

# 科技创新对生态环境影响的空间效应

王晓东, 何刚, 侯小宇

(安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** [目的] 探究地理空间约束下科技创新对生态环境的影响效应, 为推动生态环境保护提供理论依据和政策启示。[方法] 基于安徽省 16 个地级市 2011—2020 年面板数据, 利用 ArcGIS, Geoda, Stata 15.1 软件, 采用探索性空间数据分析法、空间计量模型, 在全域和局域尺度上探究科技创新对生态环境的空间关联与影响效应。[结果] ①安徽省生态环境质量和科技创新水平逐年稳步增长, 生态环境呈现“皖南高, 皖中居中, 皖北低”的空间特征, 科技创新产生以合肥和芜湖为首的领域辐射效应。②科技创新对生态环境的影响在皖南地区表现为负向效应, 在皖中和皖北地区显示出正向的直接效应和空间溢出效应。③从安徽省全域上看科技创新要素对生态环境的影响程度排序为: 科技创新环境 > 科技创新产出 > 科技创新投入, 但不同区域具有异质性特征。[结论] 开展生态环境保护需要因地制宜, 确定各地区科技创新和生态环境保护的方向和重点, 突出地方优势, 发挥领域辐射作用。

**关键词:** 生态环境; 科技创新; 空间效应; 空间计量模型; 安徽省

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)02-0319-11

**中图分类号:** F124.3

**文献参数:** 王晓东, 何刚, 侯小宇. 科技创新对生态环境影响的空间效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 319-329. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.037; Wang Xiaodong, He Gang, Hou Xiaoyu. Spatial effects of technology innovation on ecological environment [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 319-329.

## Spatial Effects of Technology Innovation on Ecological Environment

Wang Xiaodong, He Gang, Hou Xiaoyu

(College of Economic and Management, Anhui University Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of science and technology innovation on the ecological environment under geospatial constraints were studied in order to provide a theoretical basis and policy inspiration to promote ecological environmental protection. [Methods] We used survey data from 16 prefecture-level cities in Anhui Province from 2011 to 2020 with ArcGIS, Geoda, and Stata15.1 software along with an exploratory spatial data analysis method and a spatial measurement model to investigate the spatial correlation and influence effect of science and technology innovation on the ecological environment at the global and local scales. [Results] ① The ecological environmental quality and the level of science and technology innovation in Anhui Province have been steadily increasing each year. The ecological environment showed the spatial characteristics of “high in Southern Anhui Province, medium in Central Anhui Province, and low in Northern Anhui Province”. Science and technology innovation radiated most from Hefei and Wuhu City. ② The impact of science and technology innovation on the ecological environment showed a negative effect in Southern Anhui Province, and a direct positive effect and spatial spillover effect in Central and Northern Anhui Province. ③ From the perspective of Anhui Province as a whole, the degree of influence of science and technology innovation elements on the ecological environment followed the order of science and technology innovation environment > science and technology innovation output > science and technology innovation input, but

收稿日期: 2022-07-09

修回日期: 2022-09-07

**资助项目:** 国家自然科学基金项目“淮河流域水生生态风险时空演化、预警及动态响应机制研究”(72271005); 教育部人文社科规划基金项目“淮河流域生态补偿优先级评估、额度测算及跨区域实现机制研究”(22YJAZH025)

**第一作者:** 王晓东(1998—), 女(汉族), 安徽省六安市人, 硕士生, 研究方向为生态环境评价与管理。Email: 15055402109@163.com。

**通讯作者:** 何刚(1966—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为生态环境评价与管理。Email: hgang0111@163.com。

with heterogeneous characteristics in different regions. [Conclusion] To carry out ecological environmental protection, it will be necessary to adjust measures to local conditions, determine the direction and focus of scientific and technological innovation and ecological environmental protection in various regions, highlight local advantages, and give attention to the role of radiation in the field.

**Keywords:** regional ecological environment; technological innovation; spatial effect; spatial econometric model

创新是促进经济发展和民生改善的第一动力,生态环境直接影响着文明的兴衰演替。改革开放以来中国经济发展迅速,以粗放型为主的发展方式带来了大量的环境污染和资源供给矛盾。绿色的生产和生活方式逐渐成为了新时代人民的追求。2018 年全国生态环境保护大会深化了对生态环境保护的认识。2020 年中央政府《关于构建现代环境治理体系的指导意见》中指出要通过科技创新推行清洁生产,减少污染排放。有效的科技创新能够推动企业技术和生产模式改革升级,提高资源利用效率和要素生产率,进行更多的环保型产品研发并提供环境友好服务。“十四五”时期我们更要完善科技创新导向制度,坚决打赢蓝天、碧水、净土保卫战。在此背景下,探讨科技创新对生态环境的影响效果和作用机理具有重要的现实意义。科技创新与生态环境保护的重要性日益凸显,亦受学者们重视。近年来关于科技创新和生态环境关系的研究集中于两个方面:科技创新与生态环境的相互作用。国内学者多基于耦合协调度模型研究中国省域生态环境与科技创新的协调发展情况,但研究结论却不尽相同,例如郭爱君等<sup>[1]</sup>研究发现中国各个省域科技创新水平、生态优化水平及两者协调度均呈现波动上升趋势,区域间差距不断扩大;向丽<sup>[2]</sup>研究发现科技创新和生态环境的协调发展度总体偏低且变化平稳,科技创新明显滞后于生态环境;谷缙等<sup>[3]</sup>认为生态文明建设逐步落后于科技创新。科技创新对生态环境的单向驱动作用。一些学者研究发现科技创新对生态环境的影响具有不确定性,如谢波等<sup>[4]</sup>认为二者存在 U 形的非线性关系;潘明明等<sup>[5]</sup>利用面板门槛效应模型研究发现弱市场分割地区科技创新推动绿色生态效率,强市场分割地区作用则相反。一些学者认为科技创新正向驱动生态环境,韩政等<sup>[6]</sup>构建面板回归模型发现科技创新通过技术、专利制度等路径对产业生态化产生正向效应;侯纯光等<sup>[7]</sup>认为科技创新通过资源利用效应、人力资本效应等途径对区域绿色化产生显著正向驱动作用;辛晓华等<sup>[8]</sup>发现科技创新能够抑制环境污染。以上研究为该区科技创新对该地区生态环境的影响,但科技创新具有外溢性,这意味着一个区域的创新行为会对其他区域的生态环境产生影响,在此方面,陈超凡

等<sup>[9]</sup>运用空间计量模型研究发现创新对生态效率的空间溢出效应强弱与地理距离有关;王芳等<sup>[10]</sup>表明科技创新带来的溢出效应有助于邻近地区生态环境质量的改善。

综上所述,以往关于科技创新与生态环境关系的研究大多基于全国及省域层面,研究尺度较为宏观,较多文献仅研究科技创新对当地生态环境的作用,忽略对邻近地区的影响研究。基于此,本文以安徽省地级市为研究单元,精确研究科技创新对该区和邻近地区生态环境的作用效果,主要贡献包括:①利用 GIS 空间分析法和莫兰指数刻画科技创新和生态环境的时空演变规律和空间聚集情况,初步分析两者的空间关联性;②分别以科技创新总水平、科技创新构成要素(科技创新投入、科技创新产出和科技创新环境)为解释变量进行空间计量分析,探究科技创新对生态环境的影响和其作用路径。

