

贾卓, 赵锦瑶, 杨永春, 等. 黄河流域兰西城市群环境规制效率的空间格局及其空间收敛性 [J]. 地理科学, 2022, 42(4): 568-578. [Jia Zhuo, Zhao Jinyao, Yang Yongchun et al. Spatial pattern and spatial convergence of environmental regulation efficiency of Lanzhou-Xining urban agglomeration in the Yellow River Basin. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(4): 568-578.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.04.002

黄河流域兰西城市群环境规制效率的空间格局及其空间收敛性

贾卓^{1,2}, 赵锦瑶¹, 杨永春^{1,2}, 陈兴鹏^{1,2}

(1. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于 2010—2018 年黄河流域兰西城市群县域数据, 采用空间分析技术和空间收敛模型分析环境规制效率的空间格局及其空间收敛性。结果表明: ① 环境规制效率呈现“中心高边缘低”的空间特征, 环境规制效率由“大差距低强度”向“小差距高强度”转变; ② 环境规制效率具有空间相关性, 环境规制效率的热点区-冷点区与经济发展的高水平区-低水平区具有空间趋同性; ③ 环境规制效率存在空间收敛性, 在考虑社会经济因素和空间因素的情况下环境规制效率的空间收敛性增强; ④ 经济水平、政府干预、能耗强度、工业化和人口密度等因素通过空间溢出效应对环境规制效率的空间收敛性产生影响。

关键词: 兰西城市群; 环境规制效率; 空间收敛模型; 溢出效应; 黄河流域

中图分类号: F129.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2022)04-0568-11

黄河流域是中国北方社会经济发展的基础和命脉, 黄河流域生态保护和高质量发展作为国家发展战略, 既是绿色发展理念在国土空间上的重要实践, 也是深度推进生态文明建设的重大部署^[1]。兰西城市群、宁夏沿黄城市群、呼包鄂榆城市群、关中平原城市群、晋中城市群、中原城市群和山东半岛城市群既是黄河流域经济发展的重心区, 也是污染防治的重点区, 提高环境规制效率对黄河流域城市群高质量发展具有现实意义^[2]。兰西城市群作为黄河流域的国家能源化工基地和资源开发重点区, 污染密集型产业所带来的环境压力日益增强, 亟待提高环境规制效率, 实现其绿色发展^[3]。因此, 对兰西城市群环境规制效率的空间格局及其空间收敛性开展研究必要且迫切。

环境规制效率是评估环境治理绩效的重要途径, 在分权式的环境管理制度下, 环境规制被视为

争夺资源的博弈工具, 导致环境规制效率存在区域差异^[4]。已有研究通过成本弹性系数^[5]、指标体系^[6]、数据包络分析模型^[7]等方法, 从环境政策数量、污染减排成本、污染减排量、治污设施运行成本等方面对环境规制效率进行量化^[8]。地方政府对环境治理会采用“逐底竞争”或“逐顶竞争”的差异性策略, 进而导致环境规制效率存在区域差异^[9], 如山东省各城市的环境规制效率存在空间分异^[10]。中国沿海城市群环境规制效率存在空间相关性^[11], 中国环境规制效率呈现空间集聚特征^[12]。经济水平、产业结构、市场环境、城镇化水平和对外开放水平等因素导致环境规制效率存在区域差异^[10-12]。已有研究在关注环境规制效率区域差异的同时也采用 α 收敛模型^[13]、 β 收敛模型^[14]、空间计量模型^[15]等方法检验其收敛性。经济合作与发展组织(OECD)中各国之间的环境规制效率呈现收敛性^[16]。互为竞争对手的

收稿日期: 2021-02-12; **修订日期:** 2021-10-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601606)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK1005)、教育部人文社会科学研究青年基金项目(15YJC790034)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2021-70)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41601606), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2019QZKK1005), Humanities and Social Sciences Foundation of Ministry of Education (15YJC790034), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (lzujbky-2021-70).]

作者简介: 贾卓(1984-), 男, 陕西咸阳人, 副教授, 硕导, 主要从事生态经济与区域空间规划研究。E-mail: jiiaazhuo@lzu.edu.cn

地区相互模仿彼此的环境规制, 导致地区之间的环境规制效率具有收敛性^[17]。环境规制效率的收敛性受经济水平、产业结构、技术水平、人口规模、政府调控、制度安排等多因素影响^[16-18]。

社会经济活动在空间上呈现空间相关性, 导致环境规制效率也存在空间效应, 若忽略空间因素对环境规制效率空间格局及其空间收敛性的影响, 估计结果将会出现偏差。美国各州之间的环境规制效率存在空间溢出, 环境规制效率较高的州对与其相邻的各州具有“示范效应”^[19]。中国环境规制效率具有空间非均衡性, 环境规制效率由东部、中部、再到西部呈现逐步弱化的特征, 邻近城市环境规制效率之间存在空间相关性^[20]。环境规制效率在区域之间所表现的空间异质性和空间关联性是导致环境规制效率存在空间收敛性的原因。因此, 在分析环境规制效率空间收敛性时, 将空间因素纳入研究模型中具有合理性^[21]。

综上所述, 理清环境规制效率的空间格局及其空间收敛性既是区域高质量发展所需面对的现实问题, 也是环境经济地理学探讨的科学问题。空间因素在环境规制效率空间收敛过程中起到不可忽略的作用, 将空间因素纳入经典收敛模型, 开展环境规制效率空间格局及其空间收敛性的研究更为合理^[22]。由于经济发展水平和污染治理程度在省域、市域和县域层面存在差异, 通过县域数据能够更准确刻画城市群环境规制效率空间格局及其空间收敛性^[23]。本研究基于 2010—2018 年黄河流域兰西城市群县域数据, 采用空间分析技术和空间收敛模型分析环境规制效率的空间格局及其空间收敛性, 以期为黄河流域兰西城市群环境规制体系协同共建提供空间瞄准的决策依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究对象

兰西城市群是黄河流域重要的跨省城市群, 对黄河流域的国土开发具有不可或缺的作用, 包括兰州市、西宁市等 6 个市(州)所辖的 41 个县(区)^[24](图 1)。2016 年兰西城市群在黄河流域所有城市群中人口总量占比 5.71%、经济总量占比 3.47%、工业废水排放量占比 2.13%、工业二氧化硫排放量占比 3.41%、工业烟(粉)尘排放量占比 4.06%^[25]。虽然兰西城市群的人口规模、经济规模及污染排放规模在黄河流域所有城市群中的占比



图 1 黄河流域兰西城市群地理区位及空间范围

Fig.1 Geographical position and spatial extension of Lanzhou-Xining urban agglomeration in the Yellow River Basin

