

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.04.004

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:董淑敏,刘凯.黄河流域绿色创新的空间关联网络及其形成机制研究[J].西安理工大学学报,2024,40(4):482-493.

DONG Shumin, LIU Kai. Spatial correlation network and driving mechanism for green innovation in the Yellow River Basin[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4): 482-493.

黄河流域绿色创新的空间关联网络及其形成机制研究

董淑敏¹, 刘凯^{1, 2}

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358;

2. 山东师范大学 人地协调与绿色发展山东省高校协同创新中心, 山东 济南 250358)

摘要: 为探究黄河流域生态保护与高质量发展路径, 本文以 2005 年至 2020 年绿色专利数据所反映的黄河流域 78 个地级市的绿色创新为研究对象, 在构建绿色创新空间关联矩阵基础上运用社会网络分析法研究空间关联网络的整体网络、个体网络、空间聚类特征, 通过二次指派程序回归法探索空间关联网络的形成机制。研究结果表明: ①黄河流域绿色创新的整体网络结构显著; ②黄河流域绿色创新个体网络的“中心-外围”特征显著, 不同城市在空间关联网络中的地位和作用存在异质性; ③黄河流域绿色创新存在明显的空间聚类现象; ④地理邻接性、经济基础、文化基础的差异与绿色创新空间关联网络的形成呈正相关, 科技投入、环境政策的差异呈负相关。

关键词: 绿色创新; 空间关联网络; 形成机制; 社会网络分析; 二次指派程序回归; 黄河流域

中图分类号: K921/92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2024)04-0482-12

Spatial correlation network and driving mechanism for green innovation in the Yellow River Basin

DONG Shumin¹, LIU Kai^{1, 2}

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China;

2. Collaborative Innovation Center of Human-Nature and Green Development in Universities of Shandong, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: To delve into the trajectory of ecological conservation and the pursuit of high-quality development in the Yellow River Basin, this paper takes the green innovation of 78 cities at prefecture level in the Yellow River Basin reflected by the green patent data from 2005 to 2020 as the research object, and it uses the social network analysis method to study the overall network, individual network and spatial clustering characteristics of spatial correlation network on the basis of constructing the spatial correlation matrix of green innovation. The formation mechanism for spatial association network is explored by quadratic assignment program regression. The results show that: ①The overall green innovation network structure in the Yellow River Basin is of significance. ②The “center-periphery” feature of the green innovation individual network in the Yellow River Basin is of importance, and the status and role of different cities in the spatial correlation network are heterogeneous. ③The green innovation in the Yellow River Basin has an obvious spatial clustering phenomenon. ④The differences of geographical adjacency, economic basis and cultural basis are positively correlated with the formation of green innovation spatial correla-

收稿日期: 2023-05-31; 网络首发日期: 2024-05-20

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20240517.1820.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72004124); 山东省高等学校青创科技支持计划(省优秀青年创新团队)资助项目(2022RW064)

第一作者: 董淑敏, 女, 硕士生, 研究方向为经济地理与环境经济。E-mail: 2022020795@stu.sdnu.edu.cn

通信作者: 刘凯, 男, 博士, 副教授, 研究方向为经济地理、城市地理、环境经济。E-mail: liukaisdnu@163.com

tion network, while the differences of science and technology investment and environmental policy are negatively correlated.

Key words: green innovation; spatial association network; driving mechanism; social network analysis; quadratic assignment program regression; Yellow River Basin

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带^[1],但经济发展方式粗放、水资源开发利用过度、生态环境脆弱等一系列原因导致其可持续发展面临严峻挑战^[2]。随着黄河流域生态保护和高质量发展战略深入实施,围绕这一区域如何实现生态保护和高质量发展产生了一系列重要成果和经验^[3]。绿色创新作为一种融合了“绿色”和“创新”两大发展理念的新型创新方式,逐渐成为全球新一轮产业变革和科技创新的重要竞争领域^[4],对于黄河流域生态保护和高质量发展具有重要推动作用。

目前对绿色创新的研究主要集中在三个方面。一是在绿色创新测度基础上分析其时空特征。已有文献对绿色创新的测度主要采用单一指标和复合指标两种方法,单一指标主要利用绿色专利数据^[5],复合指标包括综合指标体系或投入产出指标体系^[6]。在绿色创新测度基础上,已有文献进一步利用探索性空间数据分析、标准差椭圆等方法研究了绿色创新的时空分布和空间集聚特征^[4]。二是绿色创新的影响因素研究。研究绿色创新的影响因素对于深层次探索绿色创新的机理和规律具有重要作用,已有文献研究了环境规制、产业结构、绿色金融、经济集聚等因素对绿色创新的影响^[7]。三是绿色创新的溢出效应研究,主要分为经济和环境两个方面。经济溢出方面,已有研究发现绿色创新能够显著促进经济增长^[8];环境溢出方面,已有文献既发现绿色创新对环境质量可以带来线性正向影响^[9],也有发现对环境质量的非线性影响^[10]。

通过上述分析发现,已有文献对绿色创新进行了多方面分析和研究,已经取得较为丰硕的成果,对绿色创新政策的制定产生重要影响,也为本研究奠定了良好的基础,但是仍存在部分需要改进和完善之处。从研究内容上看,已有文献主要从静态分布视角对绿色创新的时空格局进行了分析^[6],从要素联系视角对绿色创新空间关联网络研究不够系统和深入;已有文献主要利用空间计量模型分析了绿色创新的影响因素^[6,10],对绿色创新空间关联网络的形成机制需要进一步强化。从研究对象上看,已有文献对于全国和重要区域绿色创新进行了大量探索^[7],而对黄河流域这一国家战略区域的绿色创新研究有待加强。与此同时,已有文献同样基于绿色专利数据对绿色创新的空间关联网络及其形成机制

展开了研究^[11-12],但目前的研究主要集中于省域和城市群尺度,对地级市的研究相对较少,且对影响因素的研究不够全面。因此,本文以黄河流域城市为研究对象,从要素关联视角对绿色创新空间关联网络的整体网络、个体网络、空间聚类特征进行分析,并综合考虑多种影响因素通过二次指派程序(QAP)回归法分析空间关联网络的形成机制,以期丰富和拓展绿色创新空间关联网络的研究内容,并且从空间联系视角为制定黄河流域绿色创新政策提供参考。

本文与已有文献^[11-12]相比的边际贡献表现在三个方面。第一,已有文献对于绿色创新空间关联网络的研究对象分别为黄河流域城市群和全国省域,本文以城市作为研究对象研究黄河流域绿色创新的空间关联网络,拓展了黄河流域绿色创新研究对象的选择范围。第二,已有文献对于黄河流域绿色创新空间关联网络的特征主要从整体网络特征和个体网络特征两个方面展开,本文在此基础上研究了其空间聚类特征,有利于呈现社会网络的整体结构与关系模式,揭示各城市在关联网络中的地位和角色。第三,已有文献主要从距离、经济和科技三个方面选取指标探究绿色创新空间关联网络的形成机制,本文从城市距离、经济基础、科技投入、文化基础、环境政策五个方面选取指标能够从多方面为黄河流域高质量发展提供更具有针对性的政策建议。