## 1 研究方法和模型选择

### 1.1 熵权 TOPSIS 法

熵权 TOPSIS 法利用熵权法确定指标权重,通过 TOPSIS 法(逼近理想解排序法)计算评价对象与最优和最劣方案的距离,获得评估对象与最优方案的相对贴近程度,实现对评价对象的客观排序<sup>[11]</sup>。本研究利用熵权 TOPSIS 法计算安徽省城市生态环境质量和科技创新水平,具有客观性和合理性。设  $t$  表示年份, $i$  为城市, $j$  表示指标,计算过程为:

(1) 数据标准化处理:

$$x_{ijt} = \begin{cases} \frac{a_{ijt} - \min\{a_j\}}{\max\{a_j\} - \min\{a_j\}} & (a_{ijt} \text{ 为正向指标时}) \\ \frac{\max\{a_j\} - a_{ijt}}{\max\{a_j\} - \min\{a_j\}} & (a_{ijt} \text{ 为逆向指标时}) \end{cases} \quad (1)$$

$(i = 1, 2 \cdots n; j = 1, 2 \cdots m; t = 1, 2 \cdots k)$

式中: $a_{ijt}$  表示  $i$  城市的  $j$  指标在  $t$  年份的数值; $x_{ijt}$  为  $a_{ijt}$  的标准化; $\min\{a_j\}, \max\{a_j\}$  表示指标  $j$  的最小值和最大值。

(2) 计算第  $j$  项指标的熵值  $e_j$ :

$$P_{ijt} = \frac{x_{ijt}}{\sum_i \sum_t x_{ijt}} \quad (2)$$

$(i = 1, 2 \cdots n; j = 1, 2 \cdots m; t = 1, 2 \cdots k)$

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n \times k)} \sum_i \sum_t P_{ijt} \ln P_{ijt} \quad (j=1, 2 \cdots m) \quad (3)$$

式中: $P_{ijt}$ 表示 $x_{ijt}$ 在指标 $j$ 的数值总和和中占的比重。

(3) 计算各项指标权重  $w_j$ :

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_j (1 - e_j)} \quad (j=1, 2 \cdots m) \quad (4)$$

(4) 计算加权标准化矩阵  $R$ :

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (r_{ij} = w_j x_{ijt}) \quad (5)$$

(5) 确定正理想解  $S_j^+$  和负理想解  $S_j^-$ :

$$S_j^+ = \max(r_{1j}, r_{1j} \cdots r_{ij}),$$
$$S_j^- = \min(r_{1j}, r_{1j} \cdots r_{ij}) \quad (6)$$

(6) 计算各评价对象与正、负理想点的欧氏距离  $D_j^+, D_j^-$ :

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (S_j^+ - r_{ij})^2}, \quad D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (S_j^- - r_{ij})^2} \quad (7)$$

(7) 计算各评价对象的综合指数(即生态环境质量和科技创新水平):

$$\text{eco}_{it} / \text{tec}_{it} = \frac{D_j^-}{(D_j^+ + D_j^-)} \quad (8)$$

式中: $\text{eco}_{it} / \text{tec}_{it} \in [0, 1]$ , 其值越大, 表明生态环境质量越好, 科技创新水平越高。

1.2 探索性空间数据分析法

探索性空间数据分析法(ESDA)用于检测研究对象的空间关联与溢出性, 通常用莫兰指数(Moran's  $I$ )测度。该指数表示:任何事物均有相关性, 离得较近的事物总比离得较远的事物相关性要高<sup>[12]</sup>。本文利用全局莫兰指数判断安徽省全域科技创新与生态环境的分布特征, 通过局部双变量莫兰指数进一步探究安徽省 16 个地级市科技创新与生态环境的空间关联性<sup>[8]</sup>。

1.2.1 全局空间自相关 全局单变量 Moran's  $I$  能够对安徽省生态环境以及科技创新在空间上的聚集态势进行描述; 全局双变量 Moran's  $I$  值探索了生态环境和科技创新的空间关联特征。二者均用于分析安徽省全域要素空间关联和空间差异程度, 计算公式为:

$$I_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S_1^2 S_0} \quad (9)$$

$$I_2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{Y})}{S_2^2 S_0} \quad (10)$$

式中: $I_1$  为全局单变量 Moran's  $I$ ;  $I_2$  为全局双变量 Moran's  $I$ ;  $N$  为城市总数;  $X_i, X_j$  为城市  $i$  和  $j$  的研究变量观察值;  $\bar{X}, \bar{Y}$  为研究变量的均值;  $W_{ij}$  为城市  $i$  和  $j$  的空间权重矩阵;  $S_1^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2, S_2^2$

$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{Y})^2$  是变量的方差,  $S_0 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}$  表示所有变量的权重和; 选择 0~1 邻接权重矩阵体现区域地理因素的影响:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & (i \neq j) \\ 0 & (i = j) \end{cases} \quad (11)$$

1.2.2 局部双变量空间自相关 全局双变量 Moran's  $I$  为安徽省全域估计结果, 为探索城市  $i$  的科技创新与城市  $j$  的生态环境之间的局部关联, 需进一步选择局部双变量 Moran's  $I$  来衡量, 表达式为:

$$I_3 = Z_i \sum_{i=1}^N W_{ij} Z_j \quad (12)$$

式中: $Z_i, Z_j$  分别为城市  $i, j$  观察值的标准化值。

1.3 空间计量模型

空间计量模型用于解决空间依赖和异质性问题, 包括空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM)。

(1) 空间滞后模型。模型中纳入被解释变量的空间滞后项, 度量邻近城市生态环境对本城市生态环境的影响, 回归模型为:

$$\text{lneco}_{i,t} = \rho \sum_{i=1}^n W_{i,j} \text{lneco}_{i,t} + \beta_1 \text{Intec}_{i,t} + \sum_{n=2}^k \beta_n \ln X_{i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (13)$$

(2) 空间误差模型。模型中纳入解释变量的空间误差项, 考虑解释变量随机误差项对生态环境的影响, 回归模型为:

$$\text{lneco}_{i,t} = \beta_1 \text{Intec}_{i,t} + \sum_{n=2}^k \beta_n \ln X_{i,t} + c + \mu_{i,t}$$
$$\mu_{i,t} = \lambda \sum_{i=1}^n W_{i,j} \mu_{i,t} + \epsilon_{i,t} \quad (14)$$

(3) 空间杜宾模型。综合考虑空间滞后和空间误差项, 回归模型为:

$$\text{lneco}_{i,t} = \rho \sum_{i=1}^n W_{i,j} \text{lneco}_{i,t} + \beta_1 \text{Intec}_{i,t} + \sum_{n=2}^k \beta_n \ln X_{i,t} + \delta_1 \sum_{i=1}^n W_{i,j} \text{Intec}_{i,t} + \sum_{n=2}^k \sum_{n=2}^k \delta_n W_{i,j} \ln X_{i,t} + c + \epsilon_{i,t} \quad (15)$$