不高, 但兰西城市群作为甘肃省和青海省的重要发展载体, 培育发展兰西城市群对促进黄河流域繁荣稳定起到重要的支撑作用^[26]。黄河流域兰西城市群对维护流域生态安全的作用尤为显著, 其高质量发展需要黄河流域甚至整个国家的更多关注和扶持^[27]。兰西城市群作为黄河流域重要的工业基地和能源基地, 石油化工、有色冶金、盐化工、建材及能源供应等污染密集型产业在地区经济总量中占有绝对优势^[28]。黄河流域兰西城市群亟待通过提高环境规制效率促使其经济绿色转型, 以减少污染排放和提高环境污染治理能力。因此, 以黄河流域兰西城市群作为研究靶区, 开展环境规制效率空间格局及其空间收敛性的研究具有合理性和代表性。

1.2 研究方法

1.2.1 环境规制效率测算

衡量环境规制效率的方法主要为过程估算和结果估算, Salamon 指出从污染治理结果来衡量环境规制效率更为全面和客观^[29], 因此采用污染密度法估算黄河流域兰西城市群环境规制效率^[30]。

1) 县(区) i 的污染物排放强度:

$$P_{ijt} = \frac{T_{ijt}/Y_{it}}{\sum_{i=1}^{41} T_{ijt}/Y_{it}} \quad (1)$$

式中, P_{ijt} 为第 i 县(区)第 t 年第 j 种污染物排放强度; T_{ijt} 第 i 县(区)第 t 年第 j 种污染物排放总量, j

种污染物包括:工业废水、工业二氧化硫、工业烟(粉)尘; Y_{it} 为第 i 县(区)第 t 年工业增加值。

2)环境规制效率。 P_{ijt} 为无量纲变量,对其加总平均具有意义。采用工业废水、工业二氧化硫、工业烟(粉)尘的 P_{ijt} 加总平均值表示 i 县(区)的污染排放水平,并求其倒数得到 i 县(区)的环境规制效率, i 县(区)第 t 年的环境规制效率 E_{it} 为:

$$E_{it} = 3 \left/ \sum_{j=1}^3 P_{ijt} \right. \quad (2)$$

式中, E_{it} 表示 i 县(区)第 t 年的环境规制效率, E_{it} 越大表示政府环境污染治理强度越大,环境规制效率越高;反之,环境规制效率越低。

1.2.2 空间自相关分析

1)全局空间自相关。通过全局 Moran's I 分析黄河流域兰西城市群环境规制效率的空间自相关性,用标准差及 Z 值检验显著性^[31]。

2)局部空间自相关。通过 Getis-Ord G_i^* 识别黄河流域兰西城市群环境规制效率在地理空间中的高值簇(热点区)与低值簇(冷点区),以分析环境规制效率的空间特征^[32]:

$$G_i^*(d) = \sum_{j=1}^n w_{ij}(d) X_j \left/ \sum_{i=1}^n X_i \right. \quad (3)$$

本研究对 $G_i^*(d)$ 进行标准化处理,即:

$$Z(G_i^*) = G_i^* - E(G_i^*) / \sqrt{\text{Var}(G_i^*)} \quad (4)$$

式中, X_i 为空间单元 i 的属性值, n 为研究区内县(区)数,即 $n=41$, $w_{ij}(d)$ 为基于 Rook's 原则的地理空间权重矩阵。 $E(G_i^*)$ 和 $\text{Var}(G_i^*)$ 分别为 $G_i^*(d)$ 的数学期望和变异系数。

1.2.3 空间收敛模型

收敛模型作为研究区域经济增长的重要理论,也被应用到研究区域资源环境、能源消费等领域,应用最为广泛的是 β 收敛模型。 β 收敛模型分为 β 绝对收敛模型和 β 条件收敛模型^[33]。在本研究中, β 绝对收敛模型中假设黄河流域兰西城市群各县(区)具有相同的经济社会特征,随着时间推移各县(区)的环境规制效率将趋于相同水平; β 条件收敛模型中考虑各县(区)在经济社会等方面的差异,各县(区)环境规制效率随时间推移趋于相同水平^[34]。空间杜宾模型能够同时考虑因变量和自变量的空间相关性,因此,将空间杜宾模型与 β 收敛模型相结合,构建 β 收敛空间杜宾模型。通过 β

收敛模型和 β 收敛空间杜宾模型分析黄河流域兰西城市群环境规制效率的空间收敛,对比 β 收敛模型和 β 收敛空间杜宾模型之间的检验差异,揭示空间因素对环境规制效率空间收敛的影响。

1) β 收敛模型表达式为^[35]:

$$\ln \frac{EE_{it+1}}{EE_{it}} = \alpha + \beta \ln EE_{it} + \sum_{k=1}^n \lambda_k X_{kit} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

2) β 收敛空间杜宾模型表达式为^[36]:

$$\ln \frac{EE_{it+1}}{EE_{it}} = \alpha + \beta \ln EE_{it} + \sum_{k=1}^n \lambda_k X_{kit} + \rho \sum_{j=1}^n w_{ij} \ln \frac{EE_{jt+1}}{EE_{jt}} + \sum_{j=1, k=1}^n \phi_k w_{ij} X_{kit} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中, α 为截距项, β 为收敛性的判断系数项,若 $\beta < 0$, 表示环境规制效率存在 β 收敛,即环境规制效率较低的县(区)存在追赶环境规制效率较高县(区)的趋势,若 $\beta > 0$, 表示不存在 β 收敛。 EE_{it+1} , EE_{it} 分别为 i 县(区)第 $t+1$ 和第 t 年的环境规制效率; λ_k 为第 k 个控制变量 X_{kit} 的估算系数; ε_{it} 为误差项,且服从正态分布; ρ 为表示空间溢出方向和程度的空间回归系数; ϕ_k 为表示控制变量与空间权重的空间交互效应的回归系数; w_{ij} 为空间权重矩阵 W 中的元素,采用 Rook's 原则的地理空间权重矩阵。当 $\lambda_k = 0$, $\phi_k = 0$ 时,式(5)为 β 绝对收敛模型,式(6)为 β 绝对收敛空间杜宾模型;当 $\lambda_k \neq 0$, $\phi_k \neq 0$ 时,式(5)为 β 条件收敛模型,式(6)为 β 条件收敛空间杜宾模型。

借鉴已开展研究,式(6)中控制变量 X_{kit} 包括:

① 经济水平(G),采用人均地区生产总值表示,经济水平提高能够优化污染减排的技术和手段,也能够增强公众的环境意识,从而提高环境规制效率提供内在动力^[37]。② 政府干预(F),采用政府一般公共预算支出表示,政府干预表现为政府通过财政转移支付对污染减排的影响,以体现行政手段对环境规制效率的影响^[38]。③ 能耗强度(E),采用工业能源消耗强度表示,工业能源消耗强度是技术进步的直观表现,通过技术进步能有效提高环境规制效率^[39]。④ 工业化率(I),采用工业增加值占地区生产总值比例表示,工业化率对资源配置和污染物排放量起到重要作用,粗放型的工业化造成污染排放增加,但是随着工业生产部门注重节能环保,工业化能够减少污染