1 研究区域和数据

1.1 研究区域

本文以黄河干流流经的省份为主体,考虑到行政单元的完整性以及各省份经济社会发展与黄河流域的关联性,并参考苗长虹和张佰发^[13]、赵林等^[11],以黄河干流流经的8个省区作为基本研究区域,包含青海、甘肃、宁夏、内蒙古(不含赤峰市、通辽市、兴安盟和呼伦贝尔市)、陕西、山西、河南和山东。研究区域总面积为 $2.55 \times 10^6 \text{ km}^2$,包括90个地级市。由于数据的可获得性和完整性,进一步从90个城市中选择78个分析绿色创新空间关联网络及形成机制。

1.2 数据来源

本文研究数据主要分为基础地理信息数据、绿色专利数据和形成机制数据三部分。

1) 基础地理信息数据。本文所应用的黄河流域城市矢量行政边界图根据中国国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)提供的1:400万中国基础地理信息数据进行制作。

2) 绿色专利数据。专利数据是反映某一领域科技创新水平的有效测量指标^[14],并且绿色专利被广泛用于评价绿色创新^[11,15],因此,本文运用绿色专利数据作为衡量绿色创新的指标。按照世界知识产权组织绿色创新的分类标准,参考中国开放数据平台(www.cnopendata.com),通过网络爬虫技术在国家知识产权局专利检索及分析系统(pss-system.cnipa.gov.cn)获取2005年至2020年黄河流域78个地级市的绿色专利数据。该系统全面收集了中国各类专利数据,同时还收录了引文、同族、法律状态等数据信息,囊括了绿色专利数据的所有类型,可以准确反映绿色创新水平。

3) 形成机制数据。本文从城市距离、经济基础、科技投入、文化基础、环境政策五个方面选取指标。

城市之间的距离对城市影响起到基础作用,由Tobler第一定律可知相近的事物关联更紧密^[16],一定程度上城市距离对城市间联系起到决定性影响,城市创新水平的提高依赖于城市之间的交流与合作。

经济为城市绿色创新提供物质基础和资金支持,是影响城市绿色创新的重要力量^[17]。人均地区生产总值是反映经济活动的综合性指标,能够直接刻画出城市经济的发展水平。区域经济增长的重要动力是产业结构升级,第三产业比重是反映产业结构升级的有效指标。城市绿色创新依赖于人均地区生产总值提高以及产业结构升级。

科技投入是用于支持和促进科技发展的资源和资金的投入^[18]。科学技术支出反映了政府对绿色创新的资金支持情况,这一指标越大越有利于提高城市绿色创新水平。RD人员全时当量反映了投入从事拥有自主知识产权的研究开发活动的人力规模,人力规模越大越有利于绿色创新的发展。

文化是社会事业发展水平和文化水平的总称,对城市绿色创新起到调节和保障作用^[4]。在校大学生数量,能够为城市创新的发展提供人才资源和文化氛围,有利于绿色创新水平的提高。公共图书馆藏书量是反映城市文化水平的指标,较高的文化水平有助于为绿色创新活动带来合适的文化氛围。

环境政策对城市绿色创新起到指导和干预作用。环境规制是政府运用行政手段调控企业生产行

为达到保护环境目的的重要手段。根据Porter假设^[19],环境规制可以倒逼企业从事绿色创新产品和技术研发。建成区绿化覆盖率可以反映出各类绿化面积占建成区绿化面积的比例,体现政府对环境保护的支持力度^[20]。

利用GeoDa软件提取地理邻接性数据;利用网络爬虫技术获取各城市政府工作报告中关于“环境保护”“生态文明”的词汇,运用其词频占比表示环境规制水平^[21];其他形成机制数据均来源于中国社会大数据研究平台(<https://data.cnki.net/>)中的《中国城市统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 修正引力模型

使用引力模型衡量空间关联强度是一种常见的方法,主要基于引力的物理概念来描述地理空间上的相互作用。这种模型可以用于分析和量化不同城市之间的相互吸引或排斥关系。使用引力模型衡量空间关联强度,一方面具有直观性、可解释性和预测性;另一方面同时考虑多个因素能够更全面的描述城市之间的关联强度。参考相关文献^[22],使用修正引力模型评价城市之间绿色创新的空间关联强度,具体公式如下:

$$R_{ij} = K_{ij} \frac{P_i P_j}{[D_{ij}/(G_i - G_j)]^2}$$

$$K_{ij} = \frac{P_i}{P_i + P_j} \quad (1)$$

式中: R_{ij} 表示绿色创新的空间关联强度; P_i 、 P_j 分别表示城市*i*和城市*j*绿色专利的数量; G_i 、 G_j 分别表示两个城市的人均地区生产总值; D_{ij} 表示两个城市的距离,本文借鉴孙中瑞等^[23]的做法采用城市间的地理距离。

基于式(1)构建绿色创新的空间二值矩阵 S_{ij} ,并将其作为空间关联网络的数据^[23]。

$$S_{ij} = \begin{cases} 1, & R_{ij} > x^* \\ 0, & R_{ij} \leq x^* \end{cases} \quad (2)$$

式中: x^* 为各行临界值(利用均值表示)。若空间关联强度 R_{ij} 大于临界值 x^* ,则 $S_{ij} = 1$,表明城市*i*与城市*j*存在空间联系;反之,则 $S_{ij} = 0$,表明城市之间不存在空间联系。

2.2 社会网络分析法

社会网络分析法是一种以“关系数据”为基础,通过刻画城市与城市之间的关联特征,从动态的“关系视角”描述空间关联网络结构的分析方法^[22]。这种方法具有较高的科学性,它基于数学和统计方法,

结合了社会科学的理论框架,可以提供对社会结构和人际关系的科学理解。利用该方法对黄河流域绿色创新空间关联网络的分析主要分为三个方面:一是整体网络,包括网络密度、网络关联度、网络等级度和网络效率四个方面;二是个体网络,即对个体的网络中心性进行分析,包括度数中心度和接近中心度两个方面;三是空间聚类分析。