式中: $\text{eco}_{i,t}$ 表示城市  $i$  在  $t$  时期的被解释变量, 即生态环境质量; 科技创新( $\text{tec}$ )为核心解释变量;  $X_{i,t}$  为控制变量;  $\rho$  为空间自回归滞后系数;  $\lambda$  为空间误差系数;  $\beta$  为解释变量对被解释变量的影响程度;  $\delta$  为邻近地区解释变量的影响程度;  $c$  为常数项;  $\mu_{i,t}, \epsilon_{i,t}$  为随机误差向量。

2 变量选取与数据说明

2.1 被解释变量

生态环境质量( $\text{eco}$ )。PSR(压力—状态—响应)

是环境质量评价学科中一种常见模型,能够客观反映人类活动、社会经济与自然环境之间的制约与依存关系。压力因子表征人类经济和社会活动给生态造成的破坏和扰动;状态因子表征特定时期自然资源与环境所处的状况;响应因子体现人类为提高生态环境质量而采取的各种环境保护措施。本文在借鉴张崇森等<sup>[13]</sup>、金辉等<sup>[14]</sup>研究基础上,结合安徽省生态实际状况,在压力和状态层面,从水、土、大气、声音、能源

消耗等方面较为全面地衡量生态环境质量。生态保护和污染防治密不可分,因此在生态响应层面主要从工业污染防治、污水治理、垃圾处理 and 绿化举措 4 个方面选取指标。

另外,采用相对指标衡量生态环境质量,避免了绝对指标极大或极小对结果造成的偏差。本文科技创新和控制变量的指标同样选取相对指标。生态环境质量评价体系详见表 1。

表 1 生态环境质量评价指标体系  
Table 1 Ecological environmental quality evaluation index system

准则层	指标层	指标解释	指标属性	权重/%
生态压力 P	人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	人口承载压力	—	2.17
	人均用水量(m <sup>3</sup> /人)	水资源压力	—	3.30
	单位 GDP 能耗(标准煤/万元)	能源消耗压力	—	1.44
	单位 GDP 电耗(kW·h/元)	电力消耗压力	—	4.34
	单位 GDP 工业废水排放量(t/万元)	水质量压力	—	1.58
	单位 GDP 工业二氧化硫排放量(t/亿元)	大气质量压力	—	1.93
	单位 GDP 工业烟粉尘排放量(t/万元)	固体废物排放压力	—	2.63
	单位土地化肥施用量/(t·hm <sup>-2</sup> )	土地污染压力	—	0.87
生态状态 S	建成区绿化覆盖率/%	城镇绿化状态	+	2.11
	人均水资源拥有量(m <sup>3</sup> /人)	水资源状态	+	33.73
	城市道路交通噪声均值(分贝)	噪声状态	—	4.35
	人均公园绿地面积(m <sup>2</sup> /人)	居民生活状态	+	2.82
	PM <sub>2.5</sub> 浓度/(μg·m <sup>-3</sup> )	空气质量状态	—	8.33
生态响应 R	一般工业固体废物综合利用率/%	工业污染防治	+	6.95
	污水处理厂集中处理率/%	污水治理	+	1.29
	城市生活垃圾无害化处理率/%	垃圾处理	+	1.27
	人均造林面积(hm <sup>2</sup> /万人)	绿化举措	+	20.89

2.2 核心解释变量

科技创新(tec)。借鉴贾洪文等<sup>[15]</sup>、曹佳蕾等<sup>[16]</sup>的研究,从科技创新的投入、产出及环境 3 个层面构建评价指标体系。科技创新投入是基础和必要条件,从人、财、物三方面选取了 4 个指标;科技创新产出是成果,主要包括知识产出以及市场商业化程度层面,选取了 3 个指标来衡量,其中,“专利”的度量参考白俊红等<sup>[17]</sup>的研究,根据发明、实用新型和外观设计的创新程度高低分别赋予 0.5,0.3,0.2 的权重,与专利授权量线性加权得到最终的专利考核指标;创新环境是指人类社会为了实现科技创新所创造的环境,主要是基础设施环境,本文从高科技企业、创新型人才、知识文化设施、信息化水平和交通便利程度 4 个方面选取指标。科技创新能力评价指标情况详见表 2。

2.3 控制变量

控制变量(X)。生态环境质量受多方面因素影响,为尽可能缓解遗漏变量带来的误差,控制这些因

素对生态环境的影响,本研究参考生态环境质量影响因素的相关研究<sup>[18-20]</sup>选取 4 个控制变量:①外商直接投资(fdi)。考虑汇率影响,将外商直接投资额按照当年平均汇率转化为人民币进行调整,以外商直接投资占 GDP 比重衡量该控制变量;②城镇化(ur)。从人口角度选取年末城镇人口比重呈现;③产业结构升级(utis)。采用第三产业产值和第二产业产值的比重来衡量;④环境规制(reg)。从环境污染治理投资角度,考虑数据的可获得性,选取地方财政环境保护支出占国内生产总值(GDP)比重计算得出。

2.4 数据来源

上述指标值原始数据来源于《安徽统计年鉴》《安徽科技统计公报》《中国城市统计年鉴》《中国统计摘要》。涉及生产总值的计算,以 2010 年为不变价计算实际值,便于各年间指标的相互比较。PM 2.5 浓度数据来源于达尔豪斯大学大气成分分析组([http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page\\_id=140](http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140)),经过栅格处理,匹配矢量地图后的浓度数据。



表 2 科技创新能力评价指标体系

Table 2 Science and technology innovation ability evaluation index system

准则层	指标层	指标说明	指标属性	权重/%
科技创新投入	万人 R & D 人员全时当量/(万人·a <sup>-1</sup> )	科研人力工作投入	+	10.49
	政府财政科技投入占 GDP 比重/%	财政科技支撑力度	+	7.41
	R & D 经费内部支出占 GDP 比重/%	科研经费投入强度	+	6.82
	财政教育支出占 GDP 比重/%	教育投入强度	+	4.50
科技创新产出	万人专利申请授权量(项/万人)	知识产出	+	9.07
	规模以上工业企业新产品销售收入占主营业务收入比重/%	商业化水平	+	6.83
	高新技术产业增加值占 GDP 比重/%	商业化水平	+	6.67
	高新技术企业占规上工业企业数/%	高科技企业	+	10.19
科技创新环境	万人普通高等院校在校学生数/人	创新型人才	+	11.17
	每百人公共图书馆藏书量/(册、件)	知识文化设施	+	7.93
	固定、移动和互联网用户数/常住人口数/户	信息化水平	+	13.84
	人均城市道路面积(m <sup>2</sup> /人)	交通便利程度	+	4.97

3 实证分析

3.1 生态环境和科技创新的时空特征

3.1.1 生态环境和科技创新的时序演变特征 安徽省 16 个地级市按照地理位置划分为皖南、皖中和皖北地区,计算区域生态环境质量及科技创新水平,绘制 2011—2020 年安徽省区域生态环境和科技创新时间变化趋势(图 1—2)。

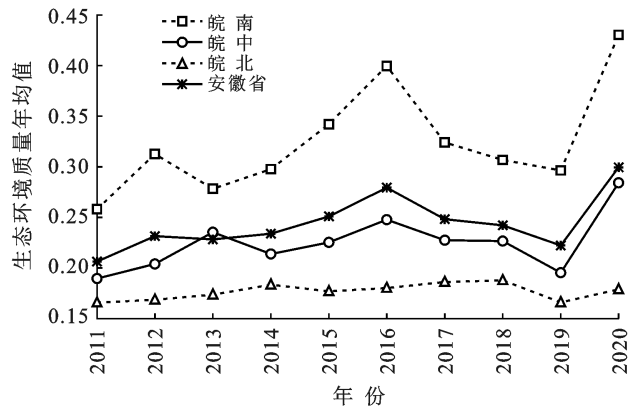


图 1 安徽省 2011—2020 年区域生态环境质量时间变动趋势

Fig.1 Time variation trend of regional ecological environment quality in Anhui Province from 2011 to 2020

