和技术信息共享，并引致技术溢出效应，从而有助于创新发展，而外商直接投资是其重要组成部分，为此选取实际利用外商投资额与 GDP 的比值来衡量，并按照当年人民币对美元的平均汇率进行换算。(5)教育支持(edu), 教育水平提高有助于人才培养，提高学习新知识、新技术的能力，因而采用教育支出占地方财政一般预算内支出的比重来表示。(6)金融发展(fin), 城市创新产出成果依赖于金融发展水平，金融发展水平提高有利于风险分散以及投融资服务，为城市创新活动提供有力的资金支持，故使用城市金融机构年贷款余额与 GDP 的比值来表示。(7)固定资产投资(fix), 固定资产投资是社会总投资的主要组成部分，反映社会经济活动的活跃程度，直接影响城市创新发展，故使用固定资产投资与 GDP 的比值来表示。(8)交通水平(tran), 交通水平便利能加强城市间经济联系，使城市间创新资源流动、知识技术溢出以及信息共享更为可能，故选取人均道路面积来衡量。以上指标数据主要来源于历年的《中国城市统计年鉴》。为消除异方差，所有指标均取对数处理，变量描述性统计如表 6 所示。

表 6 变量说明及描述性统计 导出到 EXCEL

变量名称	变量解释	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
lngdp	gdp 增长率	336	2.36	0.27	0.58	2.84
lnind	规模以上工业企业数	336	6.82	0.56	4.93	8.00
lnhc	受教育年限	336	6.14	0.68	4.68	7.75
lnfdi	实际利用外资/GDP	336	0.59	0.80	-2.38	2.05
lnedu	教育支出/政府支出	336	2.77	0.17	2.22	3.36

lnfin	金融机构贷款余额度/GDP	336	4.14	0.44	3.26	5.51
lnfix	固定资产投资/GDP	336	4.40	0.30	3.37	5.20
lntran	人均道路面积	336	1.05	0.69	-0.67	2.62

资料来源：作者计算整理。

为确保实证结果的科学性和准确性，避免各指标出现共线性问题，因此本文采用方差膨胀因子(VIF)来判断指标间的共线性程度，检验结果表明，各变量的平均方差膨胀系数为2.56(<10)，即不存在共线性问题。

3.3 实证结果

根据 Hausman 检验结果选择固定效应模型。同时，通过 LM 检验、LR 检验和 WALT 检验对空间计量模型进行选择，表明空间固定效应模型的空间杜宾模型最优。为考察空间关系是否会影响各因素对创新效率的估计结果，基于3种空间权重矩阵下，运用空间滞后(SAR)、空间误差(SEM)和空间杜宾(SDM)模型分别进行检验，回归结果见表7。

由表7可知，在3种空间权重矩阵下，空间相关系数均为正且都通过1%显著性检验，表明长江中游城市群城市创新效率存在较为明显的正向空间溢出效应，人才、资金、信息和技术等创新资源在城市间的流动促进了创新效率外溢，进而对邻近城市科技创新发展产生“涓滴效应”。此外，各变量系数显著性没有很明显变化，表明所构建的空间计量模型是稳健的。从回归结果可知，经济发展、市场结构、教育支持、金融发展以及交通水平对城市创新效率产生了显著正向作用，而固定资产投资有明显的负作用，人力资本和对外开放对创新效率的影响并不显著。在空间滞后项方面：经济发展、教育支持和交通水平均有重要的正向空间溢出效应，对外开放和金融发展存在负向空间溢出效应；市场结构和人力资本都存在显著为负的空间溢出效应，而在地理距离权重矩阵下有正向溢出作用但未通过显著性检验；固定资产投资对创新效率的空间溢出效应并不明显。进一步进行效应分解，结果如表8所示。直接效应是各因素对本城市创新效率的影响；间接效应，即溢出效应表示各因素对其空间关联城市创新效率的影响，或关联城市各因素对本城市创新效率的影响；总效应为各因素对城市创新效率总的影响强度。