2.2.1 网络密度

网络密度用来反映网络中各城市空间关联的紧密性,是网络中实际存在的关系数与可能存在最大关系数之比^[22]。这一数值越大,表明绿色创新的空间关联越紧密;反之,则越稀疏。计算公式如下:

$$D = \frac{Y}{X(X-1)} \quad (3)$$

式中: D 表示网络密度; X 表示城市数量; $X(X-1)$ 表示网络中可能存在关系数的最大值; Y 表示实际存在的关系数。

2.2.2 网络关联度

网络关联度是用来反映网络结构稳健性的指标^[23],网络关联性越大,说明各城市可以通过直接或间接方式连接起来,网络结构越稳定;反之,则说明越脆弱。网络关联度的计算公式如下:

$$L = 1 - \frac{N}{[X(X-1)/2]} \quad (4)$$

式中: L 表示网络关联度; X 表示城市数量; N 表示网络中不可达的城市对数。

2.2.3 网络等级度和网络效率

网络等级度可以反映城市之间非对称可达的程度^[22],网络等级度越高,说明城市在关联网络中的支配地位越强;反之,则说明支配地位越低。网络效率可以反映空间关联网络输出关系数量,网络效率越高,说明输出关系数越多;反之,则说明网络中输出关系数越少。网络等级度和网络效率的公式如下:

$$H = 1 - \frac{T}{\max(T)} \quad (5)$$

$$L = 1 - \frac{B}{\max(B)} \quad (6)$$

式中: H 表示网络等级度; T 表示网络中对称可达的节点城市数; $\max(T)$ 表示对称可达的节点城市数的最大数; L 表示网络效率; B 表示网络中多余线的总数; $\max(B)$ 表示多余线条数的最大值。

2.2.4 网络中心度

网络中心性表示某一节点对整体网络的“影响力”,由度数中心度和接近中心度构成^[23]。其中,度数中心度用以反映节点在网络中的重要性,这一数值越高说明节点在空间关联网络中越重要。接近中心度

是用于反映某城市与其他城市交流协同程度的指标,接近中心度越高,说明该城市与其他城市联系越密切,在空间关联网络中越能够承担中心行动者角色。

$$D_i = \sum_{j \in N} C_{ij} / (X-1) \quad (7)$$

$$C_i = (X-1) / \sum_{j=1}^N d_{ij} \quad (8)$$

式中:若城市*i*与*j*之间存在空间关联,则 $C_{ij} = 1$,反之为0; X 表示城市数量, d_{ij} 为两节点城市间最短路径的距离。

2.2.5 空间聚类分析

空间聚类分析是社会网络分析中的一种常用算法,通过计算各板块内部城市之间、外部城市之间的输入与输出关系比例,分析各板块在空间关联网络中扮演的角色^[23],主要利用迭代相关收敛法(CONCOR)进行操作。具体来说,CONCOR首先计算出一个矩阵各个行(或列)之间的相关系数,得到一个相关系数矩阵 C_1 。然后把 C_1 作为输入矩阵,继续计算此矩阵的相关系数并构建 C_2 。以此类推,得到由一系列相关系数构建的相关系数矩阵。然后对相关系数矩阵进行对等程度和相似性分析,从而进行板块划分并揭示板块内部结构和溢出路径。

2.3 QAP 回归分析法

QAP回归分析能够检验黄河流域绿色创新关系矩阵与各影响因素关系矩阵之间的相似性,进而评判得到两者矩阵之间的相关性结果^[12],常用于社会网络分析和城市规划等领域,用于探索两个相关关系矩阵之间的结构和模式。它以关系数据为研究对象,基于随机化和比较的原理,对变量间的独立性无严格要求,能够解决传统统计方法在相关矩阵分析中的限制,回归结果相比于常规方法更加稳健。本文被解释变量(绿色创新)和解释变量(人均地区生产总值、第三产业比重、在校大学生数量、公共图书馆藏书量、科学技术支出、RD人员全时当量、环境规制、建成区绿化覆盖率)均具有空间属性,均可以构建空间关系矩阵。因此,本文使用QAP回归分析法研究黄河流域绿色创新空间关联网络的形成机制。具体说明见本文3.2部分。

3 结果分析

专利是指以有利于节约资源、提高能效、防控污染等绿色技术为发明主题的发明、实用新型和外观设计专利。为了更直观地看出黄河流域绿色创新的时空变化特征,本文参考已有文献^[22],利用ArcGIS软件采用自然段点法对研究期内的黄河流域各城市

的绿色专利数量采用相同的分级进行分类。图 1 是 2005 年至 2020 年黄河流域绿色创新水平的空间表

达,根据这一结果进一步对其空间关联网及其形成机制进行分析。

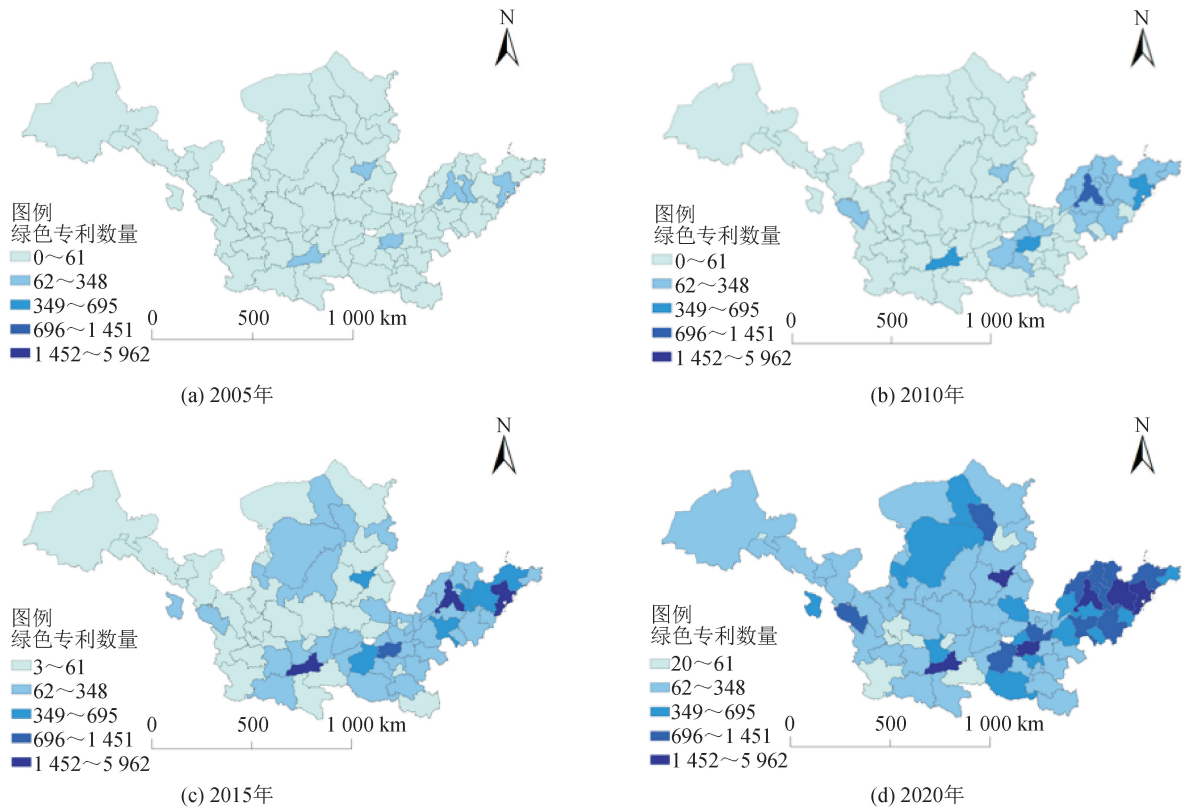


图 1 2005 年至 2020 年黄河流域绿色创新水平的空间表达

Fig. 1 Spatial expression of green innovation level in the Yellow River Basin from 2005 to 2020
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2022)4305 的标准地图制作,底图无修改。

