

长江经济带城市绿色创新空间关联网络演化分析¹

檀菲菲，王飞跃，占 华

（南京财经大学 江苏产业发展研究院，江苏 南京 210023）

【摘 要】：文章基于 2006—2020 年长江经济带 108 个城市绿色创新能力的评估，运用耦合引力模型构建长江经济带城市绿色创新空间关联网络，并借助社会网络分析法对其结构演化特征及驱动因素进行分析。研究发现：长江经济带三大城市群整体绿色创新能力存在明显差异；城市绿色创新空间关联网络的关联强度呈现上升趋势，但仍处于较低水平；上海、苏州等城市长期处于网络核心，随着区域一体化进程加深，出现了武汉、长沙、重庆等次级网络中心；城市绿色创新空间关联网络可分为四大板块，各板块间差异明显；城市开放程度、环境规制等差异因素对城市绿色创新空间关联网络呈显著正向影响，而产业结构、地理距离等差异因素则呈显著负向影响。

关键词：绿色创新；空间关联网络；社会网络分析；长江经济带

中图分类号：X22；F124.5；F124.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-5097（2023）09-0034-10

一、引言

创新被视为区域经济长期稳定增长最重要的决定要素，绿色创新作为创新发展新模式，将绿色发展理念和创新驱动理念有机融合，不仅有助于缓解资源环境瓶颈约束的压力，而且能够加快产业结构调整和推动区域经济的可持续发展，更是培育不同尺度区域发展新动能的关键。如何有效提升绿色创新能力，是新时代绿色发展的重要落脚点，也是推进创新驱动和绿色发展两大国家发展战略协同的契合点。绿色创新具有传统创新的典型空间特征，而城市是创新生态系统的最佳载体，也是政府开展环境治理的最有效单元。因此，研究城市乃至城市群的绿色创新，是落实我国现阶段生态文明实践和政策的现实需求，对我国经济高质量发展具有重要的科学意义和战略意义[1]。

作为我国三大战略发展带之一，长江经济带是维护区域生态安全和提升生态文明建设水平的领头羊。据统计，2020 年，长江经济带人口占全国的 43%，GDP 达到 47.15 万亿元，占全国的 46.52%，用水总量占全国的 33.8%，能源消费占全国的 35.2%。随着资源环境约束不断加大，高投入、高消耗、偏重数量扩张的发展方式已难以为继，长江经济带可持续发展和生态文明建设面临严峻挑战。针对长江经济带在我国的重要地位和当前日趋突出的生态环境压力，仅关注单个城市难以实现协同发展，应考虑城市间的关联作用形成合力，这需从空间关联网络的视角出发来解决“城市—城市群—长江经济带”可持续发展问题。因此，本文以长江经济带 108 个城市为研究样本，着重分析空间网络视角下城市绿色创新能力的交互效应及作用机制。

二、文献综述

国外绿色创新相关的研究起步较早，可以追溯到 20 世纪中叶 Boulding 的生态经济理论以及 David 的绿色经济理论，20 世纪末 Fussler 率先提出绿色创新概念，并将绿色创新定义为一种可以满足企业和消费者经济价值需求并同时最小化环境影响的新产

¹ 收稿日期：2022-09-27

基金项目：国家自然科学基金面上项目“基于安全边界与绿色创新的长江经济带复合系统可持续发展演化与适应性调控”（72074107）；国家自然科学基金青年项目“基于空间关联与产业代谢的长江经济带可持续发展评价与调控对策”（71603111）
作者简介：檀菲菲（1988—），女，安徽安庆人，副教授，硕士生导师，博士，研究方向：区域可持续发展，资源环境管理；王飞跃（1996—），男，江苏徐州人，硕士研究生，研究方向：资源与环境经济；占 华（1985—），男，安徽安庆人，讲师，博士，研究方向：环境经济学。

品。此后学者从生态学、经济学、管理学等视角对绿色创新内涵展开了探讨，尽管对绿色创新内涵的理解存在一定差异，但都认可绿色创新与环境创新[2,3]、生态创新[4]、可持续创新[5]具有异曲同工之处，都是以经济发展和生态可持续为出发点，创新目的在于绿色发展[6]。国外对绿色创新的研究重点关注产业和企业层面的绿色创新行为，相比之下国内关于绿色创新的研究更为丰富，涉及城市[7]、省[8]、城市群[9,10]等多种尺度，涵盖交通运输业[11]、制造业[12]、旅游业[13]、重污染行业[14]等多种行业，研究成果主要集中在以下三个方面：一是基于指标体系法或者随机前沿模型及数据包络分析法，以能力[15]和效率[16,17]两种方式评估地区绿色创新水平；二是在前者基础上借助泰尔指数[18]、莫兰指数[19]及空间计量模型[20]，分析绿色创新的空间格局演变；三是从经济[21]、教育[22]、交通[23]、环境规制[24]等角度，探究绿色创新的影响机理，以期厘清提升绿色创新水平的最优路径。

综上所述，国内外学者对绿色创新内涵、测度、时空演变以及影响因素展开了广泛研究，但较少有学者关注区域协调发展格局下城市间的绿色创新联系。长江经济带是我国的生态示范带，随着区域一体化进程加深，把握城市间绿色创新联系对促进长江经济带流域高质量发展至关重要。现有文献关于长江经济带绿色创新空间关联的研究较少，且局限于省级层面[25]，难以深度刻画绿色创新空间关联网络，因而以地级市为基本单元展开长江经济带流域绿色高质量发展的实证研究十分必要。

基于此，本文从地级市尺度出发构建城市绿色创新能力评价指标体系，运用修正的引力模型刻画长江经济带城市绿色创新能力的空间关联矩阵，结合社会网络分析方法深入剖析长江经济带城市绿色创新空间关联网络的演化特征及其驱动因素，以期拓展城市绿色创新研究的思路方法，厘清长江经济带流域城市绿色创新协同发展的路径，为长江经济带实现高质量发展提供参考。

三、研究方法

（一）城市绿色创新能力评价指标体系构建与数据来源

1. 指标选取

本文遵循科学性、代表性、层次性以及可操作性等原则，借鉴曹慧等[8]、任耀等[26]、付幅等[27]前期研究，从绿色创新投入、经济效益产出、创新效益产出、环境效益产出四个维度构建综合指标体系，予以评价长江经济带各城市绿色创新能力，具体见表1所列。

表1 城市绿色创新评价指标体系

维度	指标	单位	属性
绿色创新 投入	研发人员全时当量	万人	+
	新产品开发经费占GDP比重	%	+
	每万人政府科技投入	万元	+
经济效益 产出	新产品销售收入占GDP比重	%	+
	新产品项目开发数	项	+

