

黄河流域绿色创新效率空间格局演化及其影响因素

许玉洁¹, 刘曙光^{1,2}

(1. 中国海洋大学经济学院, 青岛 266100;

2. 教育部人文社会科学重点研究基地海洋发展研究院, 青岛 266100)

摘要: 绿色创新作为培育经济增长新动能, 是促进黄河流域生态保护和高质量发展的重要动力。采用网络DEA模型测度2003—2018年黄河流域79市(州、盟)绿色创新效率, 进而运用核密度估计、重心—标准差椭圆分析效率的空间演化规律, 采用空间计量模型探究其影响因素。结果表明: (1) 黄河流域绿色创新效率水平较低, 但表现为波动上升的时间趋势; (2) 绿色创新效率具有显著的空间非均衡性, 呈现出“下游>上游>中游”的空间分异格局, 效率重心整体向东南方向移动, 表现出南北方向相对稳定、东西方向集聚发展的趋势; (3) 黄河流域绿色创新效率存在正向的空间溢出效应, 人均收入、产业结构、师资力量、外资利用和环境规制是影响绿色创新效率的重要因素。

关键词: 绿色创新效率; 空间格局演化; 网络DEA模型; 空间计量分析; 黄河流域

黄河流域是东方人类文明的发源地, 孕育了中华民族的原始经济体系, 是我国重要的生态屏障和经济地带^[1]。近年来, 相对脆弱的生态本底环境, 过度的资源消耗对流域经济可持续发展形成了巨大挑战。习近平总书记在党的十九大报告中明确指出要“坚定不移地贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念”, 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上提出“创新体制机制”“坚持绿色发展”的目标任务, 为新时代通过绿色创新指导黄河流域高质量发展提供了战略指引。黄河流域作为具有内部复杂相互作用的地域系统^[2], 协调好系统经济与环境关系成为破解博弈困境、实现流域可持续发展的关键^[3]。

20世纪80年代, 自Brundtland^[4]在《我们共同的未来》报告中提出可持续发展模式以来, 经济发展与资源环境的约束问题开始受到学术界的广泛关注, 其中Nordhaus^[5]开创性的构建气候变化评估模型对经济发展进行动态预测, Romer^[6]将技术进步纳入内生增长模型破解经济增长的资源环境约束。21世纪, 以Cooke^[7]为代表的经济学家则将绿色发展与创新系统结合起来, 从资源节约、环境保护等多个视角开展绿色创新研究^[8]。虽然由于学科的交叉性尚未出现统一的定义, 但基本认同绿色创新是在新颖性和价值性特征基础上, 实现了资源节约和环境保护的创新行为^[9]。国外实证研究主要关注产业和企业层面的绿色创新行为, 探讨绿色创新能力的表征指标和评价方法^[10], 研究绿色创新在环境政策工具、研发支出和人力资本^[11]等方面提升路径。

国内关于绿色和创新的研究早期集中在绿色技术创新领域, 探讨通过采用节约资

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-06-24

基金项目: 国家社会科学基金项目(18VSJ067); 国家社会科学基金重大项目(15ZDB170)