由表8可知，在直接效应方面，经济发展、市场结构、教育支持、金融发展和交通水平对本城市创新效率都有明显促进作用，均通过显著性检验，其中金融发展的影响最为显著；固定资产投资对创新效率有明显负作用，通过1%显著性检验，这表明固定资产投资对本城市创新效率有抑制作用；对外开放和人力资本均未通过显著性检验，说明其对本地创新效率的作用还不够明显。

表7 长江中游城市群创新效率影响因素空间计量结果

解释变量	经济距离矩阵(W1)			地理距离矩阵(W2)			经济地理嵌套矩阵(W3)		
	SEM	SAR	SDM	SEM	SAR	SDM	SEM	SAR	SDM
lngdp	0.224** (2.32)	0.213*** (2.69)	0.169*** (2.7)	0.210** (2.14)	0.205*** (2.64)	0.176** (2.28)	0.224** (2.26)	0.206*** (2.71)	0.164*** (2.61)
lnind	0.253*** (3.65)	0.217*** (3.65)	0.251*** (3.2)	0.224*** (3.24)	0.165** (2.34)	0.316*** (4.22)	0.253*** (3.62)	0.218*** (3.65)	0.264*** (3.19)
lnhc	0.201 (1.32)	0.118 (0.91)	0.183 (1.3)	0.000 (0.00)	-0.068 (-0.47)	0.134 (0.88)	0.191 (1.22)	0.096 (0.75)	0.222 (1.53)

lnfdi	0.017 (0.78)	0.006 (0.24)	0.001 (0.05)	0.025 (1.15)	0.016 (0.66)	0.002 (0.11)	0.018 (0.82)	0.011 (0.42)	0.004 (0.18)
lnedu	0.144** (2.27)	0.303*** (4.17)	0.189*** (2.98)	0.213*** (2.9)	0.287*** (3.83)	0.225*** (3.05)	0.153** (2.45)	0.297*** (4.19)	0.204*** (3.21)
lnfin	0.342*** (2.81)	0.239** (2.19)	0.33*** (2.65)	0.415*** (3.19)	0.228** (1.99)	0.449*** (3.59)	0.348*** (2.88)	0.239** (2.23)	0.348*** (2.89)
lnfix	-0.420*** (-3.99)	-0.303*** (-2.91)	-0.332*** (-3.62)	-0.379*** (-2.61)	-0.257** (-2.08)	-0.287** (-2.13)	-0.402*** (-3.61)	-0.301*** (-2.9)	-0.266*** (-2.72)
lntran	0.042 (1.02)	0.116*** (2.83)	0.067** (2.32)	0.062 (1.45)	0.127*** (3.08)	0.095*** (2.63)	0.044 (1.08)	0.114*** (2.83)	0.079*** (2.79)
w*lngdp			0.272** (2.37)			0.180 (1.25)			0.289** (2.34)
w*lnind			-0.365* (-1.86)			0.042 (0.22)			-0.353 (-1.62)
w*lnhc			-1.004*** (-3.54)			0.245 (0.69)			-1.068*** (-3.53)
w*lnfdi			-0.171* (-1.88)			-0.176*** (-2.72)			-0.157* (-1.91)
w*lnedu			0.312* (1.81)			0.350 (1.53)			0.280 (1.51)
w*lnfin			-0.082 (-0.34)			-1.035*** (-3.74)			-0.052 (-0.20)
w*lnfix			0.172 (0.89)			0.377 (1.64)			0.026 (0.12)
w*lntran			0.239** (2.15)			0.333*** (3.08)			0.258*** (2.58)
λ	0.688*** (14.62)			0.669*** (7.27)			0.704*** (13.47)		
ρ		0.594*** (10.98)	0.288*** (5.64)		0.574*** (7.03)	0.339*** (3.99)		0.622*** (11.52)	0.300*** (5.50)
sigma2_e	0.019*** (8.94)	0.020*** (9.1)	0.017*** (7.88)	0.020*** (7.94)	0.021*** (8.83)	0.019*** (8.50)	0.019*** (8.90)	0.019*** (9.01)	0.017*** (8.00)
Log 值	177.712	169.409	205.723	166.107	164.236	189.606	178.036	171.078	205.061