创新效益 产出	绿色发明专利数	件	+
	国外三大检索工具收录我国科技论文数	篇	+
环境效益 产出	单位产值工业烟尘排放量	吨/万元	-
	单位产值工业废水排放量	万吨/万元	-
	单位产值工业SO ₂ 排放量	吨/万元	-

对于绿色创新投入指标，考虑无论是在新古典增长理论还是内生增长理论中，劳动和资本均被视作创新系统中的基础投入要素，结合肖黎明和张仙鹏[28]、崔蓉[29]等的研究成果，绿色创新与传统创新的本质区别在于产出及其环境效益，其投入并无二致，因而本文选取研发人员折合全时当量表征绿色创新劳动投入，并从企业和政府两大主体出发选取新产品开发经费占比和科技投入共同衡量绿色创新资本投入，继而构成了绿色创新投入。对于产出指标，本文拟从经济、创新和环境三个维度展开，以新产品销售收入占 GDP 比重和新产品项目开发数来衡量经济效益产出；以绿色发明专利数和国外三大检索工具收录我国科技论文篇数表征创新效益产出；从环境效益的角度出发，以单位产值工业烟尘排放量、单位产值工业废水排放量、单位产值工业二氧化硫排放量来表征环境效益产出（绿色创新有别于传统创新在环境效益方面的考量，因而已有文献常以“三废”[8]或基于“三废”构建环境污染指数[30]予以衡量，从而更好体现绿色创新，同时具有促进经济发展与减少环境影响的特质）。

2. 数据来源

根据《长江经济带发展规划纲要》（2016）中城市布局以及数据可获得性与可操作性，本文选择 2006—2020 年长江经济带 108 个城市的相关数据进行研究。具体数据来自国泰安数据库（CSMAR）、中国研究数据服务平台（CNRDS）、长江经济带各城市统计年鉴（2007—2021 年）、统计公报（2007—2021 年）、《中国城市统计年鉴》（2007—2021 年）、《环境统计年鉴》（2007—2021 年）、《中国科技统计年鉴》（2007—2021 年）和国家专利局。

（二）基于修正引力的城市绿色创新空间关联网络的构建

1. 基于修正引力的城市绿色创新空间关联模型

基于长江经济带城市绿色创新能力综合评价，本文进一步构建并解析各城市间绿色创新空间关联网络。现有研究中区域或城市空间关联网络构建的前置方法有向量自回归（VAR）模型[31]、投入产出模型[32]和引力模型[33]等。本文考虑 VAR 模型不适用于构造年度关联矩阵，投入产出模型对投入产出表的区域性与时间要求等有约束性限制，因而选择基于引力模型构建长江经济带城市间绿色创新空间关联网络。但传统引力模型也有不足之处，如仅以单一质量要素来衡量两地区间引力而忽略了交通设施完善带来的地理便捷，因此本文拟通过修正引力模型予以改善。参考前人研究[33]，本文对引力模型的原始公式进行修正，将人口和 GDP 视作两大重要因素引入模型，同时利用 GDP 来削弱空间距离限制。修正后的引力模型公式如式（1）所示：

$$n_{ij} = k_{ij} \frac{\sqrt[3]{P_i \text{GDP}_i \text{GIC}_i} \sqrt[3]{P_j \text{GDP}_j \text{GIC}_j}}{\left(\frac{D_{ij}}{\text{GDP}_i - \text{GDP}_j} \right)^2},$$

$$k_{ij} = \frac{\text{GIC}_i}{\text{GIC}_i + \text{GIC}_j} \quad (1)$$

其中： n_{ij} 表示长江经济带中城市 i 与城市 j 间绿色创新能力的空间； P_i 和 P_j 分别表示城市 i 和城市 j 的年末人口数； GDP_i 和 GDP_j 分别表示城市 i 和城市 j 的地区生产总值； GIC_i 和 GIC_j 则分别表示城市 i 和城市 j 的绿色创新能力综合评价表征； k_{ij} 表示城市 i 在城市 i 与 j 间绿色创新联系的贡献率；基于经济距离和地理距离的耦合因素对城市绿色创新能力空间关联的影响，本文拟将城市 i 与 j 间的地理距离 D_{ij} 与城市间 GDP 差值（ $\text{GDP}_i - \text{GDP}_j$ ）的比值表征这一“关联距离”，以体现两市通达距离。基于修正引力可得到两两城市间绿色创新空间关联矩阵，取矩阵均值为临界值，大于等于临界值时取值为 1，表示两城市间存在绿色创新关联；反之取值为 0，表示两城市间不存在绿色创新关联。由此获得表征长江经济带城市绿色创新空间关联的二值矩阵，为后续空间关联网络的构建奠定数据基础。

2. 基于社会网络分析的城市绿色创新空间网络构建与网络结构演化分析

社会网络分析是一种旨在“定量关系研究”的有效分析方法，由于其客观揭示网络拓扑结构特征的优势，近年来被广泛应用于社会学、管理学和生态环境等学科领域[34]，现有学者借助社会网络分析对我国能源消费[33]、区域经济增长[35]以及创新能力[36,37]等问题进行了诸多研究。然而，落脚到城市绿色创新能力空间关联网络这一焦点上的研究尚不多见。在绿色创新空间关联网络中，本研究将长江经济带各个城市视作该网络的节点，城市绿色创新在空间上的关联视作该网络中的“线”，因而“点”与“线”的复杂交错可构成长江经济带城市绿色创新空间关联网络。接下来，对长江经济带城市间绿色创新空间关联网络结构、特征及驱动机制一一予以解析。

(1) 网络特征分析。

空间关联网络的特征分为整体网络特征和个体网络特征两方面。整体网络特征一般可通过网络关联图、网络密度、关联系数以及网络效率和网络等级度展开分析，进而揭示关联网络的联系强度与整体结构；个体网络特征则能够阐明各个城市节点在网络中的重要性和作用，一般通过点度中心度、接近中心度和中介中心度等指标予以衡量。