作者简介: 许玉洁(1990-), 女, 山东菏泽人, 博士研究生, 研究方向为区域创新与国际经济合作。

E-mail: xuyujie1122@163.com

通讯作者: 刘曙光(1966-), 男, 山东夏津人, 博士, 教授, 研究方向为区域创新与国际经济合作。

E-mail: 2000046@ouc.edu.cn

源、减少环境污染的技术以实现经济的可持续发展^[12]。此后,绿色技术创新朝着更广泛的着眼于人与自然协调的绿色创新发展,并沿以下三条主线进行拓展分析。一是探讨绿色创新的内涵与本质^[13],开展绿色创新系统研究^[14];二是利用以DEA和SFA为代表的两类模型测算绿色创新效率^[15,16],分析效率演进的空间格局^[17];三是从环境规制^[18]、外商投资^[19]和影子经济^[20]等角度检验绿色创新效率的影响机制,探索绿色创新效率的提升路径。尽管绿色创新效率的研究方法已较为完善,但其实证对象主要集中在全国层面、东部沿海地区和长江经济带,对黄河流域的关注集中于资源利用与环境保护^[21],尤其黄河流域高质量发展^[22,23]问题成为了研究热点。如金凤君^[24]、杨永春等^[25]、任保平等^[26]从整体角度探讨了黄河流域高质量发展的内涵、基本条件和战略思想,提出了探寻新型产业和城镇发展模式、完善法律制度支撑和建立跨区域协调机制等高质量发展的推进策略。也有少数学者从绿色科技或技术创新等角度研究黄河流域高质量发展,如刘贝贝等^[27]分析了黄河流域省级绿色科技创新发展现状,提出了绿色科技创新在黄河国家战略中的实现路径;罗巍等^[28]采用了科技集中度与极化度模型,归纳了黄河流域省级科技创新极化效应的演变趋势。

综上,从绿色创新角度探讨黄河流域高质量发展的文章相对缺乏,已有从科技或技术创新角度进行黄河流域高质量发展的研究侧重于现状描述,缺乏对绿色创新提升路径的实证检验,且以省域尺度为基本单元进行的分析难以把握绿色创新的核心空间应对策略,有必要以地级市为尺度选择指标构建,进行服务于黄河流域经济发展和生态文明建设的绿色创新效率实证检验。基于此,本文将绿色和创新纳入可持续发展系统分析框架,运用网络SBM-DEA模型测度2003—2018年间黄河流域地级市层面的绿色创新效率,采用空间计量模型对流域绿色创新效率的影响因素进行检验,最后提出创新效率的提升路径,为黄河流域在经济持续变化的环境中保持竞争优势、实现高质量发展提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山,横跨我国东、中、西三大区域,由东营注入渤海,流域面积为79.5万km²。截至2019年末,黄河流域总人口为4.81亿,地区生产总值为23.57万亿元,分别占全国的27.03%和23.79%,在全国经济发展格局中占有重要地位。本文以黄河自然流经地区为主体,考虑流域各地区经济和生态联系,排除已纳入长江经济带的四川省和广义上属于东北地区的内蒙古蒙东地区,基于数据指标的可得性和准确性,最终选取青海、甘肃、陕西、宁夏、内蒙古、山西、河南和山东8省(自治区)79个地级市(州、盟)作为研究区域。进一步借鉴相关研究成果^[29],参考《黄河年鉴》以内蒙古河口镇和河南省桃花峪作为上中游和中下游分界线,将研究区域划分为黄河流域上中下游。上游包括:青海西宁,甘肃兰州、嘉峪关、金昌、白银、武威、张掖、酒泉、定西和陇南,宁夏各市,内蒙古呼和浩特、包头、鄂尔多斯、巴彦淖尔、乌兰察布和乌海。中游包括:甘肃天水、平凉、庆阳,陕西各市,山西各市,河南三门峡、洛阳和焦作。下游包括:河南郑州、开封、平顶山、安阳、鹤壁、新乡、濮阳、许昌、漯河、南阳、商丘、信阳、周口和驻马店,山东各市。

1.2 研究方法

1.2.1 绿色创新效率测算

网络SBM-DEA模型。DEA是一种通过分析投入和产出大小来判断决策单元有效性的非参数估计方法，具有不需要人为设定函数形式、可用于多投入和多产出模型测算的优点^[30]。Charnes等^[31]在Farrel^[32]的研究基础上提出了第一个DEA-CCR模型，该模型基于规模报酬不变的假设下测算决策单元的综合效率；Banker等^[33]提出了规模报酬可变的DEA-BCC模型，用以不同规模评价单元之间的比较，为克服将系统看作“黑箱”而忽略内部运行机制的问题；Färe等^[34]提出了网络DEA模型，将生产过程分解为通过中间产出链接的若干阶段，进而对系统运行的各阶段和整体效率进行测算，但该模型仍然要求投入和产出同比例调整，且未考虑松弛变量的影响。针对这一问题，Tone等^[35]在目标函数中引入松弛变量，提出了纳入非期望产出的非角度、非径向的网络SBM-DEA模型，本文采用该模型将绿色创新的生产过程分为科技研发和成果转化前后关联的两个阶段，其中科技研发阶段是利用创新资源实现创新产出的过程，成果转化是将创新产出投入市场实现经济和环境产出过程。