结果显示,2011—2020 年安徽省全域以及皖南、皖中和皖北局域生态环境质量和科技创新水平整体稳步增长,科技创新增长速度高于生态环境。生态环境质量方面,皖南最优,皖中次之,皖北较差。皖南地区生态环境质量波动最大,皖北地区保持平稳态势,与何刚等<sup>[21]</sup>的结论相似。科技创新方面,皖北地区明显落后皖南和皖中地区,且增长速率最低。2011—2015 年皖南地区科技创新水平高于皖中,2015—

2020 年皖中地区后来居上,与皖南地区水平相当,且有逐渐赶超趋势,这可能得益于皖中地区合肥科技创新能力的拉动。造成上述现象的原因可能为:皖北 6 市中淮南、淮北、宿州、亳州,以及阜阳市的颍上县均属于资源型城市<sup>[22]</sup>,采矿业、制造业等第二产业丰富,高新技术企业较少,科技创新水平较低,能源开采和工业化发展造成了环境破坏。皖南地区自然资源优越,以发展旅游业为主,如黄山、九华山、天目山等均位于皖南地区,山林密集,生态环境好。综合安徽省区域生态环境和科技创新的时间演变特征,可以看出二者具有一定的相似性。

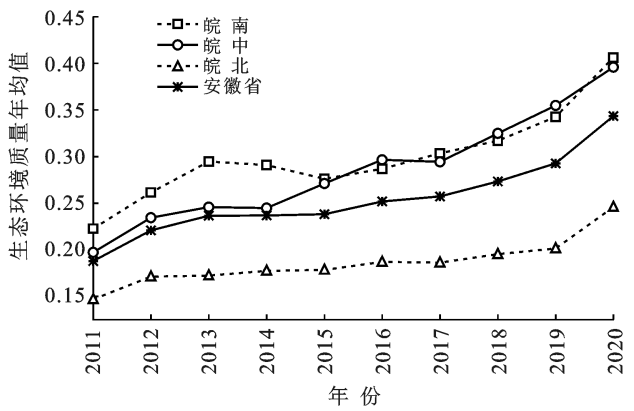


图 2 安徽省 2011—2020 年区域科技创新水平时间变动趋势

Fig.2 Time variation trend of regional science and technology innovation level in Anhui Province from 2011 to 2020

3.1.2 生态环境和科技创新的空间格局特征 参考相关研究<sup>[14,23]</sup>,结合安徽省生态环境和科技创新实际情况,将二者划分为 5 个等级(表 3)。采用 ArcGIS 软件绘制安徽省生态环境和科技创新空间格局分布图,并取 2011,2016 和 2020 年可视化(图 3—4)。从

生态环境空间格局来看,处于安徽省“U”形位置的边界城市生态环境好,并以相互毗邻的黄山、池州和宣城 3 个城市为代表,这可能是因其与生态环境较好的江苏省和浙江省毗邻,空间溢出效应产生作用。从科技创新空间分布看,以合肥和芜湖为创新发展之首,铜陵和马鞍山为次,产生辐射效应,带动其周边城

市科技创新能力的增强。皖北地区科技创新水平较差且提升效果不明显,至 2020 年阜阳市和宿州市科技创新水平仍然处于风险状态(I)。综上分析发现,安徽省生态环境和科技创新均呈现出领域辐射效应,可以初步判断生态环境和科技创新具有一定的空间聚集和空间溢出特征。

表 3 区域生态环境质量及科技创新水平分级标准

评价等级	风险(Ⅰ)	敏感(Ⅱ)	一般(Ⅲ)	良好(Ⅳ)	理想(Ⅴ)
区 间	$[0,0.2)$	$[0.2,0.4)$	$[0.4,0.6)$	$[0.6,0.8)$	$[0.8,1]$

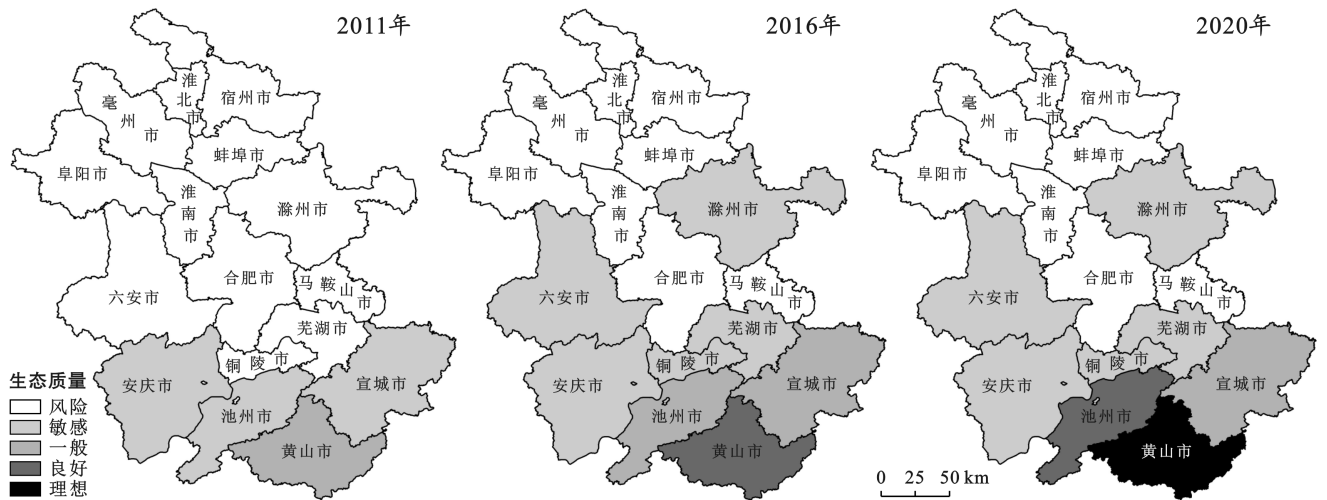


图 3 安徽省 2011、2016 和 2020 年生态环境质量空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution pattern of ecological environment quality in Anhui Province in 2011, 2016 and 2020