(2) 空间聚类分析。

本文空间聚类分析拟运用块模型分析方法。块模型是基于结构对等化原则予以简化复杂网络结构的分析方法，能够依据网络所有节点的重要性和功能属性的特征进行分类。

(3) 驱动因素分析。

本文拟采用 QAP 回归分析针对城市绿色创新空间关联网络的关系数据实现驱动因素分析。城市绿色创新空间关联网络的形

成受诸多因素影响，本文从城市开放程度、产业结构、环境规制、科研环境、地理距离、经济发展水平和人民生活水平等多方面探究长江经济带城市绿色创新空间关联网络的驱动机制。具体来看，城市开放程度以外商直接投资（FDI）来表征，因为外商投资可以带来雄厚资金以及先进的技术和理念来赋能绿色创新；产业结构以第二产业产值占 GDP 比重来表征，由于第二产业相较其他产业耗能高、污染重，因此其比重差异会影响城市绿色创新的差异；环境规制以环境治理投资总额进行表征；此外科研环境、经济发展水平、生活水平差异都会影响城市间人力资本等绿色创新要素的流动，分别以政府科技投入、人均 GDP 和城市平均工资等予以表征。基于以上分析，构建如下模型：

$$Z = f(F, I, E, S, D, G, W) \tag{2}$$

其中：Z 为长江经济带城市绿色创新空间关联矩阵；F 为外商直接投资额差异矩阵；I 为第二产业产值占 GDP 比重差异矩阵；E 为环境治理投资额占 GDP 比重差异矩阵；S 为科研环境差异矩阵；D 为城市间地理距离差异矩阵；G 为人均 GDP 差异矩阵；W 为城市平均工资差异矩阵。

相关变量的具体定义见表 2 所列。

表 2 QAP 变量定义

变量	含义	定义
F	城市开放程度差异	两市外商直接投资额差异
I	产业结构差异	两市二产占比差异
E	环境规制差异	两市环境治理投资总额差异
S	科研环境差异	两市政府科技投入差异
D	地理距离差异	两市地理距离
G	经济发展水平差异	两市人均GDP差异
W	人民生活水平差异	两市平均工资差异

四、实证分析

（一）长江经济带城市绿色创新能力的评价与演变分析

长江经济带城市绿色创新能力的评价与演变分析如图 1 所示。

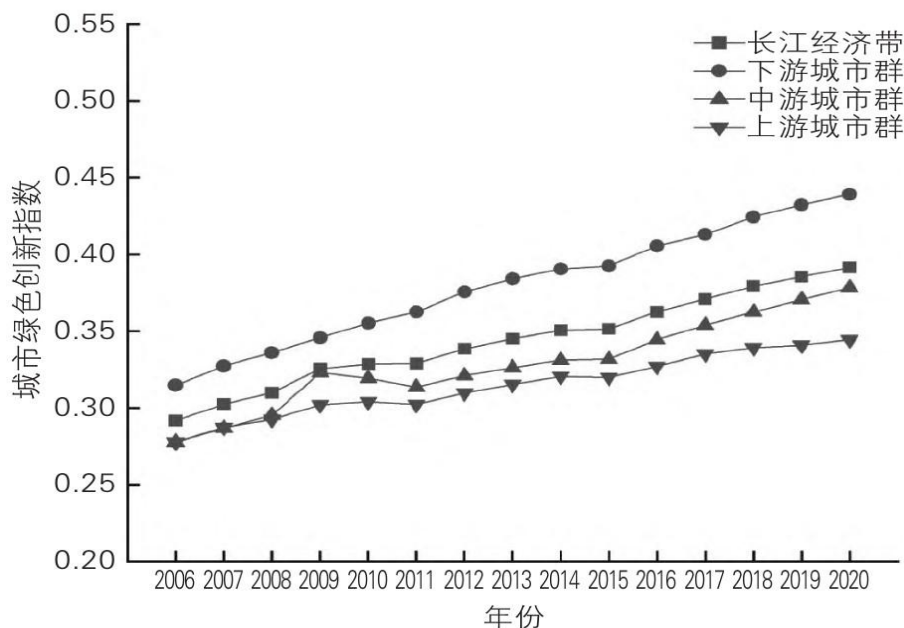


图 1 2006-2020 年长江经济带城市群绿色创新能力演变趋势

整体上看，2006—2020 年，长江经济带各城市绿色创新能力均值为 0.344，整体表现出明显上升趋势。从城市群层面看，长江经济带三大城市群绿色创新能力表现出显著区域差异性，下游、中游、上游城市群绿色创新能力依次递减，研究期内三个城市群绿色创新能力的均值分别为 0.380、0.329 和 0.315，增幅分别为 40%、36%、24%，差距明显。落脚到城市层面，上海、南京、苏州、杭州等绿色创新能力较高的城市，多位于长江经济带下游经济发达地区，这些城市有更好的资源禀赋，无论是绿色创新意识还是绿色创新技术都强于中上游城市；武汉、重庆、成都等长江经济带中上游城市近年来绿色创新意识也在逐步提高，积极布局战略性新兴产业，发展云计算、大数据等新型绿色技术产业，因而中上游城市的绿色创新能力也保持稳步向上的增长趋势，但限于这些城市本身资源的相对稀缺，其城市绿色创新能力在长江经济带各城市中相对落后。

（二）整体网络特征分析

1. 长江经济带城市绿色创新空间关联网络的拓扑可视化

基于长江经济带城市绿色创新能力关联矩阵，借助 ORIGIN 2021 实现长江经济带城市绿色创新能力空间关联网络图的拓扑可视化，限于篇幅，本文仅列出 2020 年长江经济带城市绿色创新空间关联网络图，如图 2 所示（感兴趣的读者可向作者索取历年网络图）。从图 2 中可知，长江经济带城市绿色创新空间关联已打破常规地理行政边界的限制，实现了相邻城市间绿色创新联系，从样本期历年网络图中发现连线有明显增加，这表明长江经济带城市间绿色创新联系在增强，网络稳定性得到提升。