物排放, 从而提升环境规制效率^[40]。⑤ 人口密度(M), 采用单位行政区面积常住人口表示, 人口密度高的地区拥有更多的社会劳动力资源, 人力资本集聚能够促进经济内生性增长模式形成, 从而提高环境规制效率^[41]。为使实证数据更符合正态分布并消除模型异方差性, 在经验估计之前对所有变量进行对数处理。

1.3 数据来源

黄河流域兰西城市群各县(区)污染排放数据及工业能源消耗强度数据来源于兰州市、西宁市、白银市、定西市、临夏州和海东市等 6 个市(州)的环境统计业务系统。黄河流域兰西城市群各县(区)的常住人口、政府一般公共预算支出、工业增加值、地区生产总值等经济社会数据来源于《甘肃发展年鉴》^[42]、《青海统计年鉴》^[43], 以及兰州市、西宁市、白银市、定西市、临夏州和海东市等 6 个市(州)历年统计年鉴。为消除价格因素, 根据 GDP 平减指数将经济数据调整为 2010 年不变价格。研究期内黄河流域兰西城市群各县(区)行政区划范围总体调整较小, 为便于对比, 空间数据以中国科学院资源环境科学与数据中心 2015 年中国县级行政边界和行政区面积数据为基准。

2 环境规制效率空间格局

2.1 环境规制效率空间分异性

按照公式(1)和(2)计算得到黄河流域兰西城

市群环境规制效率, 为对比 2010 年和 2018 年环境规制效率的空间格局变化, 基于几何间隔法和人工手动取整方法, 采用相同的等级划分标准分别将 2010 年和 2018 年的环境规制效率分为 4 个等级, 通过 ArcGIS10.2 对 2010 年和 2018 年黄河流域兰西城市群环境规制效率进行空间可视化(图 2)。黄河流域兰西城市群环境规制效率呈现“中心高边缘低”的空间分异特征。环境规制效率高值区主要集中在兰州市和西宁市所辖县(区), 说明环境规制效率与经济发展水平存在空间耦合, 由于兰州市、西宁市分别作为甘肃省、青海省的省会, 在黄河流域兰西城市群范围内具有更高的经济发展水平, 以及更强的环境改善压力, 在多因素共同驱动下形成环境规制效率高值集中区。环境规制效率低值区在白银市、定西市、临夏州及海东市所辖的经济待发展县(区)形成了连绵区, 由于缺乏政策压力, 该类县(区)保持环境规制效率低水平空间集聚状态。2010—2018 年黄河流域兰西城市群环境规制效率在 0.21~0.37 之间的县(区)由 3 个减少为 2 个, 环境规制效率在 0.38~1.48 之间的县(区)由 26 个减少为 21 个, 环境规制效率在 1.49~2.58 之间的县(区)由 7 个增加为 10 个, 环境规制效率在 2.59~5.89 之间的县(区)由 5 个增加为 8 个。综上所述, 黄河流域兰西城市群环境规制效率总体呈上升趋势, 表现出由“大差距低强度”向“小差距高强度”转变的特征。随着生

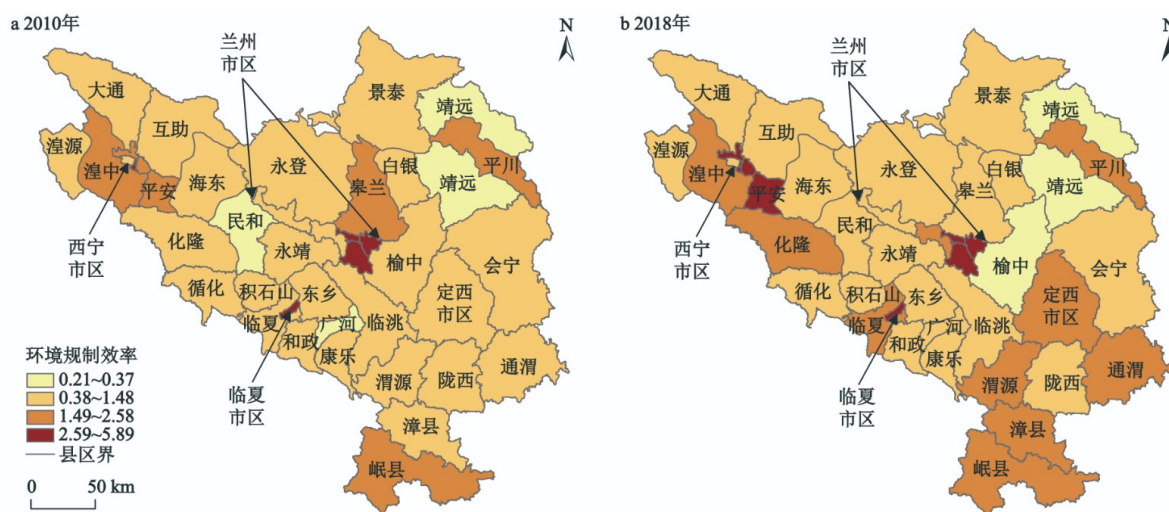


图 2 2010 年和 2018 年黄河流域兰西城市群环境规制效率空间格局

Fig.2 Spatial pattern of environmental regulation efficiency of Lanzhou-Xining urban agglomeration in the Yellow River Basin in 2010 and 2018

态文明理念的不断贯彻和污染防治攻坚的深入,通过提高环境规制效率推动黄河流域兰西城市群高质量发展的作用日益凸显,在高污染产业被逐步淘汰背景下,城市群内各县(区)环境规制效率的差异也逐步减小。

2.2 环境规制效率空间相关性

为揭示环境规制效率的空间自相关,采用 GeoDa1.6.0 计算 2010—2018 年黄河流域兰西城市群环境规制效率的全局 Moran's I (表 1)。2010—2018 年全球 Moran's I 均为正值,且通过显著性检验,说明黄河流域兰西城市群环境规制效率存在较为显著的空间正相关性,即各县(区)环境规制效率会受其邻近县(区)环境规制效率影响,环境规制效率高值县(区)之间倾向于相互临近集聚,环境规制效率低值县(区)之间亦倾向于相互临近集聚^[44]。从变化趋势而言,2010—2018 年黄河流域兰西城市群环境规制效率全局 Moran's I 呈现波动上升的趋势,即黄河流域兰西城市群环境规制效率的空间依赖性呈现波动增强的特征。