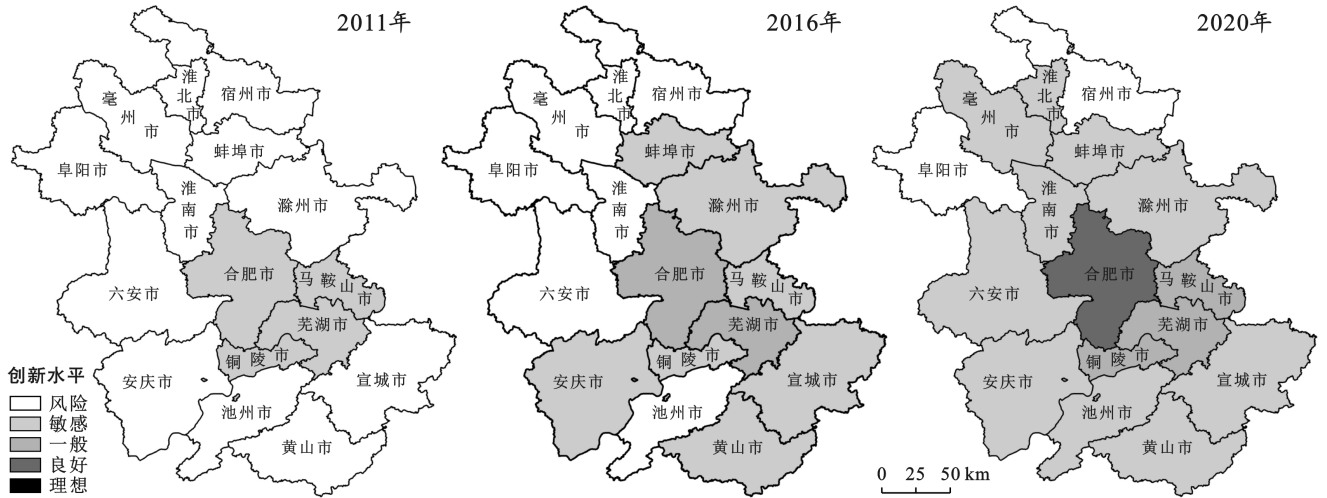


图 4 安徽省 2011、2016 和 2020 年科技创新水平空间分布格局

Fig.4 Spatial distribution pattern of technological innovation level in Anhui Province in 2011, 2016 and 2020

3.1.3 生态环境和科技创新的空间关联特征 图 3 和图 4 分别表征生态环境和科技创新的空间分布态势,为进一步揭示二者的空间关联与聚集程度,引入空间自相关分析方法,使用 Geoda 软件测算 2011—2020 年安徽省全域科技创新莫兰指数、生态环境莫

兰指数、科技创新和生态环境双变量莫兰指数(表 4)。全局双变量 Moran’s  $I$  表征要素间作用的整体效果,为明晰科技创新对周边城市生态环境的带动效果,本文以 2020 年为例,构建局部双变量莫兰指数,绘制双变量 LISA 聚类图(图 5)。科技创新和生

态环境的全局 Moran's *I* 值均为正且通过了显著性检验,科技创新和生态环境双变量 Moran's *I* 值除 2011 年为负值外,其余年份均为正值,安徽省全域科技创新和生态环境存在空间聚集现象。除不显著城市外,2020 年安徽省城市科技创新与生态环境在空间上存在 4 种显著的空间聚类类型:①高创新—高生态(宣城市),该城市有较强的科技创新能力,能够将科技创新成果有效作用于生态环境保护;②低创新—低生态(亳州市),造成该现象的原因可能为城市经济发展较弱,企业科技创新能力差且多用于增加利润,而不注重环保技术研发,绿色专利较为稀缺,环境质量提升较难<sup>[24]</sup>;③低创新—高生态(黄山市、池州市),这类城市早期依托旅游资源发展经济,工业企业较少,创新人才吸引能力较差;④高创新—低生态(蚌埠市),这类城市科技创新水平较高,但绿色创新还不够,不足以支撑生态环境改善。由此可以看出,安徽省城市维度上科技创新与生态环境关系存在异质性,既有正相关性,也有负相关性。

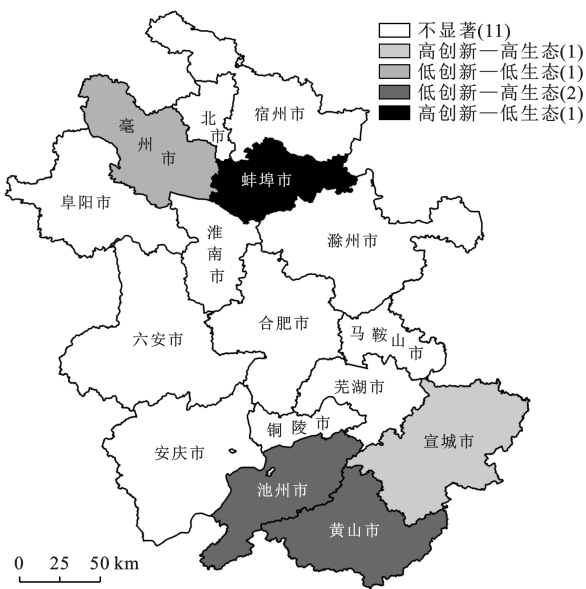


图 5 安徽省 2020 年科技创新与生态环境的双变量 LISA 聚类图

Fig.5 Bivariate LISA cluster diagram of technological innovation and ecological environment in Anhui Province in 2020

表 4 安徽省 2011—2020 年全球 Moran's I 值										
Table 3 The global Moran's I value of Anhui Province from 2011 to 2020										
项目	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
科技创新	0.200 **	0.207 **	0.205 **	0.215 **	0.235 **	0.248 **	0.244 **	0.252 **	0.186 **	0.226 **
生态环境	0.391 ***	0.451 ***	0.324 ***	0.428 ***	0.484 ***	0.582 ***	0.441 ***	0.428 ***	0.380 ***	0.469 ***
科技创新和生态环境	-0.040 *	0.011 *	0.094 *	0.017 *	0.008 *	0.047 *	0.037 *	0.012 *	0.018 *	0.080 *

**3.2 科技创新对生态环境的空间影响效应**

由前文分析可知,安徽省生态环境和科技创新在空间上具有一定的领域辐射效应以及显著的空间自相关性,科技创新对生态环境具有一定的异质性影响。因此,本文基于安徽省全域以及皖北、皖中、皖南分域分别作空间计量,探究科技创新对生态环境的影响,尤其是空间溢出性情况。

**3.2.1 空间计量模型选择** 采用 Stata15.1 软件进行空间计量模型的最优模型选择。为检验空间计量模型是否适用,进行拉格朗日乘数检验(LM)及稳健性拉格朗日检验(Robust LM)<sup>[25]</sup>,结果显示(表 5),空间误差最大似然检验(LM-error)、空间滞后最大似然检验(LM-lag)及其稳健性检验 Robust LM Error 和 Robust LM-Lag 均显著拒绝“无空间自相关”的原假设,即存在着空间滞后效应和空间误差效应,需要对其进行空间计量分析。

参考 Elhorst<sup>[26]</sup>从一般到具体的模型检验原则,首先构建 SDM 模型进行似然比检验(LR)和沃尔德检验(Wald),结果发现(表 6),针对空间误差(Spatial error)和空间滞后的(Spatial lag)的 LR 检验和 Wald

检验均显著拒绝“SDM 模型能够退化为 SAR 模型和 SEM 模型”原假设,因此选择 SDM 模型。同时,豪斯曼检验(Hausman)显示固定效应模型要优于随机效应模型。综合 LR,Wald 和 Hausman 检验结果,本文选定固定效应 SDM 模型进行研究。

表 5 空间计量模型适用性判断 LM 检验		
Table 5 LM test for applicability of spatial econometric model		
LM 检验	统计量	P-value
LM-error	38.432	0.000
Robust LM Error	21.285	0.000
LM-lag	20.582	0.000
Robust LM lag	3.435	0.064