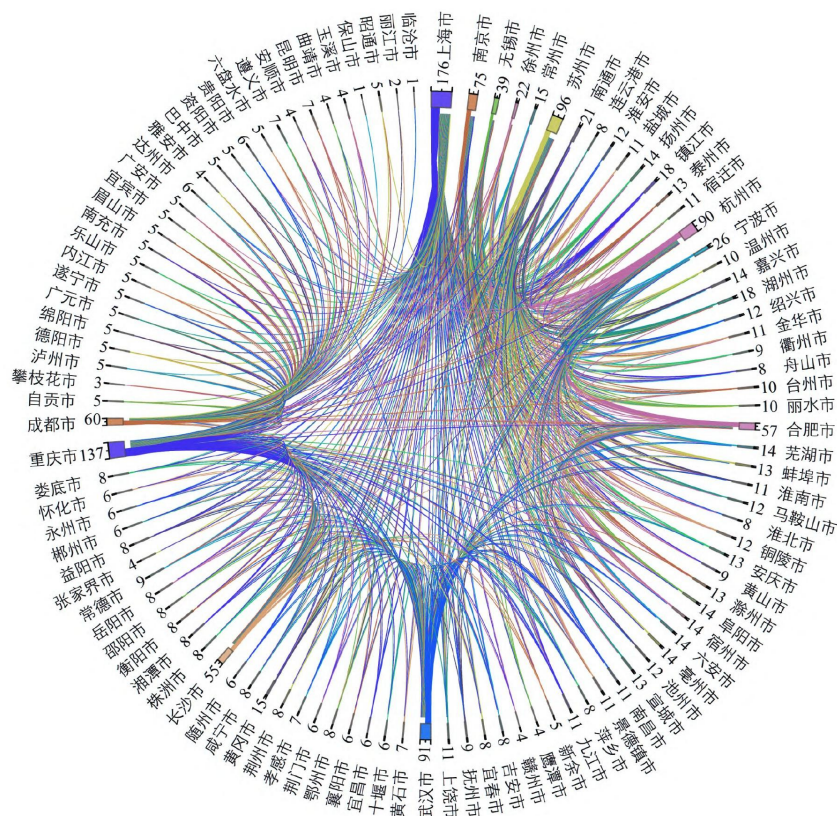


图 2 2020 年长江经济带城市绿色创新网络关联

2. 网络关联关系系数和网络密度

如图 3 所示，从网络密度和空间关联关系系数来看，长江经济带城市绿色创新空间关联网络的网络密度和网络关联关系系数总体上均呈现上升趋势，这表明城市绿色创新空间网络关联越来越紧密。然而从绝对值上看，长江经济带绿色创新空间关联的紧密程度仍处于较低水平，研究期间最高网络密度仅为 0.075，这与理论最高值相差较多，表明长江经济带城市之间绿色创新联系还有较大提升空间。

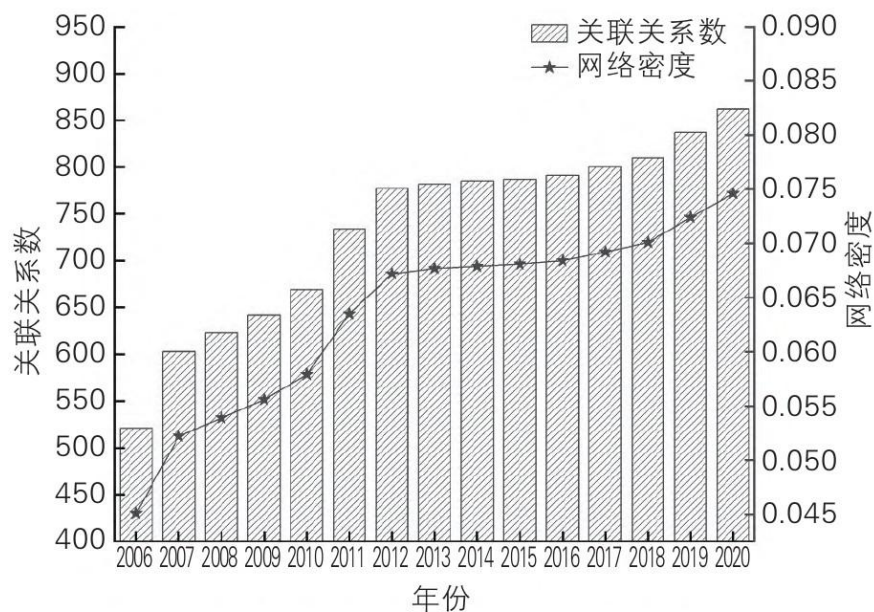


图3 网络关联关系系数与网络密度

3. 网络连通度、等级度和效率

如图4所示,从网络连通度、网络等级度和网络效率来看,网络连通度在研究期间均接近1,表明研究期间长江经济带城市绿色创新空间关联网络存在较强的空间关联和溢出效应;而网络等级度在研究期内较低,表明网络结构是趋于扁平化的,长江经济带城市间绿色创新联系和影响的程度较强;研究时期内长江经济带城市间绿色创新空间关联网络的网络效率呈现一定程度下降趋势,这意味着空间关联网络中连线增多,网络整体稳定性得到提升。

整体来看,研究期内长江经济带城市间绿色创新的空间关联逐渐增强,并逐步形成了较为稳定的城市绿色创新空间关联网络,但该网络整体仍处于初级阶段,网络密度较低。

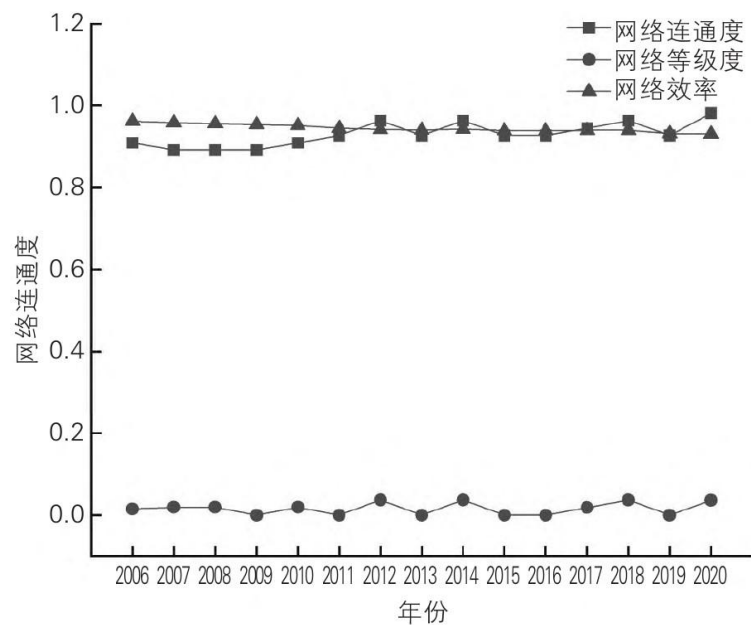


图 4 网络连通度、等级度和效率

(三) 个体网络特征分析

本文借助 UCINET 软件测度了 2006—2020 年 108 个城市的各项中心度指标并整理成表, 由于版面原因省略, 感兴趣的读者可向作者索取。此外, 图 5、图 6 分别直观展示了 2006 年城市间个体网络特征差异以及部分年份中介中心度演变趋势。