由图 1 可知,黄河流域绿色创新水平呈现逐年提高的现象,且上、中、下游的绿色创新水平存在显著差异,绿色专利数量的均值分别为 81、193 和 414 个,下游地区最高,上游地区最低。可能原因在于,黄河流域中上游地区由于位置、交通等因素导致经济发展相对落后,人才交流受限,创新水平相对较低,但随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略,流域经济不断发展,推动绿色创新水平的提高。下游地区人口密集,交通便利,经济发展水平较高,特别是《山东半岛城市群总体规划》通过之后,下游地区逐渐成为黄河流域的经济中心和龙头带动地区,推动了绿色创新水平的提高。

3.1 空间关联网特征

本文利用修正引力模型和 ArcGIS 软件绘制研究期内绿色创新的空间关联网(图 2)。为了让视觉效果更加清晰直观,参考相关研究^[22],依据适当比例删除引力较小的数值(2005 年至 2020 年分别删除 1.494、60.089、436.461、2790.573 及其以下的数值),并利用 ArcGIS 软件采用自然断点分级法对城市关联强度分为三类,由低到高分别为弱、中、

强。由图 2 可知,黄河流域绿色创新关联强度呈现出明显的网络结构特征和空间分异特征,下游地区空间关联网较为紧密,而上游地区的空间关联强度相对较弱;部分中游和下游城市(如:济南、青岛、郑州、太原等)能够对其邻近和非邻近城市建立较强的关联关系,而上游城市(如:酒泉、张掖、金昌等)几乎不参与绿色创新空间关联网的内部交流。

3.1.1 整体网络分析

在黄河流域绿色创新空间关联强度刻画的基础上,本文利用 Ucinet 软件进一步测算研究区域的整体网络结果,并从网络密度、网络关联度、网络等级度和网络效率四个方面说明其绿色创新的空间关联网特征(图 3)。

从网络密度看,黄河流域绿色创新的网络密度在研究期内整体水平偏低且保持稳定,均值仅为 0.174 8,最大值仅为 0.198 8,说明各城市之间空间联系紧密性仍需进一步加强。从网络关联度看,黄河流域绿色创新的网络关联度在研究期内均值高达 0.937 0,并且呈现波动上升的趋势,由 2005 年的 0.714 3 上升至 2020 年的 1,表明具有较高的可达

性,说明绿色创新空间关联网络具有较高的稳定性。从网络等级度看,2005年至2020年间黄河流域绿色创新的网络等级度一直维持在较低水平,均值为0.0249,数值最高的年份仅为0.1013,说明绿色创新空间关联网络的等级结构模糊,任意两个城市之间几乎对称可达,缺乏具有绝对支配地位的城市。从网络效率看,研究期内黄河流域绿色创新的网络效率处于较高水平并且未出现明显波动,均值高达0.7403,说明城市之间输出关系数量保持较高状态。综合整体网络结果可知,黄河流域绿色创新空间关联网络的整体网络特征显著,具有稳定性和高效率特征,但是紧密性和等级度有待提高。可能原因在于,伴随《关于

构建市场导向的绿色技术创新体系的指导意见》的颁布,绿色创新的发展逐渐受到重视,加上2019年黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略,黄河流域各城市对绿色创新的资金、技术和人力投入越来越大,并且受到全国范围内生态文明建设和环境规制的影响,黄河流域绿色创新水平不断提高,整体网络的稳定性和高效率特征逐渐凸显。但由于黄河缺乏通航能力及流域上游和下游之间交通不便,阻碍流域上下游城市间的交流,上游和下游城市联系程度和其他流域相比明显薄弱,导致空间关联网络的紧密性较低。同时由于流域内缺乏具有绝对影响力和带动能力的城市,致使空间关联网络的等级度不高。