表 6 空间计量模型选择 LR,Wald 和 Hausman 检验		
Table 6 Spatial econometric model selection LR, Wald and Hausman test		
检 验	统计量	P-value
LR Spatial-lag	15.28	0.009 2
LR Spatial-error	20.88	0.000 9
Wald Spatial-lag	15.71	0.007 7
Wald Spatial-error	18.88	0.002 0
Hausman	26.70	0.005 1

表 7 显示三种固定效应模型的空间系数(Spatial rho)、个体效应的特异误差(variance sigma2\_e)、组内拟合优度( $R^2$ -within)、自然对数似然函数值(Log-L)、赤池信息量准则(AIC)、贝叶斯信息准则(BIC)等

计算结果。  
由表 7 可以看出,依据 Log-L,AIC 和 BIC 最小原则在 3 种固定效应类型中选择,结果显示时空双固定效应模型最为适用。

表 7 固定效应 SDM 模型估计结果  
Table 7 Estimation results of fixed effect SDM model

变 量	空间固定效应	时间固定效应	时空双固定效应
Spatial rho	0.543*** (7.96)	0.570*** (7.13)	0.329*** (3.55)
Variance sigma2_e	0.009*** (8.70)	0.038*** (8.54)	0.008*** (8.84)
$R^2$ -within	0.260	0.080	0.231
Log-L	144.975	27.674	157.609
AIC	-265.949	-31.348	-291.219
BIC	-229.047	5.554	-254.317
N	160	160	160

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

3.2.2 科技创新对生态环境的空间影响效应 空间杜宾模型包含所有变量的空间滞后项,为了更精确地描述科技创新影响该城市和相邻城市生态环境的差异性,本文基于偏微分方法将生态环境影响因素的空间效应分解为直接效应、间接效应和总效应。其中,

直接效应表示自变量对该城市生态环境的影响;间接效应表示自变量对邻近城市生态环境的作用程度,即自变量的空间溢出效应;总效应表示自变量对安徽省全域生态环境质量的影响程度。科技创新总水平对生态环境质量的回归结果详见表 8。

表 8 科技创新总水平对生态环境的 SDM 估计结果  
Table 8 SDM estimation results of the total level of scientific and technological innovation on ecological environment

变 量	安徽省全域			皖 南			皖 中			皖 北		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
Ln tec	0.169* (1.76)	0.501* (1.87)	0.670** (2.09)	-0.328** (-2.04)	-0.879*** (-2.60)	-1.207*** (-3.51)	0.593** (2.51)	0.863** (1.96)	1.456** (2.43)	0.409*** (2.77)	0.563* (1.68)	0.972** (2.10)
Ln fdi	-0.013 (-0.35)	-0.270** (-2.30)	-0.283** (-2.13)	0.040 (0.55)	-0.195 (-1.22)	-0.155 (-0.93)	-0.623*** (-3.12)	-1.547*** (-4.37)	-2.171*** (-4.02)	0.078** (2.25)	0.204** (2.45)	0.282*** (3.12)
Ln ur	0.172 (0.88)	1.792** (3.19)	1.965*** (2.91)	-0.007 (-0.03)	1.293** (2.52)	1.268** (2.23)	-5.263* (-1.84)	-10.963*** (-2.59)	-16.226** (-2.36)	-0.215 (-0.55)	-0.593 (-0.72)	-0.808 (-0.74)
Ln utis	-0.084 (-0.95)	-0.054 (-0.21)	-0.138 (-0.47)	-0.288 (-1.20)	-0.577 (-1.47)	-0.865* (-1.86)	-1.061* (-1.85)	-2.466** (-2.37)	-3.527** (-2.25)	0.149 (1.25)	0.690*** (3.20)	0.839*** (3.14)
Ln reg	-0.005 (-0.19)	-0.015 (-0.19)	-0.020 (-0.21)	0.022 (0.66)	-0.139** (-2.50)	-0.117* (-1.85)	-0.142** (-2.29)	-0.057 (-0.56)	-0.199 (-1.60)	-0.025 (-1.08)	-0.233*** (-3.54)	-0.258*** (-3.21)

为进一步探讨科技创新影响生态环境的作用机理,将科技创新分解为科技创新投入( $tec_{(1)}$ )、科技创

新产出( $tec_{(2)}$ )和科技创新环境( $tec_{(3)}$ ),分别建立空间杜宾模型(16)——(18),回归结果详见表 9。

$$\ln eco_{i,t} = \rho \sum_{j=1}^n W_{i,j} \ln eco_{i,t} + \beta_1 \ln tec_{(1)i,t} + \sum_{n=2}^k \beta_n \ln X_{i,t} + \delta_1 \sum_{j=1}^n W_{i,j} \ln tec_{(1)i,t} + \sum_{n=2}^k \sum_{n=2}^k \delta_n W_{i,j} \ln X_{i,t} + c + \epsilon_{i,t} \quad (16)$$

$$\ln eco_{i,t} = \rho \sum_{j=1}^n W_{i,j} \ln eco_{i,t} + \beta_1 \ln tec_{(2)i,t} + \sum_{n=2}^k \beta_n \ln X_{i,t} + \delta_1 \sum_{j=1}^n W_{i,j} \ln tec_{(2)i,t} + \sum_{n=2}^k \sum_{n=2}^k \delta_n W_{i,j} \ln X_{i,t} + c + \epsilon_{i,t} \quad (17)$$

$$\ln eco_{i,t} = \rho \sum_{j=1}^n W_{i,j} \ln eco_{i,t} + \beta_1 \ln tec_{(3)i,t} + \sum_{n=2}^k \beta_n \ln X_{i,t} + \delta_1 \sum_{j=1}^n W_{i,j} \ln tec_{(3)i,t} + \sum_{n=2}^k \sum_{n=2}^k \delta_n W_{i,j} \ln X_{i,t} + c + \epsilon_{i,t} \quad (18)$$

(1) 科技创新对生态环境的影响效应。从安徽省全域看,科技创新对生态环境的直接效应、间接效应和总效应均通过了显著性检验,科技创新每正向变

化 100%,该区生态环境质量提高 16.9%,邻近地区提高 50.1%,科技创新对生态环境的空间溢出效应明显。为探索该作用效应产生原因,本文分析科技创新



三要素对生态环境的作用情况(表 9):①总效应。科技创新投入、产出和环境均对生态环境产生显著正向作用且作用程度:科技创新环境(1.468)>科技创新产出(1.209)>科技创新投入(1.082)。科技创新对生态环境正向促进的原因可能为:其一,科技创新投入和成果转化促使企业从传统的粗放型向集约型转变,高新技术企业数量不断增加,加快了生产要素的高效利用和产品质量水平的提高,迫使同样产出所需的生产要素更少,相应的能源消耗、污染排放等环境污染降低;其二,废物回收利用、污水治理、垃圾无害化处理等环境保护技术离不开创新;其三,创新环境

给绿色产品研发、节能减排等技术升级提供大量人才和创新知识平台,加快了信息交流速度,增加了新技术市场活跃程度。②直接效应和空间溢出效应。科技创新投入对该区生态环境有显著负向影响(−0.374),产品和技术研发所需的大量资源给该区环境造成负担。科技创新投入、产出和环境均对生态环境产生了显著的空间溢出效应,且科技创新环境溢出效应最大(1.617),这说明安徽省交通信息便利促使绿色创新技术和人才溢出,周边城市直接获取成功绿色技术,减少了技术研发在不断试错中产生的物质资源浪费等生态负效应。