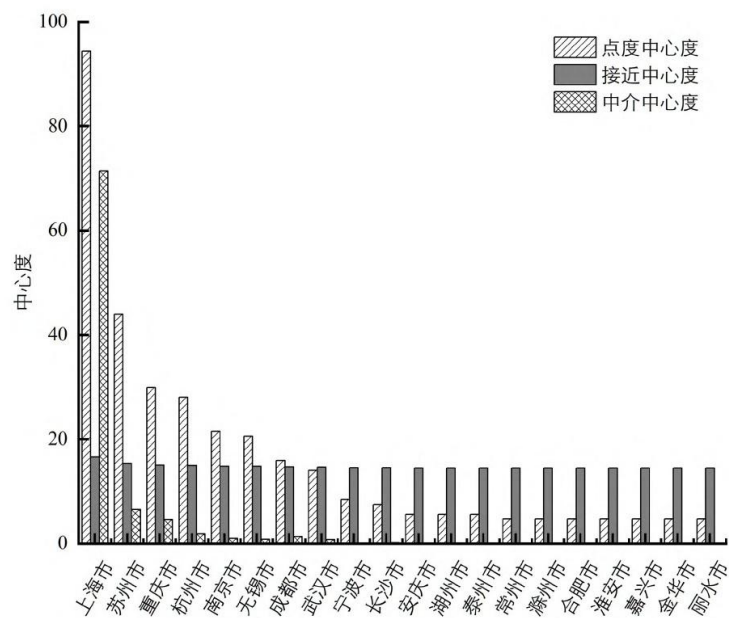


图 5 2006 年城市绿色创新网络的个体中心度 (前 20)

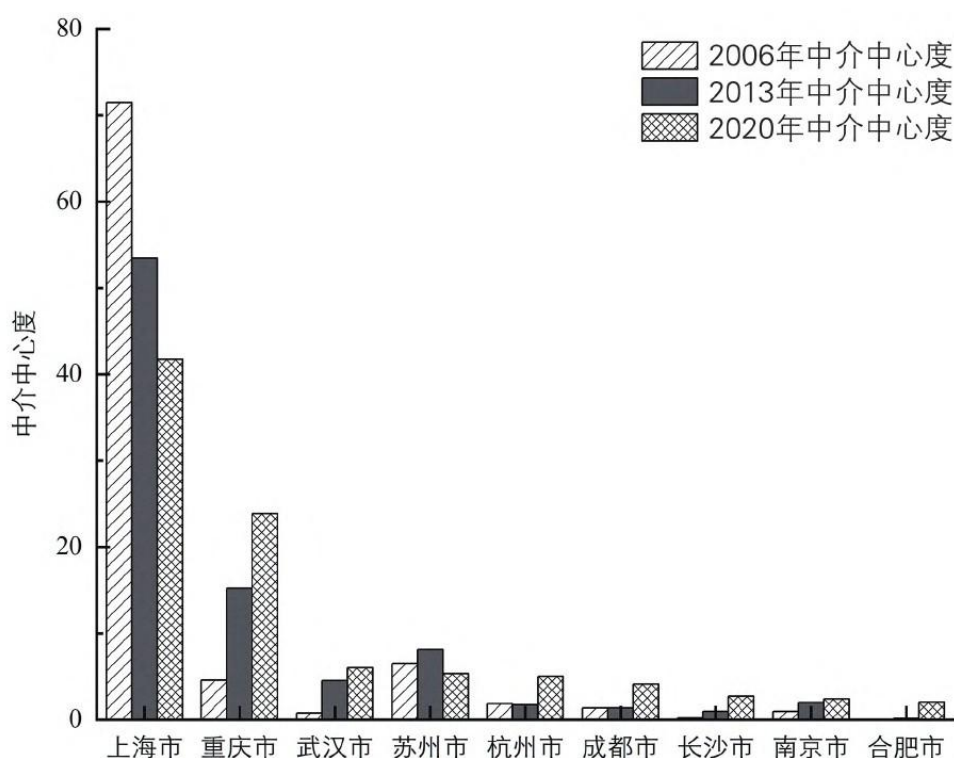


图 6 2006 年、2013 年和 2020 年中介中心度演变趋势

在点度中心度方面，上海在研究期间始终处于首位，表明上海在长江经济带城市绿色创新空间关联网中占据中心位置。值得注意的是，研究期间上海点度中心度出现波动下降趋势，这是由于随着我国近年来区域一体化政策的深入贯彻落实，处于长江经济带的多个城市群实现了明显发展，形成了以重庆、武汉、长沙、南京、杭州、合肥等城市为次级中心的不同城市群。2006—2020 年，作为长江上游城市群核心的重庆，其点度中心度从 29.907 增长到 71.028，增速为 134%；长江中游城市群的两极——武汉和长沙，两者点度中心度分别从 14.019 和 7.477 增长到 47.664 和 31.776，增速分别为 240%和 324%；南京、杭州、合肥等长三角核心城市点度中心度也得到了不同程度的提升，其中以合肥最为显著，从 4.673 增长到 35.514，增速达到了 660%，这与合肥加入长三角城市群是密切相关的。城市群的发展使得绿色创新资源通过“虹吸效应”向城市群内核心城市聚集，提高了核心城市的绿色创新能力，同时核心城市向周边地区进行辐射，促进了城市绿色创新空间关联网的形成与发展。

在中介中心度方面，图 6 展现了部分年份中介中心度的演变趋势。与点度中心度相似，研究期内上海中介中心度也出现了下降趋势，究其原因是随着其他城市对绿色创新资源掌控能力的增强，一定程度上削弱了上海的中介作用，这其中武汉和重庆表现最为明显。武汉在长江经济带中承东启西，研究期内其中介中心度增幅达 7 倍，逐渐成为网络关键枢纽，重庆是长江上游重要生态屏障所在，其中介中心度从 4.545 增长到 23.843，发挥着越来越重要的中介作用。此外，各城市中介中心度表现出明显的非均衡特征。以 2020 年为例，各城市中介中心度均值为 0.874，高于均值的 9 个城市中介中心度总和占总量 95%以上，意味着网络中绝大多数绿色创新联系都是通过这 9 个城市来完成的。

在接近中心度方面，出现了明显的上升趋势。2006 年接近中心度均值为 14.473，高于均值的城市有 23 个，2020 年接近中心度均值上升到 34.192，高于均值的城市数量增加到 67 个，这意味着多数城市可以通过较短的路径与其他城市相连，获取绿色创新资源的能力增强。排在前列的仍是上海、重庆、武汉、苏州等经济发达城市，但在接近中心度方面与其他城市差距较小。可见，长江经济带城市绿色创新空间关联网中绿色创新的流动效率得到了提升。

结合三项中心度指标来看，上海、苏州、杭州、武汉、重庆等发达城市各项中心度均较为突出，对绿色创新资源要素的掌控与支配能力较强。安顺、巴中、保山、达州等长江中上游欠发达城市在网络中处于边缘位置，吸引绿色创新资源的能力较弱。总体来看，长江经济带城市绿色创新空间关联网络表现出明显的马太效应，这与邵海琴等关于中国交通碳排放率空间关联网络结构的研究结果较为类似[38]。