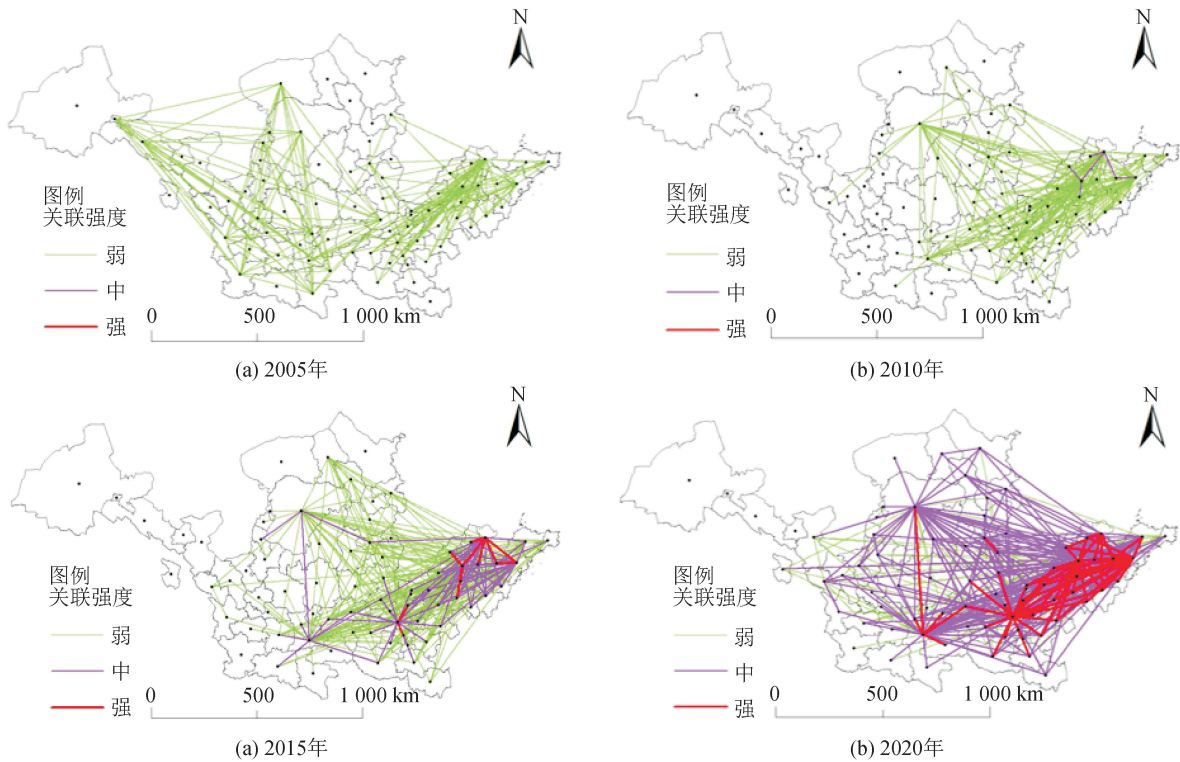


图2 黄河流域绿色创新空间关联网络

Fig. 2 Spatial correlation network of green innovation in Yellow River Basin

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2022)4305的标准地图制作,底图无修改。

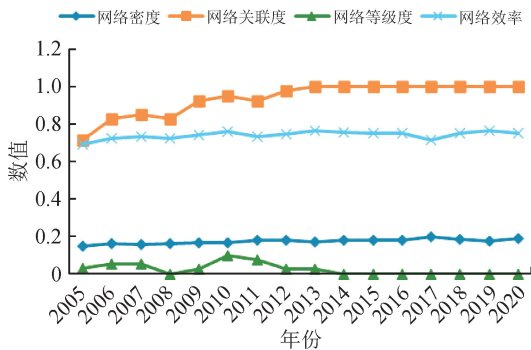


图3 黄河流域绿色创新的整体网络特征

Fig. 3 Overall network results from green innovation in the Yellow River Basin

3.1.2 个体网络分析

整体网络分析仅能反映黄河流域绿色创新空间关联网络的整体面貌,无法对个体节点中心度进行深入探讨。通过个体网络分析能够揭示个体节点在网络中的地位 and 角色,更有利于为城市发展提出针对性建议。为进一步分析黄河流域绿色创新各地级市的网络中心性特征,本文进行个体网络分析。本文利用Ucinet分别计算了各节点的度数中心度和接近中心度,并且利用ArcGIS反映出节点中心度的空间分布(图4)。

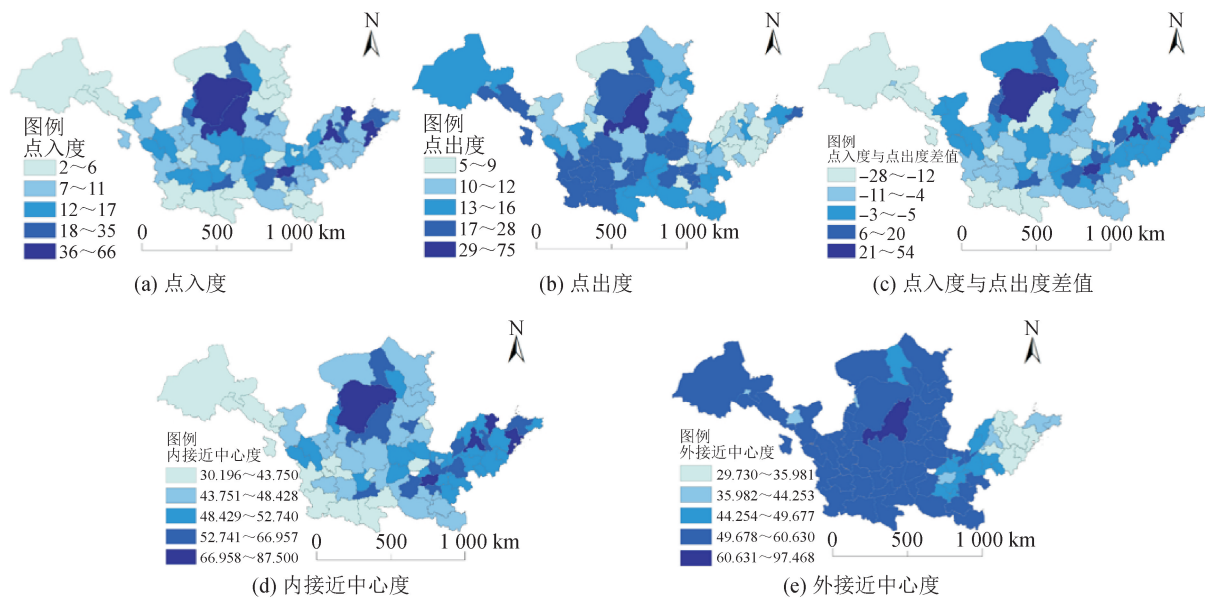


图4 黄河流域绿色创新节点中心度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of centrality of green innovation nodes in the Yellow River Basin
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2022)4305的标准地图制作,底图无修改。

在度数中心度中,点入度和点出度分别表示受到其他城市影响的程度和影响其他城市的能力,如果点入度大于点出度则表现为绿色创新的“输入效应”,反之则表现为“输出效应”^[24]。东营、鄂尔多斯、济南、郑州、青岛等城市的点入度明显高于点出度,表现为输入效应。榆林、铜川、陇南、临汾、天水等城市的点出度大于点入度,表现为“输出效应”。在接近中心度中,内接近中心度是某城市对其他城市的影响能力,外接近中心度是某城市受其他城市的影响程度。东营、鄂尔多斯、济南、青岛、郑州的内接近中心度居于前五位,说明这些城市对黄河流域其他城市绿色创新的影响较大。榆林、铜川、陇南、临汾、天水的外接近中心度位居前五位,说明这些城市的绿色创新易受到其他城市影响。综合个体网络结果可知,黄河流域绿色创新的度数中心度、接近中心度均表现出显著的两级分化现象,个体网络的“中心-外围”特征显著。东营、鄂尔多斯、济南、青岛、郑州处于明显中心地位,可能原因在于:东营和鄂尔多斯的人均GDP多年来稳居全国前十,远高于全国平均水平,是典型的具有高水平人均收入的资源型城市,在转型和绿色发展过程中不断吸引绿色创新要素集聚,从而形成一定的中心地位。青岛、济南、郑州多年来GDP稳居黄河流域城市前三,济南、郑州

是黄河流域经济最发达的省会城市,青岛是黄河流域经济最发达的新一线城市,经济基础雄厚、科技水平高的优势推动这三个城市成为中心城市。榆林、铜川、陇南、临汾、天水成为外围城市,根本原因在于经济发展水平相对较低,交通条件落后,导致绿色创新要素不断流失。

3.1.3 空间聚类分析

为了进一步划分黄河流域绿色创新的类型,运用Ucinet软件CONCOR算法进行空间聚类分析。考虑到CONCOR算法的样本数量限制(要求50以内),本文选择2020年绿色专利数量前50的城市为研究对象。图5是黄河流域绿色创新空间关联网络的板块划分,表1是黄河流域绿色创新空间关联网络板块间联系。由图5和表1知,在全部479条关联关系中,板块内部和板块之间关系数量分别为101条和378条,这说明黄河流域绿色创新空间关联关系以板块间关系为主,板块内部关系有待进一步强化。其中,板块I内部城市之间输出关系系数与输出板块外关系系数均较多,具有“双向输出板块”的特征;板块II输入和输出板块外关系系数均较多,且较为均衡,具有“经纪人板块”的特征,发挥“桥梁”作用;板块III和板块IV的输入关系系数大于输出板块外关系系数,具有“输入板块”的特征。