注：括号内为 z 统计值；***、**、*分别表示在 1%、5%、10%水平下显著。

表 8 空间杜宾模型效应分解

变量	经济距离矩阵(W1)			地理距离矩阵(W2)			经济地理嵌套矩阵(W3)		
	Direct	Indirect	Total	Direct	Indirect	Total	Direct	Indirect	Total
lngdp	0.186*** (2.96)	0.449*** (3.02)	0.634*** (4.31)	0.191** (2.42)	0.372* (1.74)	0.563** (2.51)	0.181*** (2.87)	0.484*** (2.99)	0.664*** (4.19)
lnind	0.235*** (3.29)	-0.389 (-1.63)	-0.154 (-0.76)	0.319* (4.4)	0.224 (0.83)	0.543* (1.94)	0.249*** (3.31)	-3.689 (-1.35)	-0.119 (-0.5)
lnhc	0.155 (1.15)	-1.315*** (-3.7)	-1.161*** (-3.03)	0.162 (1.13)	0.427 (0.83)	0.589 (1.12)	0.196 (1.41)	-1.417*** (-3.78)	-1.221*** (-3.07)
lnfdi	-0.007 (-0.3)	-0.223* (-1.77)	-2.334* (-1.71)	-0.007 (-0.36)	-0.261** (-2.39)	-0.268** (-2.37)	-0.003 (-0.14)	-0.214* (-1.82)	-0.218* (-1.75)
lnedu	0.205*** (3.48)	0.503** (2.35)	0.707*** (3.34)	0.249*** (3.58)	0.654* (1.82)	0.903** (2.53)	0.217*** (3.68)	0.479** (2.06)	0.697*** (3.05)
lnfin	0.336*** (2.82)	0.018 (0.06)	0.355 (1.33)	0.415*** (3.36)	-1.294*** (-3.32)	-0.879** (-2.11)	0.356*** (3.09)	0.079 (0.24)	0.435 (1.45)
lnfix	-0.324*** (-3.32)	0.086 (0.32)	-0.239 (-0.442)	-0.269** (-1.96)	0.409 (1.25)	0.140 (0.39)	-0.264*** (-2.57)	-0.097 (-0.33)	-0.361 (-1.08)
lntran	0.077*** (2.79)	0.367** (2.33)	0.445*** (2.77)	0.111*** (3.17)	0.545*** (4.12)	0.656*** (4.57)	0.091*** (3.25)	0.407*** (2.8)	0.498*** (3.35)

注：括号内为 z 统计值；***、**、*分别表示在 1%、5%、10%水平下显著。

在间接效应方面，经济发展、教育支持和交通水平不仅有助于促进本城市创新效率提升，对关联城市的创新效率也有显著促进作用，这可能由于经济发展水平越高、教育水平越发达、交通水平越便利能加快推进新思想、新知识和新技术等在城市间的扩散和溢出，进而对关联城市创新效率的提高形成“涓滴效应”。对外开放和人力资本都存在负向溢出作用，在某种程度上阻碍了关联城市创新效率的提高。人力资本未能带来预期的正向溢出效应，可能是由于城市间存在竞争关系，科技创新能力强的城市往往能吸引到很多创新人才流入，从而对周边城市产生“极化效应”，导致创新动力不足；而在地理距离矩阵下，人力资本能带来正向的溢出效应但效果不明显，相比于其他创新要素，高科技人才具有一定的地域归属感，地理邻近性能促进人力资本的溢出作用。对外开放有明显负作用，这与盛彦文等[24]的研究结论相一致，可能是由于引进的外商直接投资科技含量不高，且在某种程度上会对本土企业和市场形成“挤压效应”，从而造成创新资源浪费。金融发展在地理距离矩阵下存在显著为负的溢出效应，这与朱丽霞等^[15]的研究结论相近。这可能由于在金融资源上城市间存在竞争关系，而且现阶段长江中游城市群还未充分发挥金融机构对城市创新发展的推动作用。而市场结构和固定资产投资均未产生显著的溢出效应。