在分析 2010—2018 年黄河流域兰西城市群环境规制效率全局 Moran's I 的基础上,为揭示局部区域对全局空间相关性的贡献,采用 ArcGIS10.2 计算环境规制效率的局域空间关联指数 Getis-Ord G_i^* ,根据最佳自然断裂法,从低值到高值将其划为冷点区、次冷点区、次热点区、热点区,基于 ArcGIS10.2 软件对 2010 年和 2018 数据进行空间可视化。黄河流域兰西城市群环境规制效率的热点区-冷点区具有以下特征(图 3):环境规制效率的热点区-冷点区与经济发展的高水平区-低水平区具有空间趋同性,环境规制效率的热点区及次热点区主要集中在兰州市和西市所辖的经济发展水平高值县(区),环境规制效率的冷点区及次冷点区主要集中在白银市、定西市、临夏州和海东市所辖的传统农业县(区),表明环境规制效率与经济发展水平之间为正相关性。环境规制效率的热点区-冷点区呈现缓慢变化特征,热点区数量增加,冷点区数量减少,表明黄河流域兰西城市群对环境质量的重视程度逐步增强,环境规制效率整体

表 1 2010—2018 年黄河流域兰西城市群环境规制效率全局 Moran's I

Table 1 Global Moran's I of environmental regulation efficiency of Lanzhou-Xining urban agglomeration in 2010-2018											
年份	全局Moran's I	标准差	Z值	年份	全局Moran's I	标准差	Z值	年份	全局Moran's I	标准差	Z值
2010	0.181	0.079	2.706	2013	0.159	0.079	2.336	2016	0.183	0.085	2.763
2011	0.172	0.093	2.421	2014	0.177	0.078	2.840	2017	0.185	0.088	2.518
2012	0.150	0.082	2.324	2015	0.182	0.081	2.720	2018	0.184	0.087	2.631

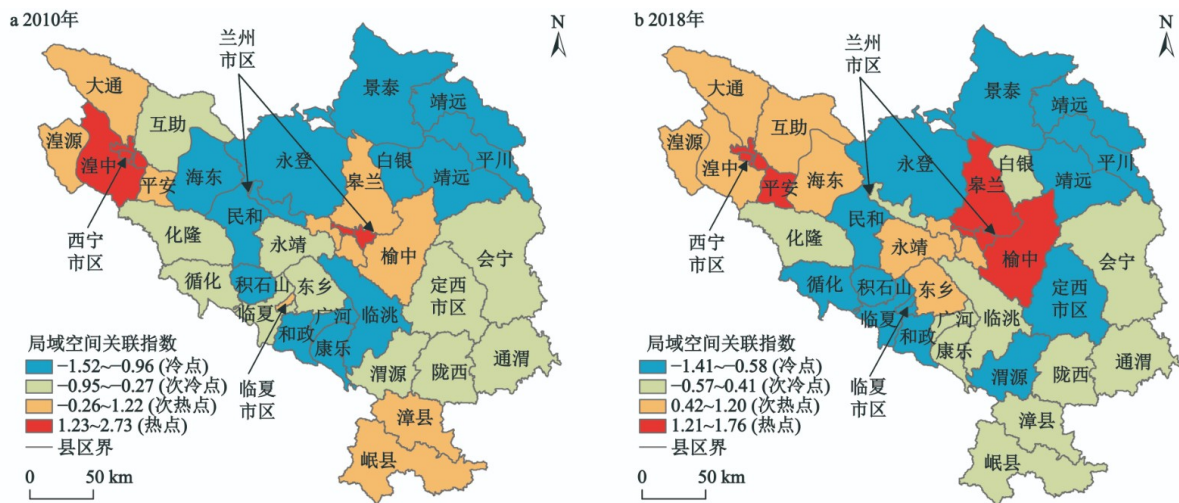


图 3 2010 年和 2018 年黄河流域兰西城市群环境规制效率热点和冷点

Fig.3 Hot spot-cold spot of environmental regulation efficiency of Lanzhou-Xining urban agglomeration in the Yellow River Basin in 2010 and 2018

呈增强态势。2010 年和 2018 年环境规制效率的热点区分别为 7 个县(区)和 9 个县(区), 2010 年和 2018 年环境规制效率的冷点区分别为 13 个县(区)和 12 个县(区), 环境规制效率增加的县(区)集中在兰州市和西市所辖的县(区)。

3 环境规制效率空间收敛性

3.1 模型检验

对 β 收敛模型检验时, 依据 Hausman 检验选择固定效应的 β 收敛模型分析环境规制效率的 β 绝对收敛和 β 条件收敛^[45]。由于采用 2010—2018 年黄河流域兰西城市群 41 个县(区)的面板数据, 所以在使用 β 收敛空间杜宾模型时需要考虑对固定效应与随机效应的选择, 前者指个体效应与回归变量具有关联度, 后者指个体效应与回归变量不存在关联度, 本研究基于个体效应的角度进行数据分析, 因此选择固定效应的 β 收敛空间杜宾模型^[46]。采用 2010—2018 年黄河流域兰西城市群各县(区)环境规制效率组成的面板数据, 借助 MATLAB 2016a 软件, 基于 Rook's 原则的地理空间权重矩阵, 分析黄河流域兰西城市群 2010—2018 年环境规制效率的 β 绝对空间收敛和 β 条件空间收敛^[47]。

为表明 β 收敛空间杜宾模型的稳健性和有效性, 在表 2 中给出了 β 收敛模型和 β 收敛空间杜宾模型的估算结果。由表 2 可知: ① β 绝对收敛

模型、 β 绝对收敛空间杜宾模型、 β 条件收敛模型和 β 条件收敛空间杜宾模型的 $\ln EE_{it}$ 估计系数分别为 -0.015、-0.028、-0.049 和 -0.116, 除 β 绝对收敛模型之外, 其他 3 个模型的估计系数 β 均在 1% 水平下显著, 表明环境规制效率不存在 β 绝对收敛, 但是存在 β 条件收敛、 β 绝对空间收敛和 β 条件空间收敛, 即环境规制效率存在空间收敛性, 黄河流域兰西城市群 41 个县(区)环境规制效率增长速度与其基期初始水平呈负相关, 环境规制效率较低的县(区)对环境规制效率较高的县(区)呈“追赶效应”, 随着时间推移, 黄河流域兰西城市群 41 个县(区)的环境规制效率将趋向于相同水平^[48]。② β 条件收敛模型中收敛速度 0.049 大于 β 绝对收敛模型中收敛速度 0.015, 表明在考虑县(区)社会经济差异的情况下, 加快了环境规制效率收敛速度, 使得环境规制效率收敛性更加可靠。 β 条件收敛空间杜宾模型中收敛速度 0.116 大于 β 绝对收敛空间杜宾模型中收敛速度 0.028, 表明空间因素对环境规制效率的收敛速度具有促进作用, 环境规制效率较高的县(区)会通过“涓滴效应”将节能减排生产方式向环境规制效率低的县(区)扩散, 从而加速了环境规制效率的收敛速度。③ β 绝对收敛空间杜宾模型和 β 条件收敛空间杜宾模型的空间回归系数 ρ 分别为 0.149 和 0.217, 在 1% 水平下显著, 表明环境规制效率空间收敛性存在空间溢出, 环境规制效率的非均衡性导致

表 2 2010—2018 年黄河流域兰西城市群环境规制效率收敛性计量分析

Table 2 Regression of environmental regulation efficiency convergence of Lanzhou-Xining urban agglomeration in 2010-2018