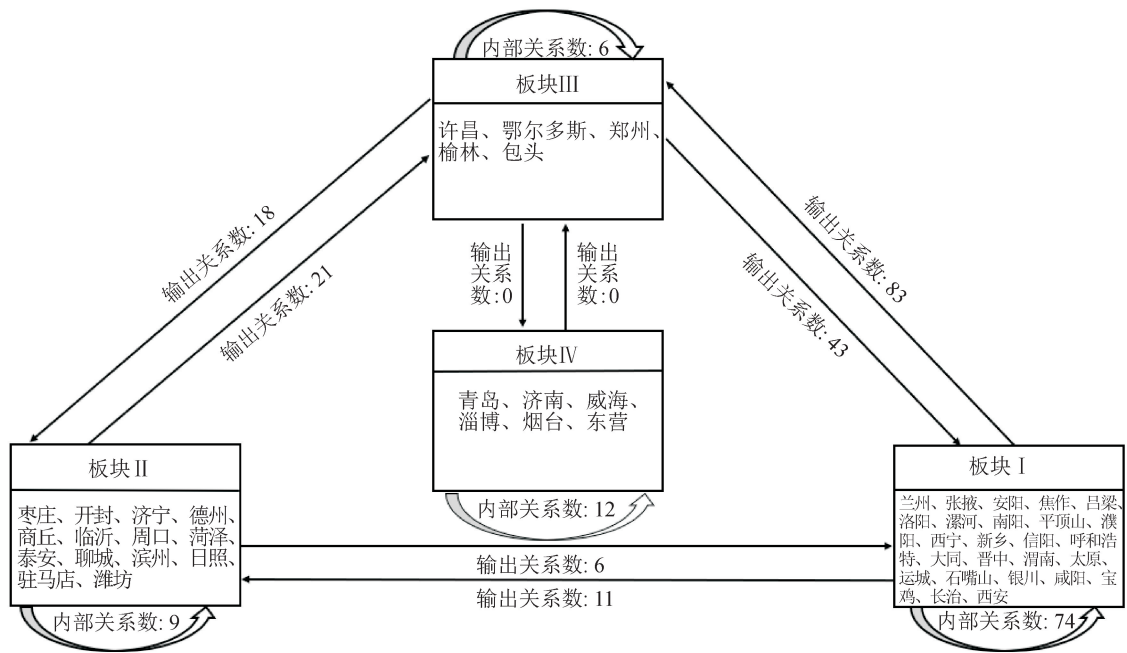


图5 黄河流域绿色创新空间关联网络的板块划分

Fig. 5 Plate division of green innovation spatial correlation Network in Yellow River Basin

表1 黄河流域绿色创新空间关联网络板块间联系

Tab. 1 Green innovation spatial linkage network in Yellow River Basin

板块	输入关系数/条				城数/个	输入板块外 关系数/条	输出板块外 关系数/条	期望内部 关系比例/%	实际内部 关系比例/%
	板块 I	板块 II	板块 III	板块 IV					
I	74	11	83	78	25	50	172	48.98	30.08
II	6	9	21	65	14	81	92	26.53	8.91
III	43	18	6	0	5	104	61	8.16	8.96
IV	1	52	0	12	6	143	53	10.20	18.46

表2 为由各板块网络密度计算的密度矩阵与像矩阵。由表2知,板块 I 和板块 II 的内部关系较为稀疏,板块 III 和板块 IV 的内部关系系数较为紧密;板块 I 和板块 II 主要向板块 III 和板块 IV 产生输出效应,板块 III 和板块 IV 输入效应明显。可见,板块之间的关联关系集中在板块 I 和板块 II 向板块 III 和板块 IV 进行要素流动和输出。

表2 样本城市绿色创新密度矩阵与像矩阵

Tab. 2 Density matrix and image matrix of green innovation in sample cities

板块	密度矩阵				像矩阵			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
I	0.123	0.031	0.664	0.520	0	0	1	1
II	0.017	0.049	0.300	0.774	0	0	1	1
III	0.344	0.257	0.300	0.000	1	1	1	0
IV	0.007	0.619	0.000	0.400	0	1	0	1

根据上述空间聚类分析结果可知,黄河流域绿色创新存在明显的空间聚类现象,空间关联关系多发生在板块之间,集中表现为绿色创新水平较低的板块 I 和板块 II 向水平较高的板块 III 和板块 IV 产生输出效应,板块内部联系有待进一步增强,尤其是板块 II 的内部关系需要加强。可能原因在于,2020 年黄河流域地区生产总值为 2.539×10^{13} 元,其中,黄河流域中下游河南、山东两省地区生产总值占比超过 50%,上游省份仅占 13.11%。流域内部自然地理条件差异显著,中上游地区是我国发展不平衡、不充分问题的突出地区,总体上呈现“下(游)强上(游)弱”的格局,经济发展水平差异显著。一系列地理条件、经济基础、科技投入等因素推动黄河流域绿色创新产生空间聚类现象;板块 I 和板块 II 城市绿色创新水平明显低于板块 III 和板块 IV,当前处于要素向高水平城市集聚阶段,导致板块 I 和板块 II 向板块 III 和板块 IV 产生输出效应。

3.2 形成机制

3.2.1 模型构建与变量说明

已有研究表明绿色创新受到城市距离、经济基础、科技投入、文化基础、环境政策等一系列因素影响^[22-23]。由地理学第一定律可知,相近的事物关联更紧密,绿色创新的空间关联受到城市间距离的影响^[16]。经济为绿色创新提供物质基础^[22],经济发展水平越高,科技投入越大,对绿色创新投入也越大,越有利于绿色创新水平的提高。同时文化能够为绿色创新的发展提供良好的环境氛围^[4],能够对绿色创新起到调节和保障作用。环境政策对绿色创新起到间接推动作用,一方面体现在生态环境通过影响人力资本输出、工作效率、情绪、健康等方式对绿色创新活动产生间接影响;另一方面,根据 Porter 假说环境规制有助于倒逼创新主体开展绿色创新活动^[19]。本文以城市邻接关系表示城市距离^[23],以人均地区生产总值和第三产业比重表示经济基础^[24],以科学技术支出和城市 RD 人员全时当量表示科技投入^[11],以在校大学生数量和公共图书馆藏

书量反映文化基础^[4],以环境规制和建成区绿化覆盖率反映环境政策^[20]。为了避免多重共线的影响而产生误差,本文综合考虑经济、社会、环境等多种因素,构建 QAP 回归方程如下:

$$B_i = f(A, P, I, R, T, S, N, E, G) \quad (9)$$

式中: B_i 表示第*i*年绿色创新的空间关联矩阵; A 表示通过 GeoDa 获得的邻接矩阵,城市间相邻设置为 1,不相邻设置为 0; P 表示城市间人均地区生产总值的差值网络矩阵; I 表示城市间第三产业比重的差值网络矩阵; R 表示城市间 RD 人员全时当量的差值网络矩阵; T 表示城市间科学技术支出的差值网络矩阵; S 表示城市间在校大学生数量的差值网络矩阵; N 表示城市间公共图书馆藏书量的差值网络矩阵; E 表示城市间环境规制的差值网络矩阵; G 表示城市间建成区绿化覆盖率的差值网络矩阵。