在总效应方面，经济发展、教育支持和交通水平对创新效率有明显的正作用；而对外开放、人力资本都有负作用，这与间接效应变化方向一致；在地理距离矩阵下，市场结构对创新效率有显著的正向作用，而金融发展有负作用。而其他变量均未通过显著性检验，这表明其对城市群的创新效率还未产生明显的影响作用。

4 结论与讨论

本文以 2008~2019 年长江中游城市群 28 个城市为研究对象, 首先运用三阶段 DEA 模型测算城市创新效率并分析其时空变化趋势, 进而构建空间杜宾模型进一步探讨城市创新效率影响因素及空间溢出效应, 主要结论如下:

(1) 从三阶段 DEA 模型的测算结果来看, 长江中游城市群创新效率整体呈波动变化发展趋势, 调整之后从 2008 年的 0.562 下降为 2019 年的 0.445。各城市创新效率差异明显, 其中南昌、武汉、宜昌、荆州和长沙等城市创新效率相对较高, 景德镇、鹰潭、新余、孝感、岳阳和常德等城市相对较低, 这些城市在科技人才和研发资金等创新资源相对较缺乏。

(2) 从 SFA 回归分析外部环境变量对创新投入松弛变量的影响来看, 财政科技支持和产业结构能有效促进城市创新效率提高, 而基础设施有明显负效应。

(3) 从城市创新效率时空分异来看, 总体上形成了以武汉为核心、南昌和长沙为重要创新节点, 并向周围城市逐渐辐射递减的空间集聚格局。其中高效率地区由西向东演化的趋势日益明显, 较高效率地区表现为由分散布局转向相对集中分布的演变趋势, 中效率地区集中成片分布, 而低效率地区呈散落式分布且有减少的趋势。

(4) 空间相关性检验表明长江中游城市群各城市创新生产活动还不够紧密, 但存在局部自相关。从空间杜宾模型的回归结果来看, 在 3 种空间权重矩阵下, 城市创新效率均具有显著为正的空间溢出效应, 并对关联城市的科技创新发展形成“涓滴效应”; 其中经济发展、教育支持和交通水平不仅能促进本城市创新效率的提升, 同时也能带动关联城市科技创新的发展; 市场结构、金融发展和人力资本能提高本城市创新效率, 但对关联城市具有一定的阻碍作用; 而固定资产投资对本城市创新效率提升具有阻碍作用, 但能促进关联城市科技创新发展; 而对对外开放对创新效率存在抑制作用。