表 9 科技创新分要素对生态环境的 SDM 估计结果

Table 9 SDM estimation results of scientific and technological innovation sub-elements on ecological environment												
变 量	安徽省全域			皖 南			皖 中			皖 北		
	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应	直接效应	间接效应	总效应
科技创新投入	−0.374 ** (−2.09)	1.455 *** (2.99)	1.082 ** (1.98)	−0.148 (−0.55)	1.585 *** (2.79)	1.437 ** (2.32)	0.647 (0.67)	0.634 (0.50)	1.281 (0.62)	−0.045 (−0.14)	0.491 (0.62)	0.446 (0.42)
科技创新产出	0.001 (0.00)	1.208 ** (2.17)	1.209 * (1.80)	0.480 (1.12)	−0.486 (−0.56)	−0.005 (−0.01)	4.342 *** (3.74)	5.993 *** (3.88)	10.335 *** (3.99)	1.139 (1.46)	1.961 (1.26)	3.100 (1.35)
科技创新环境	−0.149 (−0.52)	1.617 ** (2.02)	1.468 ** (1.47)	−0.710 (−1.40)	−3.465 *** (−2.72)	−4.175 *** (−3.12)	0.651 (0.93)	0.999 (0.85)	1.650 (1.08)	1.270 * (1.81)	−2.129 (−1.21)	−0.859 (−0.41)

从安徽省子区域看,皖南地区科技创新对生态环境产生负向的直接效应和空间溢出效应,该地区科技创新投入能够有效保护生态环境(1.437),但是科技创新环境对皖南地区生态环境具有负向的空间溢出效应(−3.465),这可能是因为皖南城市间存在高科技企业、高校及图书馆等资源竞争,城市间信息交流不足够。皖中和皖北地区科技创新对该区和邻近地区生态环境质量改善均有显著正向影响,且皖中地区科技创新作用效果最优。皖中地区科技创新产出的直接效应(4.342)和间接效应(5.993)作用明显,该区域能够有效利用科技创新成果对生态环境进行改善,城市间环保技术和产品的流通较好,验证了上文讨论得出“合肥市科技创新的领域辐射效应明显”的结论。

(2) 控制变量对生态环境的影响效应。外商直接投资对生态环境的作用:①外商带来的大量资金和先进技术能够促进节能减排和减污设备的研发;②“污染天堂”假说认为国外多将能源消耗大、污染严重的行业转移到我国,外商投资越多,经济规模越大,能源需求越多,环境破坏越强。从结果看,外商直接投资对皖南地区生态环境作用效果不明显,对皖中地区生态环境产生显著的负效应,对皖北地区产生显著的正向影响,说明皖北地区能够很好地将外资带来的先进技术作用于生态环境保护上,皖中地区更多的是将外资投入到工业生产上。总体上看安徽省外商投资造

成的环境破坏大于其绿色技术带来的环境保护。安徽省不同区域城镇化对生态环境产生的影响不同:皖南地区城镇化对生态环境的空间溢出效应为正(1.293),该地区生态环境较好,人口溢出城市更加注重环境保护,带动旅游产业。皖中地区城镇化水平高,带来了该区(−5.263)和周边城市(−10.963)的生态环境破坏,这种现象可能是“虹吸效应”引起,皖中地区的合肥市凭借其经济和资源优势,对邻近地区人才和资本形成强大的吸引力,造成该区用水用电压力增大,噪音和污染排放增加,但环境保护响应不足够。合肥市产业聚集造成资源紧张,迫使一些产业向周边城市扩张,污染源也正在逐步远离人群居住的城市排放,故产生负向的空间溢出效应。皖北地区产业结构升级对生态环境表现为正向溢出效应,皖北地区城市经济发展差异较大,该区产业结构升级可能将相对落后的、高能耗产业转移到周边地区,但这些产业相对于周边地区却是高效、低污染的,能够帮助其生态环境质量的提升<sup>[27-28]</sup>。相反地,皖南和皖中地区产业结构升级的直接效应、间接效应和总效应为负,造成该现象的原因可能是高级阶段的制造业通过不断技术研发能够走绿色制造道路,在一定程度上能够缓解生态环境的污染<sup>[29]</sup>,而皖南地区本身生态环境较好,但缺乏绿色技术进一步提高环境质量。皖南和皖北地区环境规制对生态环境产生显著的负向空间溢出效

应和总效应,造成这种现象的原因可能是因为地区环境污染严重,其改善环境的愿望愈加强烈,进而在工业污染治理等方面投入大量精力和资源。另一方面该区受到环境规制的影响,可能将污染严重的企业迁至邻近地区,造成周边城市生态环境的破坏。

## 4 结论与对策

### 4.1 结论

(1) 从时序上看,安徽省生态环境和科技创新水平稳步增长,科技创新增长速度大于生态环境增长速度。从空间格局上看,生态环境呈现“皖南高,皖中居中,皖北低”特征,处于安徽省“U 形”位置的边界城市生态环境较好;科技创新以合肥和芜湖市为创新发展之首,向四周产生领域辐射效应。安徽省科技创新和生态环境均具有空间自相关性,且生态环境聚集程度大于科技创新。

(2) 从安徽省全域看,科技创新对生态环境起到显著正向影响,且空间溢出效应程度大于直接效应。分区域看,科技创新对生态环境的影响在皖南地区表现为负向效应,在皖中和皖北地区显示出正向的直接效应和空间溢出效应,其中皖中地区科技创新对生态环境保护最有效。

(3) 安徽省科技创新投入、科技创新产出和科技创新环境均有效促进生态环境改善。不同区域科技创新要素对生态环境的影响不同:皖南地区科技创新投入对生态环境质量有显著的空间溢出效应,但是科技创新环境表现为负向的空间溢出效应;皖中地区科技创新产出对生态环境起到正向空间溢出效应;皖北地区科技创新环境对生态环境保护具有正向的直接效应。

(4) 外商直接投资对生态环境的作用在皖中地区表现负向效应,在皖北地区为正;城镇化水平对生态环境的影响在皖南为正,皖中为负,皖北不显著;产业结构升级对生态环境的影响在皖南和皖中地区为负,皖北地区为正;皖南和皖北地区的环境规制对生态环境产生负向空间溢出效应。

### 4.2 对策

(1) 明晰提高科技创新水平和环境保护能力的方向和重点。从生态环境评价指标中看,人均水资源拥有量和人均造林面积对城市生态环境的影响最大。安徽省要重点突出水资源节约和林业的种植,兼顾企业污染物排放与治理、城市绿化种植和噪声控制、耕地保护制度的完善等。从科技创新评价指标中看,要保障充足的科技创新人员全职当量,加大高校人才输送力度,通过健全基础设施和信息化的建设,促进城市间物质、信息、资金、人才的对接,有效保障科技创

新投入的绿色成果转化。

(2) 突出地方特色,发挥领域辐射作用。皖北地处苏鲁豫皖四省交界,要充分发挥交通优势,加快城镇化进程,重点放在产业升级改造、增加战略性新兴产业等方面,推进绿色生产方式发展经济。加快皖南国际文化旅游示范区基础设施建设,创新旅游模式,与沪苏浙等周边省份建立常态化协调机制,促进旅游业的发展,提高绿色发展能力。