本文借鉴Tone等^[35]的研究，采用包含 n 个决策单元 $DMU_j (j=1, \dots, n)$ 、2个节点的绿色效率 ($k=1, 2$)，设 m_k 表示第 k 个节点投入个数 (个)； r_{1k} 和 r_{2k} 分别表示期望产出和非期望产出的个数 (个)； x_j^k 表示第 j 个决策单元在节点 k 的投入值， $x_j^k \in R^{m_k}$ ； y_j^k 表示第 j 个决策单元在节点 k 的产出值，其中 y_j^{1k} 表示期望产出， y_j^{2k} 表示非期望产出， $y_j^{1k} \in R^{r_{1k}}$ 、 $y_j^{2k} \in R^{r_{2k}}$ ；第1个节点到第2个节点的关系为(1, 2)， $z^{(1,2)}$ 表示连接变量；用 θ_j 表示决策单元 j 的整体绿色创新效率，采用产出角度的模型，则决策单元 j 的最有效率 θ_j^* 表达式如下：

$$\theta_j^* = \min 1 / \sum_{k=1}^2 w^k \left[1 + \frac{1}{r_{1k} + r_{2k}} \left(\sum_{r=1}^{r_k} \frac{s_r^{k+}}{y_{r_j}^{1k}} + \sum_{r=1}^{r_k} \frac{s_r^{2k-}}{y_{r_j}^{2k}} \right) \right] \quad (1)$$

公式满足如下约束：

$$\begin{aligned} x^k &= \sum_{j=1}^n x_j^k \lambda_j^k + s^{k-} \\ y^{1k} &= \sum_{j=1}^n y_j^{1k} \lambda_j^k - s^{k+} \\ y^{2k} &= \sum_{j=1}^n y_j^{2k} \lambda_j^k + s^{2k-} \\ z^{(1,2)} &= \sum_{j=1}^n z_j^{(1,2)} \lambda_j^1; z^{(1,2)} = \sum_{j=1}^n z_j^{(1,2)} \lambda_j^2 \\ \sum_{k=1}^2 w^k &= \sum_{j=1}^n \lambda_j^k = 1 \\ \lambda_j^k &\geq 0, s^{k-} \geq 0, s^{k+} \geq 0, w^k \geq 0, (\forall j, k) \end{aligned} \quad (2)$$

式中： λ_j^k 表示决策单元 j 在第 k 阶段的投入和产出组合的权重向量， k 分别取值1、2； w^k 为第 k 阶段的权重，大小由其重要性决定； s^{k-} 和 s^{2k-} 为第 k 阶段的投入和非期望产出冗余； s^{k+} 表示第 k 阶段的期望产出不足。当 $\theta_j^*=1$ 时，表示整体绿色创新是有效率的。

定义 θ_j^k 为决策单元 j 的各阶段绿色创新效率, 表达式为:

$$\theta_j^k = 1 / \left[1 + \frac{1}{r_{1k} + r_{2k}} \left(\sum_{r=1}^{r_k} \frac{s_{r_j}^{k+*}}{y_{r_j}^{1k}} + \sum_{r=1}^{r_k} \frac{s_{r_j}^{2k-*}}{y_{r_j}^{2k}} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $s_{r_j}^{k+*}$ 、 $s_{r_j}^{2k-*}$ 为式 (1) 中的最优产出松弛变量。定义整体效率为各阶段效率的加权平均值, 产出角度整体绿色创新效率 θ^* 为:

$$\theta^* = 1 / \sum_{k=1}^2 \frac{w_k}{\theta_j^k} \quad (4)$$

1.2.2 空间非均衡分析

(1) 核密度估计。核密度估计^[36]是一种非参数估计方法, 主要用来刻画随机变量的分布形式, 它从数据本身的特点进行函数拟合分布, 避免了人为设定函数形式可能造成的误差, 具有传统估计不可比拟的优势, 目前已经成为研究区域经济和生态差异及动态演进的常用方法^[37], 其表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k \left(\frac{X_i - x}{h} \right) \quad (5)$$