变量	β 绝对收敛模型		β 绝对收敛空间杜宾模型		β 条件收敛模型		β 条件收敛空间杜宾模型	
	系数	t值	系数	Z值	系数	t值	系数	Z值
$\ln EE_{it}$	-0.015	-0.324	-0.028 ^{**}	-2.221	-0.049 ^{***}	-4.530	-0.116 ^{***}	-4.751
$\ln G$	-	-	-	-	0.113 ^{***}	3.655	0.139 ^{***}	4.751
$\ln F$	-	-	-	-	0.073 ^{***}	2.344	0.161 ^{***}	3.721
$\ln E$	-	-	-	-	-0.225 ^{**}	-4.232	-0.241 ^{**}	-4.423
$\ln I$	-	-	-	-	0.112 ^{**}	3.130	0.167 ^{**}	3.487
$\ln M$	-	-	-	-	0.117 ^{**}	3.342	0.153 ^{**}	3.107
常数	0.151 ^{**}	3.781	-	-	0.224 ^{**}	3.109	-	-
空间回归系数 ρ	-	-	0.149 ^{***}	3.785	-	-	0.217 ^{***}	5.426
R^2	0.576	-	0.584	-	0.616	-	0.632	-
Log-Likelihood	-	-	321.427	-	-	-	479.456	-

注: ***、** 分别表示在 1%、5% 水平下显著; EE_{it} , 环境规制效率; M , 人口密度; I , 工业化率; E , 能耗强度; F , 政府干预; G , 经济水平; - 为无此项。

空间相邻县(区)的环境规制效率差异呈现逐步缩小趋势,空间溢出和邻里模仿行为在环境规制效率空间收敛中发挥着重要的作用。④ β 收敛模型和 β 收敛空间杜宾模型的估算结果中变量系数的显著性及符号未发生明显变化,表明 β 收敛模型和 β 收敛空间杜宾模型具有稳健性和有效性。在考虑空间因素和社会经济因素时, β 条件收敛空间杜宾模型能更有效的分析环境规制效率空间收敛性。在 β 条件收敛空间杜宾模型的估算结果中:经济水平、政府干预、工业化率和人口密度的系数显著为正,即经济水平、政府干预、工业化率和人口密度对环境规制效率空间收敛性具有促进作用;能耗强度的系数显著为负,即能耗强度对环境规制效率空间收敛性具有抑制作用。

3.2 控制变量溢出效应分析

由于 β 条件收敛空间杜宾模型纳入了控制变量的空间滞后项,估计结果难以准确衡量各控制变量的溢出效应,需要对其进行直接与间接效应分解,以反映控制变量的空间溢出^[49]。采用偏微分方法将总效应分解为直接效应和间接效应,基于 MATLAB 2016a 估算控制变量的直接效应和间接效应^[50]。由表 3 可知:① 经济水平的直接效应系数、间接效应系数具有显著性,分别为 0.121 和 0.014,表明随着本县(区)经济水平的提高将导致本县(区)环境规制效率空间收敛性提高,即经济水平提高既能为本县(区)污染防治技术优化提供资金保障,也能够增强公众的环境意识,从而提高环境规制效率提供内在动力;经济水平通过空间溢出导致邻近县(区)污染治理能力和公众的环境意识水平提升,促进邻近县(区)环境规制效率

空间收敛性提高。② 政府干预的直接效应系数、间接效应系数具有显著性,分别为 0.135 和 0.021,表明本县(区)通过政府干预能够促进其自身的环境规制效率空间收敛性提高,并对邻近县(区)环境规制效率空间收敛性提高具有促进作用,说明区域环境规制在制定和执行时需强调联防联控。

③ 能耗强度的直接效应系数、间接效应系数具有显著性,分别为-0.162 和-0.095,表明本县(区)能耗强度提高对其环境规制效率空间收敛性起到抑制作用,通过负面“示范效应”导致邻近县(区)对环境规制效率空间收敛性降低。黄河流域兰西城市群的能源消耗以传统化石能源为主,能源消耗强度不断提高将给该城市群带来环境负面效应,制约环境规制效率空间收敛性提高。④ 工业化率的直接效应系数、间接效应系数具有显著性,分别为 0.157 和-0.012,表明工业化率会导致本县(区)环境规制效率空间收敛性增强,但会导致邻近县(区)环境规制效率收敛性降低。即当本县(区)工业化率提高时,本县(区)会制定和实施更为严格的环境政策,然而邻近县(区)将通过制定和实施“逐底竞争”的环境政策规避其自身在区域竞争中的不利地位,并抑制其环境规制效率空间收敛性提高^[51]。⑤ 人口密度的直接效应系数、间接效应系数具有显著性,分别为 0.157 和 0.010,表明本县(区)人口密度提高的过程中会吸引高质量的人力资本集聚,从而对环境质量提出更高的诉求,有利于污染排放量降低^[52],导致本县(区)环境规制效率空间收敛性增加;人力资源作为流动性最强的资源要素,人口流动的过程中也必然伴随着技术、资金和管理制度的空间传播,从而促进邻近县(区)环境规制效率空间收敛性增加。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于 2010—2018 年黄河流域兰西城市群县域数据,采用空间分析技术和空间收敛模型分析环境规制效率的空间格局及其空间收敛性,得到以下结论:① 从环境规制效率的空间分异而言,由于受发展惯性的影响整体呈现“中心高边缘低”的空间格局;在环境治理联防联控的政策背景下,环境规制效率由差异型向模仿型转变,环境规制效率表现出由“大差距低强度”向“小差距高强度”转变的特征。② 从环境规制效率的空间相关性

表 3 影响因素的总效应、直接效应和间接效应

Table 3 The total effect, direct effect and indirect effect of influence factors

解释变量	总效应		直接效应		间接效应	
	系数	P值	系数	P值	系数	P值
lnG	0.135**	0.036	0.121**	0.031	0.014**	0.029
lnF	0.156***	0.003	0.135***	0.005	0.021***	0.002
lnE	-0.257***	0.004	-0.162***	0.005	-0.095***	0.003
lnI	0.145**	0.021	0.157**	0.025	-0.012**	0.028
lnM	0.167*	0.081	0.157*	0.072	0.010*	0.065