3.2.2 QAP 回归结果

通过 Ucinet 软件,选择 6 000 次随机置换,得到 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年黄河流域绿色创新 QAP 回归结果(表 3)。

表 3 黄河流域绿色创新 QAP 回归结果

Tab. 3 QAP regression results from green innovation in Yellow River Basin

变量	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	回归结果	显著性水平	回归结果	显著性水平	回归结果	显著性水平	回归结果	显著性水平
A	0.180 1***	0.000	0.267 9***	0.000	0.274 8***	0.000	0.278 1***	0.000
P	0.314 3***	0.000	0.343 4***	0.000	0.373 1***	0.000	0.383 5***	0.000
I	-0.008 2	0.361	0.036 0*	0.061	0.028 1*	0.100	0.015 5	0.223
R	-0.005 8	0.417	-0.073 6***	0.006	-0.075 7***	0.001	-0.038 3***	0.057
T	0.041 9*	0.075	0.055 8**	0.036	0.041 3	0.109	-0.030 8	0.139
S	0.101 8***	0.003	0.075 2**	0.016	0.036 1	0.126	0.055 9**	0.035
N	0.067 8**	0.018	0.044 7*	0.077	0.102 1***	0.001	0.145 1***	0.000
E	-0.043 2*	0.093	-0.061 2**	0.014	-0.051 4**	0.024	-0.016 2	0.333
G	-0.061 8***	0.002	-0.063 6***	0.003	-0.035 4*	0.081	-0.035 8*	0.062
观测值	6 006		6 006		6 006		6 006	
随机转换次数	6 000		6 000		6 000		6 000	

注:*、**、*** 分别表示在 1%、5%、10% 的水平下显著。

从各因素对绿色创新的影响来看,邻接矩阵回归系数显著为正且通过显著性检验,说明城市越相邻越有利于绿色创新空间关联网络的建立,符合地理学第一定律。人均地区生产总值、在校大学生数量、公共图书馆藏书量的回归系数显著为正且通过显著性检验,说明以人均地区生产总值、在校大学生数量、公共图书馆藏书量为代表的经济和文化基础的差异越大,越有利于形成空间关联网络。可能原

因在于,城市间经济和文化发展水平差异越大,经济和文化发展水平高的城市越容易发挥对其他城市的带动作用 and 示范作用,从而强化了城市间绿色创新联系,有利于绿色创新空间关联网络的形成。

城市 RD 人员全时当量、环境规制、建成区绿化覆盖率的回归系数为负且通过显著性检验,说明以城市 RD 人员全时当量、环境规制、建成区绿化覆盖率为代表的科技投入和环境政策的差异越小,城市

间绿色创新水平空间关联网络的关联程度越大,更利于关联网络的形成。可能原因在于,在科技投入方面,城市间绿色创新的科技投入差异越小,意味着城市间绿色创新水平更为接近,在共同发展目标引导下进一步加强交流合作,进而有利于城市绿色创新空间关联网络的建立。在环境政策方面,城市间环境政策差异越小,说明城市之间的环境质量状态和环境目标越接近,越有利于绿色创新水平空间关联关系的建立。另外,第三产业比重、科学技术支出未通过显著性检验。

4 结论与政策建议

4.1 研究结论

本文以黄河流域 78 个城市为研究对象,利用绿色专利表示城市绿色创新,运用社会网络分析法对其空间关联网络进行分析,进一步通过 QAP 回归方法分析黄河流域绿色创新空间关联网络的形成机制,得出以下研究结论。

1) 黄河流域绿色创新的整体网络结构显著,具有稳定性和高效率特征,但是紧密度和等级度有待提高。

2) 黄河流域绿色创新个体网络“中心-外围”结构特征显著,度数中心度和接近中心度均表现出显著的两级分化现象,各城市在空间关联网络中的地位和作用存在异质性。

3) 黄河流域绿色创新存在明显的空间聚类现象,空间关联关系多发生在不同板块间,板块内部各城市的联系有待进一步增强。

4) 地理邻接性、经济基础、文化基础的差异与黄河流域绿色创新空间关联网络的形成呈正相关;科技投入、环境政策的差异呈负相关。

4.2 政策建议

首先,针对黄河流域绿色创新存在整体网络紧密度较低、等级度不高等问题应该加强黄河流域城市绿色创新交流与合作。一方面,完善上游和下游之间的交通基础设施,促进实体要素流动得到交通保障;另一方面,积极推动流域内部合作平台和机制的建设,建立联合研究中心创新实验室等平台推动不同企业、研发机构和高校之间的合作,为资金、技术、信息等资源的跨城市流动提供保障。

其次,针对黄河流域绿色创新个体网络“中心-外围”结构特征显著的问题应该促进中心城市的引领和带动作用。一是政府可以加大对郑州、济南、青岛等中心城市的支持力度,形成流域内在绿色创新领域具有支配地位的核心,提高空间关联网络等级

度的同时辐射带动全流域绿色创新的发展。二是政府可以制定扶持政策,支持榆林、铜川、陇南等外围城市的绿色创新发展,可以提供技术培训、科研基地建设等支持,提升其创新能力和竞争力。

再次,针对各城市及各板块在黄河流域绿色创新空间关联网络中承担角色不同的问题应当因地制宜出台具有差异化的绿色创新政策。一是要重视郑州、济南、青岛等中下游城市绿色创新水平的提高,积极带动上游地区的城市。二是充分发挥驻马店、开封、枣庄、泰安等城市的中介作用,做好流域内部上中下游城市之间交流的桥梁。

最后,针对黄河流域绿色创新空间关联网络的形成机制,要重视绿色创新的人力和财力支持。一方面,绿色创新属于新型创新活动,需要人才和智力资源的支持,并且城市 RD 人员全时当量差异越小越有利于形成绿色创新空间关联网络,因此当前阶段需要对黄河流域绿色创新进行人力支持。另一方面,科学技术支出理应在绿色创新过程中起到资金支持和保障作用,但是这一因素在黄河流域绿色创新空间关联网络形成过程中没有起到显著影响,因此需要发挥科学技术在绿色创新过程中的作用。

4.3 研究不足与展望

本文以黄河流域绿色创新空间关联网络及其形成机制作为研究对象,有助于为黄河流域生态保护和高质量发展提供参考和借鉴。本文在修正引力模型中仅考虑城市之间的几何距离,在通讯信息技术高速发展的时代,“流”空间的作用愈发明显,今后需要进一步考虑时间距离和经济距离对修正引力模型进行改进。本文进行空间聚类分析时所用 CONCOR 方法对样本数量有严格限制,导致只能选取 50 城市为案例进行研究,不能对所有城市进行分类,影响到研究结果的全面性。今后需要建立新的模型或改进 CONCOR 方法研究绿色创新的空间聚类特征。