式中: X_i 表示观测值; x 表示观测值的平均值; $k(\cdot)$ 表示函数形式, 本文选取高斯核函数; n 表示样本观测值的个数 (个); h 表示带宽, h 取值越大, 估计的核密度函数越平滑, 但拟合偏差也越大, 本文根据均方误差最小的原则选择最优带宽。

(2) 重心—标准差椭圆分析。标准差椭圆最早由 Lefever^[38]于 1926 年提出, 是一种表征地理要素空间分布特征的分析方法, 包括重心坐标、旋转角、长轴和短轴标准差四个基本参数, 分别表示地理要素的主要空间位置、发展趋势以及在主要和次要方向上的离散程度^[39], 计算公式如下:

平均重心:

$$G(X, Y) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \times x_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \times y_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \right] \quad (6)$$

方位角:

$$\tan \theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{y}_i^2 \right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{y}_i^2 \right)^2 + 4 \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i^2 \tilde{y}_i^2}}{2 \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i} \quad (7)$$

长短轴标准差:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \tilde{x}_i \cos \theta - \omega_i \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i \tilde{x}_i \sin \theta - \omega_i \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2}} \quad (8)$$

式中: $G(X, Y)$ 表示绿色创新效率的重心坐标; (x_i, y_i) 表示研究区域的空间区位; ω_i 表示权重; $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 分别表示各研究对象区位到平均中心的坐标偏差; σ_x 、 σ_y 分别表示沿

X轴、Y轴的标准差。

1.3 指标选取与数据来源

本文依据绿色创新效率网络DEA评价要求，参照已有权权威文献相关指标的选取，结合数据的客观性、可得性原则，构建绿色创新效率评价的投入产出指标体系。第一阶段为科技研发阶段，在新古典增长模型和内生增长模型中，劳动和资本均为创新系统中的基本要素，因此选取科学技术支出、教育支出作为绿色创新资本投入，科技服务人员、普通高等学校在校学生作为绿色创新人员投入。资源投入方面，受限于各城市缺乏煤炭、石油、天然气消费总量数据，选取供电总量作为能源投入，另外考虑到黄河流域经济发展依水而生，社会生产对水资源的依赖性较强，选取供水总量作为资源投入。对于创新产出，由于地市级层面专利数据的缺失，采用北京大学企业大数据研究中心发布的中国创新创业区域指数中的发明专利、实用新型和外观专利得分，它所采用企业的全量微观大数据避免了宏观数据的滞后性，因而更具有创新产出的代表性意义，鉴于三项专利创新程度高低不一，参考白俊红^[40]的做法，对发明专利、实用新型和外观设计三种专利分别赋予0.5、0.3和0.2的权重，采用三种专利得分的加权平均来表示。第二阶段为成果转化阶段，选取地区生产总值表征经济产出，考虑到黄河流域资源粗放利用带来的水土流失和荒漠化问题，以绿地面积表征技术创新的期望环境产出，选取工业废水、工业二氧化硫和工业烟（粉）尘排放量作为非期望环境产出（表1）。

因我国工业废水、二氧化硫排放量等环境治理数据自2003年开始统计，且多数数据更新截至2018年，本文考虑实证数据的可行性选取2003—2018年为研究时段。投入和产出指标数据来源于2004—2019年的《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》，各省市统计年鉴和统计公报，部分缺失数据采用插值法进行填补。对于科学技术支出、教育支出、地区生产总值等受价格波动影响的变量，采用以2003年为基期的价格指数进行了平减处理。