注:***、**、* 分别表示在1%, 5%与10%水平下显著; M, 人口密度; I, 工业化率; E, 能耗强度; F, 政府干预; G, 经济水平。

而言,环境规制效率呈现出较为显著的空间正相关性,环境规制效率的热点区-冷点区与经济发展的高水平区-低水平区具有空间趋同性,环境规制效率的热点区数量逐步增加,冷点区数量不断减少,说明经济协同发展是污染联防联控的根本,构建环境治理的空间合力是推动黄河流域兰西城市群高质量发展的有效路径。③ 从环境规制效率的空间演变趋势而言,环境规制效率存在空间收敛趋势,随着时间的推移各县(区)环境规制效率的空间差异呈现逐渐缩小趋势, β 条件收敛的速度大于 β 绝对收敛的速度, β 条件空间收敛的速度大于 β 绝对空间收敛的速度,表明在考虑经济社会因素和空间因素的情况下环境规制效率空间收敛性增强。④ 环境规制效率空间收敛性受本县(区)和相邻县(区)的经济水平、政府干预、工业化率、人口密度、能耗强度等因素的共同影响。各县(区)在关注自身环境规制效率提升时,需考虑到与周边县(区)的要素交互流动,从而提高黄河流域兰西城市群整体环境规制效率。

4.2 讨论

通过本研究能够揭示黄河流域兰西城市群的环境规制效率演变特征,为兰西城市群环境规制协同体系构建提供理论依据。黄河流域兰西城市群各县(区)的环境规制效率存在空间相关性,在城市群内应建立区域协同治理机制,逐步缩小各县(区)之间的环境规制效率差距。环境规制效率低值县(区)通过借鉴环境规制效率高值县(区)的发展经验,推动黄河流域兰西城市群环境规制效率空间收敛性提高。社会经济因素通过空间效应对本县(区)和相邻县(区)的环境规制效率空间收敛性产生作用,不同的社会经济因素存在空间效应差异。经济共同繁荣是环境规制效率提高的基础,形成经济协同发展和环境规制效率协同提高的空间合力是黄河流域兰西城市群高质量发展的必然选择。然而由于数据资料的限制使得本研究存在一定的研究不足:一方面本研究主要侧重从县(区)尺度的工业污染排放数据测度环境规制效率,而未能有效深入到企业和行业层面综合测度环境规制效率,这将导致环境规制效率测算的全面性受到影响;另一方面本研究重点分析黄河流域兰西城市群范围内的环境规制效率演变特征,而未从流域的尺度有效考虑黄河流域兰西城市群与外部周边区域所存在的要素交流对环境规制效

率的影响。以上的不足之处也将是后续研究需要深化的领域和方向。

参考文献(References):

- [1] 曾刚, 胡森林. 技术创新对黄河流域城市绿色发展的影响研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(8): 1314-1323. [Zeng Gang, Hu Senlin. Impact of technological innovation on urban green development in the Yellow River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(8): 1314-1323.]
- [2] 邓祥征, 杨开忠, 单菁菁, 等. 黄河流域城市群与产业转型发展[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(2): 273-289. [Deng Xiangzheng, Yang Kaizhong, Shan Jingjing et al. Urban agglomeration and industrial transformation and development in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 273-289.]
- [3] 贾卓, 杨永春, 赵锦瑶, 等. 黄河流域兰西城市群工业集聚与污染集聚的空间交互影响[J]. *地理研究*, 2021, 40(10): 2897-2913. [Jia Zhuo, Yang Yongchun, Zhao Jinyao et al. The spatial correlation and interaction between industrial agglomeration and pollution agglomeration of Lanzhou-Xining urban agglomeration in the Yellow River Basin. *Geographical Research*, 2021, 40(10): 2897-2913.]
- [4] 田光辉, 苗长虹, 胡志强, 等. 环境规制、地方保护与中国污染密集型产业布局[J]. *地理学报*, 2018, 73(10): 1954-1969. [Tian Guanghui, Miao Changhong, Hu Zhiqiang et al. Environmental regulation, local protection and the spatial distribution of pollution-intensive industries in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 1954-1969.]
- [5] 刘研华, 王宏志. 我国环境规制效率的变化趋势及对策研究[J]. *生态经济*, 2009, 26(11): 172-175. [Liu Yanhua, Wang Hongzhi. Research on the efficiency evolution trend and countermeasures of environmental regulation. *Ecological Economy*, 2009, 26(11): 172-175.]
- [6] 崔学刚, 方创琳, 张蕾. 京津冀城市群环境规制强度与城镇化质量的协调性分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(4): 563-575. [Cui Xuegang, Fang Chuanglin, Zhang Qiang. Coordination between environmental regulation intensity and urbanization quality: Case study of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(4): 563-575.]
- [7] Tang D, Tang J, Xiao Z et al. Environmental regulation efficiency and total factor productivity—Effect analysis based on Chinese data from 2003 to 2013[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 312-318.
- [8] 陶静, 胡雪萍. 环境规制对中国经济增长质量的影响研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(6): 85-96. [Tao Jing, Hu Xueping. Research on the effects of environmental regulation on the quality of China's economic growth. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(6): 85-96.]
- [9] 薄文广, 徐玮, 王军锋. 地方政府竞争与环境规制异质性: 逐底竞争还是逐顶竞争[J]. *中国软科学*, 2018(11): 76-93. [Bo Wenguang, Xu Wei, Wang Junfeng. Local government compet-