(3) 因地制宜开展生态环境保护。针对低创新—低生态型城市,要找准自身生态环境薄弱点,通过提高相应的科技创新能力实现环境重点突破,同时加大与周边城市的合作与交流;低创新—高生态型城市要在保持当前的生态环境质量前提下,推进创新建设,再稳步提高生态环境水平;高创新—低生态型城市要将重点放在提高创新成果的绿色转化能力上。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 郭爱君,杨春林,钟方雷.我国区域科技创新与生态环境优化耦合协调的时空格局及驱动因素分析[J].科技管理研究,2020,40(24):91-102.
- [2] 向丽.中国省域科技创新与生态环境协调发展的时空特征[J].技术经济,2016,35(11):28-35.
- [3] 谷缙,程钰,任建兰.中国生态文明建设与科技创新耦合协调时空演变[J].中国科技论坛,2018,271(11):158-167.
- [4] 谢波,单灿阳,张成浩.科技创新、环境规制对区域生态效率的影响研究[J].生态经济,2018,34(4):86-92.
- [5] 潘明明,谢荣见.科技创新驱动绿色生态效率空间分异探析:基于地区市场分割视角[J].软科学,2019,33(10):20-25.
- [6] 韩政,程钰,刘娜.科技创新对中国沿海地区产业生态化的影响研究[J].湖南师范大学自然科学学报,2021,44(04):81-90.
- [7] 侯纯光,程钰,任建兰,等.科技创新影响区域绿色化的机理:基于绿色经济效率和空间计量的研究[J].科技管理研究,2017,37(8):250-259.
- [8] 辛晓华,吕拉昌.中国主要城市技术创新影响环境污染的空间分异与机理[J].地理科学,2021,41(1):129-139.
- [9] 陈超凡,蓝庆新,王泽.城市创新行为改善生态效率了吗?:基于空间关联与溢出视角的考察[J].南方经济,2021,376(1):102-119.
- [10] 王芳,季健,秦海鸥,等.技术创新对环境污染影响的空间分析:基于研发投入视角[J].生态经济,2021,37(7):196-205.
- [11] 闫明涛,乔家君,瞿萌,等.黄河流域乡村社会经济与生态环境耦合协调测度及影响因素分析[J].测绘通报,2022,541(4):101-105,116.
- [12] Tw R. A computer movie simulating urban growth in

the Detroit Region [J]. *Economic Geography*, 1970, 46 (2): 234-240.

[13] 张崇森,李森,张力喆,等.基于 PSR 模型的城市生态安全评价与贡献度研究:以铜川市为例[J].*安全与环境学报*,2019,19(3):1049-1056.

[14] 金辉,王思.基于 PSR 模型的武汉城市圈生态安全评价及态势研究[J].*安全与环境学报*,2020,20(1):352-363.

[15] 贾洪文,张伍涛,盘业哲.科技创新、产业结构升级与经济高质量发展[J].*上海经济研究*,2021,392(5):50-60.

[16] 曹佳蕾,李停.基于熵权 GC-TOPSIS 的区域科技创新能力评价与实证[J].*统计与决策*,2020,36(15):171-174.

[17] 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*,2011,359(10):104-112,136.

[18] 黄磊,吴传清.外商投资、环境规制与长江经济带城市绿色发展效率[J].*改革*,2021,325(3):94-110.

[19] 熊曦,肖俊.武陵山片区城镇化与生态环境耦合协调度时空分异研究:以 6 个中心城市为例[J].*生态学报*,2021,41(15):5973-5987.

[20] 杨雪荻,白永平,车磊,等.甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析[J].*生态学报*,2020,40(14):4785-4793.

[21] 何刚,王雯雯,夏业领,等.基于正态云模型的区域生态安全评价[J].*安全与环境学报*,2018,18(2):807-813.

[22] 中华人民共和国中央人民政府.国务院关于印发全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)的通知[EB/OL]. [http://www.gov.cn/zwgk/2013-12/03/content\\_2540070.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2013-12/03/content_2540070.htm).

[23] 黄河东.基于 PSR 模型和改进 TOPSIS 法的中国城市群生态质量比较研究[J].*生态经济*,2016,32(6):164-167,200.

[24] 陈阳,逮进,于平.技术创新减少环境污染了吗?:来自中国 285 个城市的经验证据[J].*西安交通大学学报(社会科学版)*,2019,39(1):73-84.

[25] L Anselin. Local indicator of spatial association-LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2):93-115.

[26] Elhorst J P. Heidelberg: Springer [M]: Heidelberg: Springer, 2014.

[27] 汪艳涛,张娅娅.生态效率区域差异及其与产业结构升级交互空间溢出效应[J].*地理科学*,2020,40(8):1276-1284.

[28] 马骏,周盼超.产业升级对提升长江经济带生态效率的空间效应研究[J].*南京工业大学学报(社会科学版)*,2020,19(2):73-88,112.

[29] 向阳,罗胤晨,于哲浩,等.城市制造业集聚演变及其对生态环境的影响研究:基于成渝地区双城经济圈的实证分析[J].*调研世界*,2022(3):20-29.

(上接第 318 页)

[23] 陈炜,黄慧萍,田亦陈,等.基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J].*地球信息科学学报*,2019,21(9):1382-1391.

[24] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.

[25] Sun Bo, Zhou Qiming. Expressing the spatio-temporal pattern of farmland change in arid lands using landscape metrics [J]. *Journal of arid environments*, 2016, 124(1): 118-127.

[26] 胡琦,马雪晴,胡莉婷,等.Matlab 在气象专业教学中的应用:气象要素的 M-K 检验突变分析[J].*实验室研究与探索*,2019,38(12):48-51.

[27] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.

[28] 王志超,何新华.基于植被覆盖度和遥感生态指数的成都市锦江区生态质量评估[J].*生态与农村环境学报*,2021,37(4):492-500.

[29] 林荣平,祁新华,叶士琳.沿海河谷盆地城市热岛时空特征及驱动机制[J].*生态学报*,2017,37(1):294-304.

[30] 李琛,吴映梅,高彬嫔,等.高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测:以环洱海地区为例[J].*经济地理*,2022,42(4):220-229.

[31] 李胜鹏,柳建玲,林津,等.基于 1980-2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变[J].*应用生态学报*,2020,31(12):4080-4090.

[32] 刘雅芳.生态文明建设是否抑制了碳排放? 来自福建生态文明先行示范区建设的经验证据[J].*中南林业科技大学学报(社会科学版)*,2021,15(3):31-38.

[33] 叶宝鉴,陈永滨,马良,等.福建省两种林分类型物种结构特征[J].*江西农业大学学报*,2020,42(1):84-91.

[34] Park J, Shin Y, Kim S, et al. Efficient plant types and coverage rates for optimal green roof to reduce urban heat island effect [J]. *Sustainability*, 2022, 14 (4): 1-17.

[35] Xu Hanqiu, Wang Yifan, Guan Huade, et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (20): 23-45.

[36] 陈颖彪,郑子豪,吴志峰,等.夜间灯光遥感数据应用综述和展望[J].*地理科学进展*,2019,38(2):205-223.