（四）块模型分析

本文采用块模型探讨长江经济带城市绿色创新空间关联网络中的聚类特征（以 2020 年为例）。利用 UCINET 的 CONCOR 程序，设置最大分割深度为 2，收敛标准为 0.2，剔除普洱市这一孤立点后长江经济带 107 个城市划分为四个板块，各板块包含成员见表 3 所列。

表 3 四大板块所含城市

板 块	城 市
一	安庆、南通、黄冈、蚌埠、徐州、亳州、嘉兴、常州、衢州、温州、池州、滁州、绍兴、鹰潭、淮北、抚州、阜阳、黄山、六安、台州、泰州、铜陵、扬州、马鞍山、湖州、九江、淮安、上饶、淮南、丽水、连云港、宁波、宣城、金华、盐城、景德镇、芜湖、宿迁、镇江、宿州、舟山
二	上海、苏州、南京、合肥、杭州、无锡
三	昆明、巴中、德阳、广安、六盘水、南充、乐山、宜宾、临沧、保山、绵阳、遂宁、雅安、安顺、泸州、眉山、攀枝花、自贡、达州、遵义、贵阳、内江、玉溪、重庆、曲靖、广元、长沙、昭通、成都、资阳
四	怀化、萍乡、鄂州、邵阳、襄阳、随州、新余、黄石、丽江、湘潭、郴州、赣州、衡阳、宜昌、武汉、益阳、十堰、永州、孝感、岳阳、张家界、吉安、常德、娄底、荆门、荆州、株洲、宜春、南昌、咸宁

块模型分析结果见表 4 所列，可见，板块内关联关系系数有 220 个，板块间关联关系系数有 642 个，表明板块间绿色创新的空间关联和溢出效应显著。第一板块成员主要位于长三角地区，城市绿色创新能力较强，在城市绿色创新网络中较为活跃，接收其他板块关系系数为 210 个，溢出关系系数为 222 个，而板块内部关系为 44 个，为“净溢出”板块；二板块成员均为经济发展水平较高的城市，对绿色创新资源有较高需求，该板块接收关系系数为 226 个，溢出关系系数为 255 个，对板块内和板块外均产生了溢出效应，为“双向溢出”板块；第三板块成员主要位于长江上游地区，除重庆、成都外板块成员多为经济欠发达城市，自身绿色创新意识较差且缺乏对绿色创新资源的吸引力，其内部关系系数为 45 个，接收其他板块关系系数为 101 个，溢出关系为 68 个，为“净受益”板块；第四板块成员均位于长江中游地区，起着支撑长江经济带高质量发展的中介作用，其内部关系系数为 105 个，接收其他板块 105 个关系，向外溢出 97 个关系，板块间接收关系系数和溢出关系系数相当，为“经纪人”板块。以上四大板块间关系如图 7 所示。

表 4 长江经济带城市绿色创新空间关联网络的板块结构

板 块	一	二	三	四	接收关 系数	溢出关 系数	期望关系比例 (%)	实际关系比例 (%)	板块特 征
一	44	188	15	19	210	222	37.4	15.5	净溢出

									板块
二	181	26	37	37	226	255	5.6	9.3	双向溢出 板块
三	11	8	105	49	101	68	27.1	60.7	净受益 板块
四	18	30	49	45	105	97	27.1	31.7	经纪人 板块

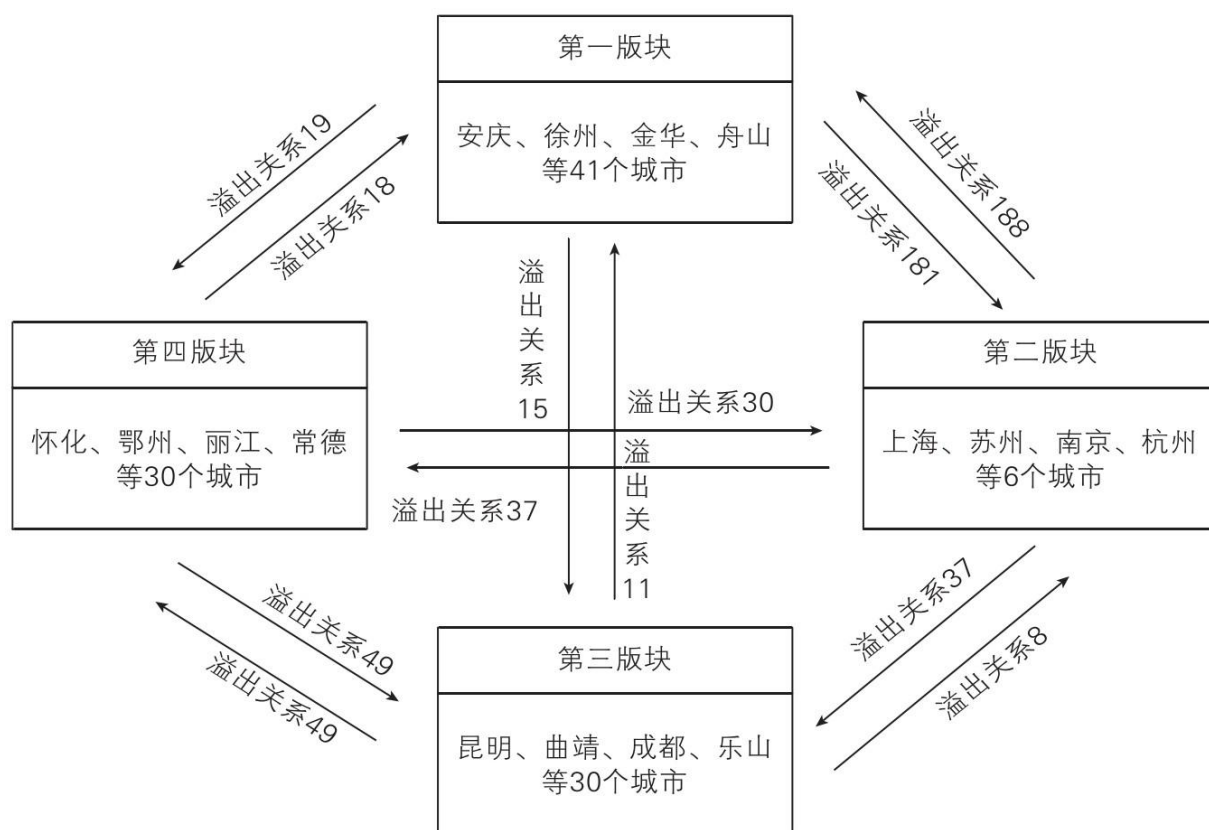


图 7 长江经济带绿色创新空间关联网络的四大板块间关系

结合板块间关联关系，使用 UCINET 计算得到四大板块间密度矩阵，见表 5 所列。将密度矩阵中板块密度大于整体网络密度的赋值为 1，反之赋值为 0。2020 年整体网络密度为 0.075，故将板块密度大于 0.075 值赋值为 1，否则赋值为 0，得到像矩阵，见表 5 所列。从像矩阵中看出，第二板块是最为“活跃”的板块，不仅板块自身存在城市绿色创新的关联关系，还对第一板块、第四板块产生溢出效应，同时接收第一、第三和第四板块的溢出。这主要是由于该板块成员是上海、苏州和杭州等经济发展水平较高的城市，这些城市绿色创新能力较强，通过“虹吸效应”吸收来自第一、三、四板块的绿色创新资源，同时对第一板块和第四板块产生溢出。