基于上述结论并结合长江中游城市群实际情况, 为有效提高城市创新效率提出以下对策建议。首先, 充分利用创新资源, 实现创新产出最大化。群内各城市应因地制宜解决创新发展中遇到的问题, “高效率地区”的城市在继续保持创新投入的同时要减少冗余, 进一步优化配置创新投入结构, 要提高先进技术的利用率和吸收消化速度, 尽快保证创新成果实现产业化; 同时要注重把创新资源投入高新技术产业方面, 减少无谓损失。对于景德镇、鹰潭和常德等“中效率地区”和“低效率地区”城市, 更多是由于缺乏创新资源而导致创新效率不高, 应加大创新人才投入, 多渠道争取创新资金支持, 并向高效率地区城市学习先进技术以及管理经验。其次, 改善外部环境, 营造良好创新环境。进一步完善城市的基础设施, 促进创新资源在城市群自由流动; 引进高质量的外商直接投资, 积极学习国外先进的管理经验和新技术, 为本地企业和市场营造良好的竞争学习氛围; 加大科教支出在财政支出中的比例, 合理发挥政府的引导作用, 出台有利于科技创新的政策文件, 鼓励和帮扶高新技术产业发展; 注重高端人才的培养和引进, 提高城市群内人力资本存量, 发挥人才溢出效应; 构建合适的融资渠道和服务体系, 推动金融资源在城市群内的流动。最后, 加强城市群一体化建设, 搭建创新合作平台。对于整个城市群而言, 要提高整体创新效率、打造科技创新高地, 离不开各城市之间深入的科技创新合作。为此, 要进一步加强南昌、武汉和长沙作为核心城市的中心辐射带动作用, 以点带面, 带动城市群周围城市创新发展, 切实帮扶鹰潭、景德镇、孝感和娄底等创新效率低的城市。另外, 各城市可建立共同培育科技创新人才等机制, 建立跨城市的信息平台、数据共享平台等大数据交流中心, 鼓励企业、高校和科研机构开展交流合作。

注释

①限于篇幅, 此处暂只列出基于经济距离权重矩阵下的全局莫兰指数。

参考文献

[1] 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, 38(10):12-25. MA J, DENG H B, CAI A X. Analysis on city innovation output of space-time distribution pattern and influential factors in China: Empirical analysis of 285 cities in China[J]. Science of Science and Management of S&T, 2017, 38(10):12-25.

[2] 虞晓芬, 李正卫, 池仁勇, 等. 我国区域技术创新效率: 现状与原因[J]. 科学学研究, 2005, 23(2):258-264. YU X F, LI Z W, CHI R Y, et al. Technological innovation efficiency of different regions in China: Status quo and causes[J]. Studies in Science of Science, 2005, 23(2):258-264.

[3] 何枫, 陈荣, 何炼成. SFA模型及其在我国技术效率测算中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(5):46-50. HE F, CHEN R, HE L C. The measurement of Chinese technical efficiency: The application of stochastic frontier production function[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(5):46-50.

[4] 刘顺忠, 官建成. 区域创新系统创新绩效的评价[J]. 中国管理科学, 2002, 10(1):75-78. LIU S Z, GUAN J C. The evaluation on the innovating performance of regional innovation systems[J]. Chinese Journal of Management Science, 2002, 10(1):75-78.

[5] 白俊红, 江可申, 李婧. 中国区域创新系统创新效率综合评价及分析[J]. 管理评论, 2009, 21(9):3-9. BAI J H, JIANG K S, LI J. Research on the innovating efficiency of regional innovation systems of China[J]. Management Review, 2009, 21(9):3-9.

[6] AIGNER D, LOVELL C A K, SCHMIDT P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models[J]. Journal of Econometrics, 1977, 6(1):21-37.

[7] MEEUSEN W, VAN DEN BROECK J. Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error[J]. International Economic Review, 1977, 18(2):435.

[8] BATTESE G E, CORRA G S. Estimation of a production frontier model: With application to the pastoral zone of eastern Australia[J]. Australian Journal of Agricultural Economics, 1977, 21(3):169-179.

[9] 张宗益, 周勇, 钱灿, 等. 基于SFA模型的我国区域技术创新效率的实证研究[J]. 软科学, 2006, 20(2):125-128. ZHANG Z Y, ZHOU Y, QIAN C, et al. The empirical analysis of efficiency of Chinese regional innovation systems on stochastic production frontier function[J]. Soft Science, 2006, 20(2):125-128.

[10] 白俊红, 江可申, 李婧. 应用随机前沿模型评测中国区域研发创新效率[J]. 管理世界, 2009, 25(10):51-61. BAI J H, JIANG K S, LI J. Evaluation of R&D innovation efficiency in China by stochastic frontier model[J]. Management World, 2009, 25(10):51-61.