- ition and environmental regulation heterogeneity: Race to the bottom or race to the top? *China Soft Science*, 2018(11): 76-93.]
- [10] 徐成龙, 任建兰, 程钰. 山东省环境规制效率时空格局演变及影响因素[J]. *经济地理*, 2014, 34(12): 35-40. [Xu Chenglong, Ren Jianlan, Cheng Yu. Influence factors and temporal-spatial evolution of environmental regulation efficiency in Shandong province. *Economic Geography*, 2014, 34(12): 35-40.]
- [11] 任梅, 王小敏, 刘雷, 等. 中国沿海城市群环境规制效率时空变化及影响因素分析[J]. *地理科学*, 2019, 39(7): 1119-1128. [Ren Mei, Wang Xiaomin, Liu Lei et al. Spatio-temporal change and influencing factors of environmental regulation in China's coastal urban agglomerations. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(7): 1119-1128.]
- [12] 程钰, 任建兰, 陈延斌, 等. 中国环境规制效率空间格局动态演变及其驱动机制[J]. *地理研究*, 2016, 35(1): 123-136. [Cheng Yu, Ren Jianlan, Chen Yanbin et al. Spatial evolution and driving mechanism of China's environmental regulation efficiency. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 123-136.]
- [13] 李佳佳, 罗能生. 中国区域环境效率的收敛性、空间溢出及成因分析[J]. *软科学*, 2016, 30(8): 1-5. [Li Jiajia, Luo Nengsheng. Analysis of convergence, spatial spillover effects and causes of Chinese regional environmental efficiency. *Soft Science*, 2016, 30(8): 1-5.]
- [14] 朴胜任. 省际环境效率俱乐部收敛及动态演进分析[J]. *管理评论*, 2020, 32(8): 52-62. [Piao Shengren. Analysis of convergence of provincial environmental efficiency of China and dynamic processes. *Management Review*, 2020, 32(8): 52-62.]
- [15] 邓远建, 杨旭, 马强文, 等. 中国生态福利绩效水平的地区差距及收敛性[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(4): 132-143. [Deng Yuanjian, Yang Xu, Ma Qiangwen et al. Regional disparity and convergence of China's ecological welfare performance level. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(4): 132-143.]
- [16] Camarero M, Castillo J, Picazo-Tadeo A J et al. Eco-efficiency and convergence in OECD countries[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2013, 55(1): 87-106.
- [17] 张华. 地区间环境规制的策略互动研究[J]. *中国工业经济*, 2016(7): 74-90. [Zhang Hua. Strategic interaction of regional environmental regulation. *China Industrial Economics*, 2016(7): 74-90.]
- [18] 赵玉民, 朱方明, 贺立龙. 环境规制的界定、分类与演进研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, 19(6): 85-90. [Zhao Yumin, Zhu Fangming, He Lilong. Definition, classification and evolution of environmental regulations. *China Population, Resources and Environment*, 2009, 19(6): 85-90.]
- [19] Fredriksson P G, Millimet D L. Strategic interaction and the determinants of environmental policy across U.S. States[J]. *Journal of Urban Economics*, 2002, 51(1): 101-122.
- [20] 黄志基, 贺灿飞, 杨帆, 等. 中国环境规制、地理区位与企业生产率增长[J]. *地理学报*, 2015, 70(10): 1581-1591. [Huang Zhiji, He Canfei, Yang Fan et al. Environmental regulation, geographic location and growth of firms' productivity in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(10): 1581-1591.]
- [21] 刘瑜, 姚欣, 龚咏喜, 等. 大数据时代的空间交互分析方法和应用再论[J]. *地理学报*, 2020, 75(7): 1523-1538. [Liu Yu, Yao Xin, Gong Yongxi et al. Analytical methods and applications of spatial interactions in the era of big data. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(7): 1523-1538.]
- [22] 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. [Wang Yantao, Zhang Yaya. Regional difference of ecological efficiency and its interactive spatial spillover effect with industrial structure upgrading. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1276-1284.]
- [23] 周侃, 李会, 申玉铭. 京津冀地区县域环境胁迫时空格局及驱动因素[J]. *地理学报*, 2020, 75(9): 1934-1947. [Zhou Kan, Li Hui, Shen Yuming. Spatiotemporal patterns and driving factors of environmental stress in Beijing-Tianjin-Hebei region: A county-level analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(9): 1934-1947.]
- [24] 高新才, 殷颂葵. 兰州西宁城市群经济效率测度[J]. *城市问题*, 2018(5): 46-52. [Gao Xincan, Yin Songkui. Economic efficiency measurement of Lanzhou-Xining urban agglomeration. *Urban Problems*, 2018(5): 46-52.]
- [25] 方创琳. 黄河流域城市群形成发育的空间组织格局与高质量发展[J]. *经济地理*, 2020, 40(6): 1-8. [Fang Chuanglin. Spatial organization pattern and high-quality development of urban agglomeration in the Yellow River Basin. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 1-8.]
- [26] 杨永春, 张旭东, 穆焱杰, 等. 黄河上游生态保护与高质量发展的基本逻辑及关键对策[J]. *经济地理*, 2020, 40(6): 9-20. [Yang Yongchun, Zhang Xudong, Mu Yanjie et al. The basic logic and core strategies of ecological protection and high-quality development in the upper reaches of the Yellow River. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 9-20.]
- [27] 马海涛, 徐植钤. 黄河流域城市群高质量发展评估与空间格局分异[J]. *经济地理*, 2020, 40(4): 11-18. [Ma Haitao, Xu Xuanfang. High-quality development assessment and spatial heterogeneity of urban agglomeration in the Yellow River Basin. *Economic Geography*, 2020, 40(4): 11-18.]
- [28] 贾卓, 强文丽, 王月菊, 等. 兰州-西宁城市群工业污染集聚格局及其空间效应[J]. *经济地理*, 2020, 40(1): 68-75+84. [Jia Zhuo, Qiang Wenli, Wang Yueju et al. The spatial characteristics and spatial effect of industrial pollution agglomeration in Lanzhou-Xining urban agglomeration. *Economic Geography*, 2020, 40(1): 68-75+84.]
- [29] Smith S R, Salamon L M, Lund M S. Beyond privatization: The tools of government action[J]. *Political Science Quarterly*, 1989, 105(1): 168.
- [30] 朱向东, 贺灿飞, 李茜, 等. 地方政府竞争、环境规制与中国城市空气污染[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(6): 103-110.