表 5 密度矩阵和像矩阵

板块	密度矩阵				像矩阵			
	一	二	三	四	一	二	三	四
一	0.027	0.631	0.009	0.015	0	1	0	0
二	0.655	0.619	0.038	0.143	1	1	0	1
三	0.012	0.176	0.121	0.054	0	1	1	0
四	0.015	0.176	0.054	0.052	0	1	0	0

（五）长江经济带城市绿色创新空间关联网络的驱动因素分析

通过对长江经济带城市绿色创新空间关联网络的多维度探索可知，各城市在空间关联网络中的中心度呈现非均衡特征，板块间呈现明显的异质性。为了进一步探索长江经济带城市绿色创新空间关联网络的形成机制与驱动因素，本文采用 QAP 分析方法予以探究，结果见表 6 所列。

表 6 QAP 回归分析结果

变量	非标准化 回归系数	标准化 回归系数	显著性 水平	概率 1	概率 2
F	0.005	0.007	0.068	0.068	0.932
I	-0.001	-0.008	0.030	0.970	0.030
E	0.004	0.009	0.029	0.029	0.971
S	0.003	0.006	0.082	0.082	0.918
D	-0.001	-0.242	0.000	1.000	0.000
W	0.004	0.008	0.037	0.037	0.963
G	0.006	0.012	0.008	0.008	0.992

从表 6 可以看出，环境规制差异、城市间地理距离差异、经济发展水平差异等指标均在 1%的水平上显著；城市开放度差异、

产业结构差异、科研环境差异等指标均在 5% 的水平上显著；生活水平差异在 10% 的水平上显著。具体来看，F 的相关系数为正，表明城市开放程度差距大的城市间会产生更多绿色创新互动，外商直接投资有助于城市绿色创新能力的提高，缺乏外资吸引力的城市向引进外资能力强的城市学习交流，从而促进城市间关联关系的形成；I 的相关系数为负，意味着产业结构差距过大会阻碍城市间绿色创新联系，究其原因，主要是第二产业意味着高能耗和高排放，第二产业占比高的城市会以产业转移等形式将高污染产业向欠发达城市转移，从而对城市绿色创新网络产生负面影响；E 的相关系数为正，表明环境规制差异越大越有助于城市间绿色创新关系的形成，这是因为在通常情况下，城市污染情况越严重就会面临越严格的环境规制，而高环境规制城市向其他城市学习如何提高绿色创新能力来改善环境质量，从而降低环境规制程度，这间接促进了城市绿色创新网络形成；D 的相关系数为负，表明地理距离不利于城市绿色创新网络的形成，原因在于绿色创新资源在相距较远的城市间流动意味着更高的成本，这直接阻碍了城市间产生绿色创新联系；S、G 和 W 的相关系数都为正，表明科研环境差异、经济发展水平差异和生活水平差异有利于建立城市绿色创新的联系，原因在于这三方面的差异通常会导致人力资本尤其是高素质人才在城市中的流动，从而促进城市绿色创新空间关联网络的形成。

五、结论与建议

（一）研究结论

本文基于长江经济带城市绿色创新能力的综合评价与演变分析，构建基于修正引力模型的长江经济带城市绿色创新空间关联网络，并使用社会网络分析方法深入探索了网络的演化特征及其驱动因素，得出如下结论：

首先，基于对 108 个城市绿色创新能力的评估，发现样本期内长江经济带整体绿色创新能力稳步提升，但城市间绿色创新能力差异较大，上海、苏州等下游城市的绿色创新能力远大于中上游城市。其次，从网络结构特征来看，一方面，长江经济带城市绿色创新空间关联网络的关联度虽然呈现上升趋势，但整体关联度还不强，长期来看该网络处于初级阶段，还有较大提升空间；另一方面，108 城市间个体网络特征差异较大，上海、苏州、杭州、重庆和武汉等城市各项中心度均排在前列，且与其他城市拉开了较大差距，表明网络中存在明显的马太效应。再次，根据块模型空间聚类结果，长江经济带可分为差异明显的四大板块，网络中溢出关系集中在第一和第二板块，表明城市间绿色创新的联系主要由第一和第二板块构成。最后，QAP 分析结果显示，城市间开放程度差异、环境规制差异、科研环境差异、经济发展差异和生活水平差异能够促进长江经济带城市绿色创新空间关联网络的形成与发展，而产业结构差异、地理距离差异等因素则会阻碍长江经济带城市绿色创新空间关联网络的形成与发展。

（二）政策建议

根据本文研究结果，结合长江经济带绿色创新发展的现实需求，提出如下建议：

（1）依据各城市绿色创新能力、经济发展水平等方面差异，因地施策。在绿色创新能力跨区域协同中发挥上海、苏州、杭州、重庆、武汉等城市的排头兵作用，建立城市绿色创新帮扶机制。对于绿色创新能力较弱的城市，要加大绿色创新投入、引导产业绿色转型、完善污染治理体系，同时要加强绿色创新宣传，让绿色创新理念深入人心。

（2）树立整体观念，促进流域间城市绿色创新的协同发展，打破流域内绿色创新的马太效应。通过政策扶持等手段，促进优异的资本、人才等绿色创新资源向次一级城市流动，推动城市间绿色创新知识共享平台一体化建设，形成绿色创新知识传播和人才流动的良好氛围，从而助力长江经济带各城市绿色创新联动发展。

（3）根据绿色创新空间关联网络的驱动因素研究结果，对症下药。长江经济带各城市应当适度扩大对外开放，提高引进和使用外资的水平，进而加快转变经济发展方式，推动产业结构优化升级；逐步转移、淘汰高污染、高能耗产业，同时鼓励新能源、新材料、大数据等高新技术低碳型企业良性发展；加大在环境治理方面的投入，倒逼企业绿色创新，促进区域绿色发展；各地