[11] FARRELL M J. The measurement of productive efficiency[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General), 1957, 120(3):253-281.

[12] 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.

-
- [13] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. *Management Science*, 1984, 30(9):1078-1092.
- [14] 李梦琦, 胡树华, 王利军. 基于 DEA 模型的长江中游城市群创新效率研究[J]. *软科学*, 2016, 30(4):17-21, 45. LI M Q, HU S H, WANG L J. Research on innovation efficiency of triangle of central China based on DEA model[J]. *Soft Science*, 2016, 30(4):17-21, 45.
- [15] 朱丽霞, 贺容, 郑文升, 等. 长江中游城市群城市创新效率的时空格局及其驱动因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10):2279-2288. ZHU L X, HE R, ZHENG W S, et al. Study on spatial-temporal pattern and driving factors of urban innovation efficiency of urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(10):2279-2288.
- [16] TÖDTLING F, KAUFMANN A. Innovation systems in regions of Europe: A comparative perspective[J]. *European Planning Studies*, 1999, 7(6):699-717.
- [17] 李习保. 中国区域创新能力变迁的实证分析: 基于创新系统的观点[J]. *管理世界*, 2007, 23(12):18-30, 171. LI X B. A case study on the changes in the innovation capability of China's regions: A concept based on the innovation system[J]. *Management World*, 2007, 23(12):18-30, 171.
- [18] 程时雄, 柳剑平. 中国工业行业 R&D 投入的产出效率与影响因素[J]. *数量经济技术经济研究*, 2014, 31(2):36-51, 85. CHENG S X, LIU J P. R & D production efficiency and influencing factors on China's industrial sector[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2014, 31(2):36-51, 85.
- [19] 肖文, 林高榜. 政府支持、研发管理与技术创新效率——基于中国工业行业的实证分析[J]. *管理世界*, 2014, 30(4):71-80. XIAO W, LIN G B. Government support, R&D management and technological innovation efficiency: An empirical analysis based on China industrial industry[J]. *Management World*, 2014, 30(4):71-80.
- [20] 李健, 李宁宁, 苑清敏. 高新技术产业绿色创新效率时空分异及影响因素研究[J]. *中国科技论坛*, 2021(4):92-101. LI J, LI N N, YUAN Q M. Study on the spatial-temporal differences and influencing factors of green innovation efficiency in high-tech industry[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2021(4):92-101.
- [21] 余泳泽, 刘大勇. 我国区域创新效率的空间外溢效应与价值链外溢效应——创新价值链视角下的多维空间面板模型研究[J]. *管理世界*, 2013, 29(7):6-20, 70, 187. YU Y Z, LIU D Y. The effect of the space outflow of China's regional innovation and the effect of the outflow of value chains: A study, from the perspective of the innovative value chain, on the model of the panel of multidimensional space[J]. *Management World*, 2013, 29(7):6-20, 70, 187.
- [22] 李政, 杨思莹, 何彬. FDI 抑制还是提升了中国区域创新效率?——基于省际空间面板模型的分析[J]. *经济管理*, 2017, 39(4):6-19. LI Z, YANG S Y, HE B. Does FDI inhibit or promote China's regional innovation efficiency?: Analysis of 30 provinces based on spatial panel model[J]. *Business Management Journal*, 2017, 39(4):6-19.
- [23] 原毅军, 高康. 产业协同集聚、空间知识溢出与区域创新效率[J]. *科学学研究*, 2020, 38(11):1966-1975, 2007. YUAN Y J, GAO K. The synergetic agglomeration of industries, spatial knowledge spillovers and regional innovation efficiency[J]. *Studies in Science of Science*, 2020, 38(11):1966-1975, 2007.