- [Zhu Xiangdong, He Canfei, Li Qian et al. Influence of local government competition and environmental regulations on Chinese urban air quality. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(6): 103-110.]
- [31] 贾卓, 陈兴鹏, 李晨曦, 等. 兰州-西宁城市群人口集聚格局及影响因素[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 436-442. [Jia Zhuo, Chen Xingpeng, Li Chenxi et al. Spatial pattern of population aggregation of Lanzhou-Xining urban agglomeration in western China and its influence factors. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2019, 55(4): 436-442.]
- [32] 车磊, 白永平, 周亮, 等. 中国绿色发展效率的空间特征及溢出分析[J]. 地理科学, 2018, 38(11): 1788-1798. [Che Lei, Bai Yongping, Zhou Liang et al. Spatial pattern and spillover effects of green development efficiency in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(11): 1788-1798.]
- [33] 李小平, 李小克. 中国工业环境规制强度的行业差异及收敛性研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(10): 1-9. [Li Xiaoping, Li Xiaoke. Study on the differences and convergence of industry environment regulation intensity in China. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(10): 1-9.]
- [34] 杨振, 敖荣军, 王念, 等. 中国环境污染的健康压力时空差异特征[J]. 地理科学, 2017, 37(3): 339-346. [Yang Zhen, Ao Rongjun, Wang Nian et al. Spatio-temporal difference characteristic of pollution's health stress of China. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(3): 339-346.]
- [35] Sala-i-Martin X. The classical approach to convergence analysis[J]. *The Economic Journal*, 1996, 106(437): 1019-1036.
- [36] 杨桐彬, 朱英明, 王念, 等. 长三角城市生态效率的地区差异与空间收敛[J]. 华东经济管理, 2020, 34(7): 28-35. [Yang Tongbin, Zhu Yingming, Wang Nian et al. Regional differences and spatial convergence of urban ecological efficiency in the Yangtze River Delta. *East China Economic Management*, 2020, 34(7): 28-35.]
- [37] 张新林, 仇方道, 谭俊涛, 等. 中国工业生态效率时空分异特征及其影响因素解析[J]. 地理科学, 2020, 40(3): 335-343. [Zhang Xinlin, Qiu Fangdao, Tan Juntao et al. Spatial pattern change and influencing factors of China's industrial eco-efficiency. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(3): 335-343.]
- [38] 常明, 奚云霄, 马冰然, 等. 中国“十二五”期间环境规制效率时空差异与驱动机制研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(7): 860-863. [Chang Ming, Xi Yunxiao, Ma Bingran et al. Driving forces and temporal-spatial difference of environmental regulation efficiency in China during the 12th Five-Year-Plan period. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(7): 860-863.]
- [39] 臧传琴, 吕杰. 环境规制效率的区域差异及其影响因素[J]. 山东财经大学学报, 2018, 30(1): 35-43. [Zang Chuanqin, Lv Jie. Regional difference in environmental regulation efficiency and its influencing factors. *Journal of Shandong University of Finance and Economics*, 2018, 30(1): 35-43.]
- [40] 程钰, 徐成龙, 任建兰. 中国环境规制效率时空演化及其影响因素分析[J]. 华东经济管理, 2015, 29(9): 79-84. [Cheng Yu, Xu Chenglong, Ren Jianlan. An analysis on spatial-temporal evolution of Chinese environmental regulation efficiency and its influencing factors. *East China Economic Management*, 2015, 29(9): 79-84.]
- [41] 胡达沙, 李杨. 环境效率评价及其影响因素的区域差异[J]. 财经科学, 2012(4): 116-124. [Hu Dasha, Li Yang. Assessment of environmental efficiency and regional distinction of its influencing factors. *Finance & Economics*, 2012(4): 116-124.]
- [42] 甘肃省统计局. 甘肃发展年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011-2019. [Gansu Statistical Bureau. *Gansu development yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2011-2019.]
- [43] 青海省统计局. 青海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011-2019. [Qinghai Statistical Bureau. *Qinghai statistical yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2011-2019.]
- [44] 王姣娥, 杜德林. 东北振兴以来地区经济发展水平演化及空间分异模式[J]. 地理科学, 2016, 36(9): 1320-1328. [Wang Jiaoe, Du Delin. The evolution of economic development level in Northeast China and its spatial differentiation mode since 2003. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(9): 1320-1328.]
- [45] 王松茂, 褚玉静, 郭安禧, 等. “一带一路”沿线重点省份旅游经济高质量发展研究[J]. 地理科学, 2020, 40(9): 1505-1512. [Wang Songmao, Chu Yujing, Guo Anxi et al. Study on high quality development of tourism economy in 18 key provinces along the One Belt and One Road Initiative: Based on the measurement of tourism resource conversion efficiency. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(9): 1505-1512.]
- [46] 马大来, 陈仲常, 王玲. 中国区域创新效率的收敛性研究: 基于空间经济学视角[J]. 管理工程学报, 2017, 31(1): 71-78. [Ma Dalai, Chen Zhongchang, Wang Ling. Research on convergence of regional innovation efficiency in China: based on the perspective of spatial econometric. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2017, 31(1): 71-78.]
- [47] 高鸣, 宋洪远. 中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异[J]. 经济地理, 2015, 35(4): 142-148+185. [Gao Ming, Song Hongyuan. Dynamic changes and spatial agglomeration analysis of the Chinese agricultural carbon emissions performance. *Economic Geography*, 2015, 35(4): 142-148+185.]
- [48] 侯孟阳, 姚顺波. 空间视角下中国农业生态效率的收敛性与分异特征[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(4): 116-126. [Hou Mengyang, Yao Shunbo. Convergence and differentiation characteristics on agro-ecological efficiency in China from a spatial perspective. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(4): 116-126.]
- [49] 孙瑜康, 孙铁山, 席强敏. 北京市创新集聚的影响因素及其空间溢出效应[J]. 地理研究, 2017, 36(12): 2419-2431. [Sun Yukang, Sun Tieshan, Xi Qiangmin. Influence factors and spillover effect of the innovation agglomeration in Beijing. *Geographical Research*, 2017, 36(12): 2419-2431.]
- [50] 贾卓, 陈兴鹏. 中国西部兰州-西宁城市群县域经济集聚格局与空间溢出研究[J]. 兰州大学学报(社会科学版), 2019, 47(2): 144-151. [Jia Zhuo, Chen Xingpeng. Research on county eco-

- conomic agglomeration pattern and spatial spillover in Lanzhou-Xining urban agglomeration in western China. *Journal of Lanzhou University(Social Sciences)*, 2019, 47(2): 144-151.]
- [51] 苏聪文, 邓宗兵, 李莉萍, 等. 中国水生态文明发展水平的空间格局及收敛性[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(5): 1282-1301. [Su Congwen, Deng Zongbing, Li Liping et al. Spatial pattern evolution and convergence of water eco-civilization development index in China. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(5): 1282-1301.]
- [52] 陆铭, 冯皓. 集聚与减排: 城市规模差距影响工业污染强度的经验研究[J]. *世界经济*, 2014, 37(7): 86-114. [Lu Ming, Feng Hao. Agglomeration and emission reduction: Empirical study on the impact of urban scale disparity on industrial pollution intensity. *The Journal of World Economy*, 2014, 37(7): 86-114.]

Spatial Pattern and Spatial Convergence of Environmental Regulation Efficiency of Lanzhou-Xining Urban Agglomeration in the Yellow River Basin

Jia Zhuo^{1,2}, Zhao Jinyao¹, Yang Yongchun^{1,2}, Chen Xingpeng^{1,2}

(1. *College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China*; 2. *Ministry of Education Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

Abstract: Ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin have been included in the major national strategy in 2019, which is a major strategic deployment to promote the construction of ecological civilization in China. Urban agglomeration is an important carrier of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. However, industrial development not only promotes the economic and social prosperity of urban agglomeration, but also leads to the increase of pollutant emissions. Environmental regulation efficiency plays an important role in promoting the construction of ecological civilization and high-quality development in the Yellow River Basin. Lanzhou-Xining urban agglomeration is an important industrial core area and environmental key area in the Yellow River Basin. Taking Lanzhou-Xining urban agglomeration as the research area, it is reasonable and representative to study the spatial characteristics and convergence of environmental regulation efficiency. Based on the county panel data of Lanzhou-Xining urban agglomeration in the Yellow River Basin from 2010 to 2018, spatial analysis technology and spatial convergence model are used to analyze the pattern of environmental regulation efficiency and its spatial convergence. The results show that: 1) Environmental regulation efficiency has the spatial pattern of “high in the center and low in the edges”, and the environmental regulation efficiency shows the transformation from “large gap and low intensity” to “small gap and high intensity”. 2) Environmental regulation efficiency has spatial dependence. Hot spot-cold spot of environmental regulation efficiency and the high-low level of economic development have spatial overlap. 3) Environmental regulation efficiency has a significant spatial convergence. When the socio-economic factors and spatial factors are considered, the convergence trend of environmental regulation efficiency is enhanced, and the spatial differences of environmental regulation efficiency among counties in urban agglomeration area are gradually narrowing over time. 4) Economic level, government intervention, industrialization rate and population density have positive effects to the convergence trend of environmental regulation efficiency, while energy consumption intensity has negative effects to the convergence trend of environmental regulation efficiency.

Key words: Lanzhou-Xining urban agglomeration; environmental regulation efficiency; spatial convergence model; spillover effect; the Yellow River Basin