参考文献:

- [1] 黄真辉,魏伟,孟慧红. 生态环境-区域经济-公共服务协同影响下的黄河流域旅游高质量发展研究[J]. 西安理工大学学报,2022,38(3):311-326.
HUANG Zhenhui, WEI Wei, MENG Huihong. Research on the high-quality development of tourism in the Yellow River Basin under the synergistic influence of ecological environment, regional economy and public service[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2022, 38(3): 311-326.
- [2] 刘凯. 黄河三角洲生态脆弱型人地系统研究[M]. 北

- 京:人民出版社,2019.
- [3] 艾珂宇,刘昌菊. 黄河流域资源型城市研发投入与经济增长的耦合协调及区域差异——以榆林市为例[J]. 西安理工大学学报,2021,37(3):379-385.
AI Keyu, LIU Changju. Coupling coordination and regional differences between research and development and economic growth of resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, 37(3): 379-385.
- [4] DONG Shumin, XUE Yuting, REN Guixiu, et al. Urban green innovation efficiency in China: spatiotemporal evolution and influencing factors [J]. Land, 2023, 12(1): 75.
- [5] 李青原,肖泽华. 异质性环境规制工具与企业绿色创新激励——来自上市企业绿色专利的证据[J]. 经济研究,2020,55(9):192-208.
LI Qingyuan, XIAO Zehua. Heterogeneous environmental regulation tools and green innovation incentives: evidence from green patents of listed companies [J]. Economic Research Journal, 2020, 55(9): 192-208.
- [6] 彭文斌,苏欣怡,杨胜苏,等. 环境规制视角下城市绿色创新时空演变及溢出效应[J]. 地理科学,2023,43(1):41-49.
PENG Wenbin, SU Xinyi, YANG Shengsu, et al. Spatio-temporal evolution and spillover effects of urban green innovation under environmental regulation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(1): 41-49.
- [7] IRFAN M, RAZZAQ A, SHARIF A, et al. Influence mechanism between green finance and green innovation: exploring regional policy intervention effects in China [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022(182): 121882.
- [8] LI Jiaman, DONG Kangyin, DONG Xiuchen. Green energy as a new determinant of green growth in China: the role of green technological innovation[J]. Energy Economics, 2022(114): 106260.
- [9] ZHANG Minglong, LIU Yin. Influence of digital finance and green technology innovation on China's carbon emission efficiency: empirical analysis based on spatial metrology[J]. Science of the Total Environment, 2022, 838(Part 3): 156463.
- [10] 李凯杰,董丹丹,韩亚峰. 绿色创新的环境绩效研究——基于空间溢出和回弹效应的检验[J]. 中国软科学,2020(7):112-121.
LI Kaijie, DONG Dandan, HAN Yafeng. The analysis on the environmental performance of green innovation: an examination based on spatial spillover effect and rebound effect [J]. China Soft Science, 2020(7): 112-121.
- [11] 赵林,高晓彤,吴殿廷. 黄河流域绿色技术创新空间关联网络结构与影响因素[J]. 人文地理,2023,38(4):102-111.
ZHAO Lin, GAO Xiaotong, WU Dianting. Spatial correlation network and influencing factors of green technology innovation in Yellow River Basin[J]. Human Geography, 2023, 38(4): 102-111.
- [12] 汲中俊,赵林,高晓彤,等. 中国绿色技术创新的空间关联网络结构演变与形成机理[J]. 山西师范大学学报(自然科学版),2023,37(3):79-89.
JI Zhongjun, ZHAO Lin, CAO Xiaotong, et al. Structural evolution and formation mechanism of spatial correlation network of green technology innovation in China[J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2023, 37(3): 79-89.
- [13] 苗长虹,张佰发. 黄河流域高质量发展分区分级分类调控策略研究[J]. 经济地理,2021,41(10):143-153.
MIAO Changhong, ZHANG Baifa. Regulation strategy of zoning-gradation-classification for high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Economic Geography, 2021, 41(10): 143-153.
- [14] HUANG H C, SU H N. The innovative fulcrums of technological interdisciplinarity: an analysis of technology fields in patents[J]. Technovation, 2019(84/85): 59-70.
- [15] WANG Bo, XU Lin, CHEN Lingshan. Factors affecting green innovation: an analysis of patent and regional heterogeneity[J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2021, 19(1): 12-21.
- [16] TOBLER W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46: 234-240.
- [17] 邝嫦娥,文泽宙,彭文斌. 影子经济影响绿色创新效率的门槛效应[J]. 经济地理,2019,39(7):184-193.
KUANG Chang'e, WEN Zezhou, PENG Wenbin. Threshold effect of shadow economic impact on green innovation efficiency [J]. Economic Geography, 2019, 39(7): 184-193.
- [18] 王洪庆,郝雯雯. 高新技术产业集聚对我国绿色创新效率的影响研究[J]. 中国软科学,2022,380(8):172-183.
WANG Hongqing, HE Wenwen. Impact of high-tech industrial agglomeration on the efficiency of green innovation in China[J]. China Soft Science, 2022,380(8):172-183.
- [19] PORTER M E, VAN DER LINDE C. Toward a new conception of the environment-competitiveness rela-

- tionship [J]. *Journal of Economic Perspectives*, 1995, 9(4): 97-118.
- [20] LIU Kai, XUE Yuting, CHEN Zhongfei, et al. The spatiotemporal evolution and influencing factors of urban green innovation in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 857(Part 1): 159426.
- [21] 邓慧慧,杨露鑫. 雾霾治理、地方竞争与工业绿色转型[J]. *中国工业经济*, 2019(10):118-136.
DENG Huihui, YANG Luxin. Haze governance, local competition and industrial green transformation [J]. *China Industrial Economics*, 2019 (10): 118-136.
- [22] 张明斗,翁爱华. 长江经济带城市水资源利用效率的空间关联网络及形成机制[J]. *地理学报*, 2022, 77(9):2353-2373.
ZHANG Mingdou, WENG Aihua. Spatial correlation network and its formation mechanism of urban water utilization efficiency in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2353-2373.
- [23] 孙中瑞,樊杰,孙勇,等. 中国绿色科技创新效率空间关联网络结构特征及影响因素[J]. *经济地理*, 2022, 42(3):33-43.
SUN Zhongrui, FAN Jie, SUN Yong, et al. Structural characteristics and influencing factors of spatial correlation network of green science and technology innovation efficiency in China[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(3): 33-43.
- [24] 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.
LIU Jia, SONG Qiuyue. Space network structure and formation mechanism of green innovation efficiency of tourism industry in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(8): 127-137.

(责任编辑 王绪迪)