-
- [24] 盛彦文, 骆华松, 宋金平, 等. 中国东部沿海五大城市群创新效率、影响因素及空间溢出效应[J]. 地理研究, 2020, 39(2):257-271. SHENG Y W, LUO H S, SONG J P, et al. Evaluation, influencing factors and spatial spillover of innovation efficiency in five major urban agglomerations in coastal China[J]. Geographical Research, 2020, 39(2):257-271.
- [25] 陈银娥, 李鑫, 李汶. 中国省域科技创新效率的影响因素及时空异质性分析[J]. 中国软科学, 2021(4):137-149. CHEN Y E, LI X, LI W. Analysis on determinants and spatiotemporal heterogeneity of science and technology innovation efficiency at Chinese provincial level[J]. China Soft Science, 2021(4):137-149.
- [26] FRIED H O, LOVELL C K, SCHMIDT S S, et al. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis[J]. Journal of Productivity Analysis, 2002, 17(1):157-174.
- [27] 鲁元平, 张克中, 欧阳洁. 土地财政阻碍了区域技术创新吗?——基于 267 个地级市面板数据的实证检验[J]. 金融研究, 2018(5):101-119. LU Y P, ZHANG K Z, OUYANG J. Does land finance hinder regional innovation? based on the data of 267 prefectural-level city in China[J]. Journal of Financial Research, 2018(5):101-119.
- [28] SIMAR L, WILSON P W. Estimation and inference in two-stage, semi-parametric models of production processes[J]. Journal of Econometrics, 2007, 136(1):31-64.
- [29] 韩先锋, 宋文飞, 李勃昕. 互联网能成为中国区域创新效率提升的新动能吗[J]. 中国工业经济, 2019(7):119-136. HAN X F, SONG W F, LI B X. Can the Internet become a new momentum to improve the efficiency of regional innovation in China[J]. China Industrial Economics, 2019(7):119-136.
- [30] 李金滢, 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. LI J Y, LI Z Y, LI C. Empirical study on the efficiency of urban green innovation: Evidence from urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2016(6):3-16.
- [31] 仇怡, 李亚珂. 城镇化水平对城市创新能力的影响研究——以长江中游城市群 28 市为例[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 2017, 20(6):52-57. QIU Y, LI Y K. On urban innovation ability influenced by urbanization: A case study of the 28 cities of the city clusters along the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Social Science Edition), 2017, 20(6):52-57.
- [32] 白俊红, 蒋伏心. 考虑环境因素的区域创新效率研究——基于三阶段 DEA 方法[J]. 财贸经济, 2011, 32(10):104-112, 136. BAI J H, JIANG F X. Research on regional innovation efficiency with environment factors: Based on three-stage DEA model[J]. Finance & Trade Economics, 2011, 32(10):104-112, 136.
- [33] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46(sup1):234-240.
- [34] ANSELIN L. Spatial econometrics: methods and models[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [35] 冯根福, 郑明波, 温军, 等. 究竟哪些因素决定了中国企业的技术创新——基于九大中文经济学权威期刊和 A 股上市

公司数据的再实证[J]. 中国工业经济, 2021(1):17-35. FENG G F, ZHENG M B, WEN J, et al. What determines the Chinese firms' technological innovation: A re-empirical investigation based on the previous empirical literature of nine Chinese economics top journals and A-share listed company data[J]. China Industrial Economics, 2021(1):17-35.

[36] 刘伟. 中国高新技术产业研发创新效率测算——基于三阶段 DEA 模型[J]. 数理统计与管理, 2015, 34(1):17-28. LIU W. Measurement on innovation efficiency of hi-tech industries in China: Based on three-stage DEA model[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2015, 34(1):17-28.

[37] 王雨飞, 倪鹏飞. 高速铁路影响下的经济增长溢出与区域空间优化[J]. 中国工业经济, 2016(2):21-36. WANG Y F, NI P F. Economic growth spillover and spatial optimization of high-speed railway[J]. China Industrial Economics, 2016(2):21-36.