方政府应当加大政府科技投入与优化科研环境,吸引高素质创新型人才,以及加快完善城市间铁路、公路、水路等交通基础设施建设,从而通过便利的交通来削弱地理距离带来的阻碍,促使绿色创新要素以更低的成本在城市空间关联网中流动。

参考文献:

- [1]周力,沈坤荣.国家级城市群建设对绿色创新的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2020,30(8):92-99.
- [2] DANGELICO R M, PUJARI D, PONTRANDOLFO P. Green Product Innovation in Manufacturing Firms: A Sustainability-Oriented Dynamic Capability Perspective [j]. Business Strategy and the Environment,2017,26(4): 490-506.
- [3] CECERE G, MAZZANTI M. Green Jobs and EcoInnovations in European SMEs [J]. Resource and Energy Economics, 2017,49:86-98.
- [4] ARAUJO R, FRANCO M.The Use of Collaboration Networks in Search of Eco-Innovation: A Systematic Literature Review [J] . Journal of Cleaner Production,2021, 314: 127975.
- [5] AMENDOLAGINE V, LEMA R, RABELLOTTI R. Green Foreign Direct Investments and the Deepening of Capabilities for Sustainable Innovation in Multinationals: Insights from Renewable Energy [J] . Journal of Cleaner Production,2021,310: 127381.
- [6] 卢丽文,宋德勇,李小帆.长江经济带城市发展绿色效率 研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(6): 35-42.
- [7] 王靖,杜广杰.中国城市绿色创新空间关联网及其影响效应[J].中国人口·资源与环境,2021,31(5):21-27.
- [8] 曹慧,石宝峰,赵凯.我国省级绿色创新能力评价及实证 [J].管理学报,2016,13(8): 1215-1222.
- [9] 葛世帅,曾刚,胡浩,等.长三角城市群绿色创新能力评价 及空间特征[J].长江流域资源与环境,2021,30(1):1-10.
- [10] 武云亮,钱嘉兢,张廷海.环境规制、绿色技术创新与长 三角经济高质量发展[J].华东经济管理,2021,35(12): 30-42.
- [11] 边明英,俞会新,张迎新.环境规制与交通运输业绿色 创新——高管环保意识的中介作用[J].华东经济管 理,2021,35(8): 11-20.
- [12] 解学梅,韩宇航.本土制造业企业如何在绿色创新中实 现“华丽转型”?——基于注意力基础观的多案例研究 [J].管理 世界,2022,38(3):76-106.
- [13] 刘佳,宋秋月.中国旅游产业绿色创新效率的空间网络 结构与形成机制[J].中国人口·资源与环境, 2018,28 (8): 127-137.
- [14] 吴超,杨树旺,唐鹏程,等.中国重污染行业绿色创新效 率提升模式构建[J].中国人口·资源与环境,2018,28(5): 40-48.
- [15] 许松涛,魏宇琼,董梦园,等.CEO 开放性特征与重污染 行业企业绿色创新[J].华东经济管理, 2022,36(10): 1-13.
- [16] 周力.中国绿色创新的空间计量经济分析[J].资源科 学,2010,32(5):932-939.

-
- [17] 韩晶.中国区域绿色创新效率研究[J].财经问题研究, 2012(11): 130-137.
- [18] 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, 31(2):273-284.
- [19] 孙博文,张友国.中国绿色创新指数的分布动态演进与区域差异[J].数量经济技术经济研究, 2022,39(1): 51-72.
- [20] PENG W,YIN Y,KUANG C,et al. Spatial Spillover Effect of Green Innovation on Economic Development Quality in China: Evidence from a Panel Data of 270 Prefecture-Level and Above Cities [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 69: 102863.
- [21] 王博, 张永忠, 陈灵杉, 等.中国城市绿色创新水平及影响因素贡献度分解[J].科研管理, 2020,41 (8): 123-134.
- [22] 许玉洁, 刘曙光.黄河流域绿色创新效率空间格局演化及其影响因素[J].自然资源学报,2022,37(3):627-644.
- [23] HUANG Y, WANG Y. How Does High-Speed Railway Affect Green Innovation Efficiency? A Perspective of Innovation Factor Mobility [J] . Journal of Cleaner Production, 2020, 265: 121623.
- [24] 康鹏辉, 茹少峰.环境规制的绿色创新双边效应[J].中国人口·资源与环境,2020,30(10):93-104.
- [25] 严翔, 黄永春, 柏建成, 等.长江经济带绿色创新效率的空间关联网络结构及驱动因素[J].北京理工大学学报(社会科学版),2021,23(6):72-83.
- [26] 任耀, 牛冲槐, 牛彤, 等.绿色创新效率的理论模型与实证研究[J].管理世界,2014(7): 176-177.
- [27] 付輶, 卢小丽, 武春友.中国省域绿色创新空间格局演化研究[J].中国软科学, 2016(7):89-99.
- [28] 肖黎明, 张仙鹏.强可持续理念下绿色创新效率与生态福利绩效耦合协调的时空特征[J].自然资源学报, 2019, 34(2): 312-324.
- [29] 崔蓉, 费锦华, 孙亚男.中国省际绿色创新生产率的变动及其空间溢出效应研究[J].宏观经济研究, 2019(6): 132-145.
- [30] FAN J, XIAO Z. Analysis of Spatial Correlation Network of China's Green Innovation [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 299: 126815.
- [31] TIAN X, WANG J. Research on Spatial Correlation in Regional Innovation Spillover in China Based on Patents [J]. Sustainability, 2018, 10(9):3090.
- [32] TAN F, BI J. An Inquiry into Water Transfer Network of the Yangtze River Economic Belt in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 176:288-297.
- [33] 刘华军, 刘传明, 孙亚男.中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究[J].中国工业经济,2015(5): 83-95.

-
- [34] SONG X, GENG Y, DONG H, et al. Social Network Analysis on Industrial Symbiosis: A Case of Gujiao Ecoindustrial Park [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 193:414-423.
- [35] 李敬,陈澍,万广华,等.中国区域经济增长的空间关联 及其解释——基于网络分析方法[J].经济研究, 2014, 49(11):4-16.
- [36] 宋旭光,赵雨涵.中国区域创新空间关联及其影响因素 研究[J].数量经济技术经济研究, 2018,35(7):22-40.
- [37] 唐建荣,李晨瑞,倪攀.长三角城市群创新网络结构及 其驱动因素研究[J].上海经济研究, 2018(11):63-76.
- [38] 邵海琴,王兆峰.中国交通碳排放效率的空间关联网络 结构及其影响因素[J].中国人口 •资源与环境, 2021, 31(4): 32-41.