表1 黄河流域绿色创新效率投入—产出指标体系
Table 1 Green innovation efficiency input-output index system in the Yellow River Basin

阶段	类别	具体指标	指标名称	单位
第一阶段	投入指标	资金投入	科学技术支出	万元
			教育支出	万元
		劳动投入	科技服务人员	人
			普通高等学校在校学生	人
	中间指标	资/能源投入	全社会用电量	万kW·h
			供水总量	万t
		创新产出（投入）	发明专利	分
			实用新型	分
			外观专利	分
第二阶段	产出指标	经济产出	地区生产总值	万元
			绿地面积	hm ²
		环境产出	工业废水排放量	万t
			工业二氧化硫排放量	t
			工业烟（粉）尘排放量	t

2 结果分析

2.1 黄河流域绿色创新效率分析

2.1.1 绿色创新效率测度

运用MaxDEA软件对2003—2018年黄河流域79地级市(州、盟)进行效率测算,得到各地区绿色创新效率以及科技研发和成果转化两个分阶段效率均值,如图1所示。

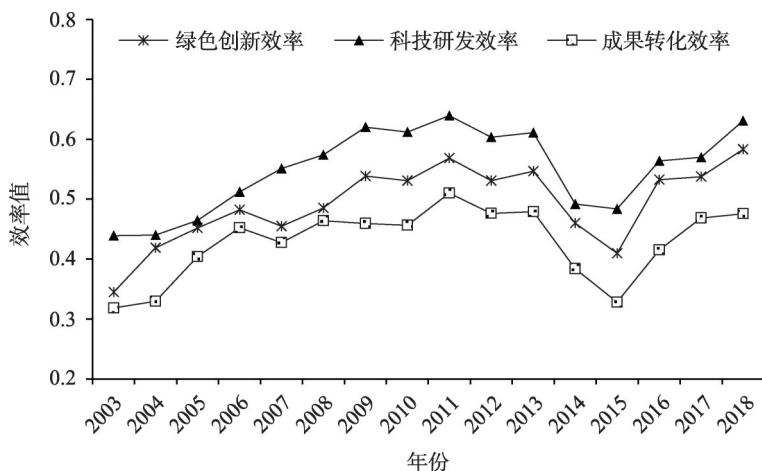


图1 2003—2018年黄河流域绿色创新效率

Fig. 1 Green innovation efficiency in the Yellow River Basin during 2003-2018

2003—2018年,黄河流域各地区绿色创新效率均值为0.49,仍存在51%的改善空间。就时间趋势而言,绿色创新效率整体呈现出波动上升趋势,从2003年的0.34上升至2018年的0.58,上升幅度为70.58%。样本期间黄河流域绿色创新效率的波动趋势可大致分为三个阶段,2003—2011年为缓慢上升阶段,2012—2015年为波动下降阶段,2016—2018年为迅速回升阶段。就分阶段效率值而言,黄河流域各地区成果转化效率小于科技研发效率,均值分别为0.43和0.55,两阶段效率均呈现波动上升趋势,变动趋势与绿色创新效率基本保持一致。就效率差值而言,2003年成果转化与科技研发效率的差值为0.12,此后两阶段效率差值逐渐增大至2010年的0.23,此后呈现波动下降趋势,2018年两阶段效率差值降至0.17。

2.1.2 绿色创新效率空间非均衡分析

(1) 绿色创新效率空间非均衡性分析

采用高斯核密度估计法得到各地区效率值的核密度分布,绘制2003—2018年的核密度分布图,如图2所示。从位置上看,核密度分布曲线随时间整体向右偏移,表明黄河流域绿色创新效率呈现出逐渐上升的趋势。从形态上看,绿色创新效率核密度曲线呈现出典型的双峰分布,主峰和次峰峰值差距明显,表明黄河流域绿色创新效率存在一定程度的分级,即存在

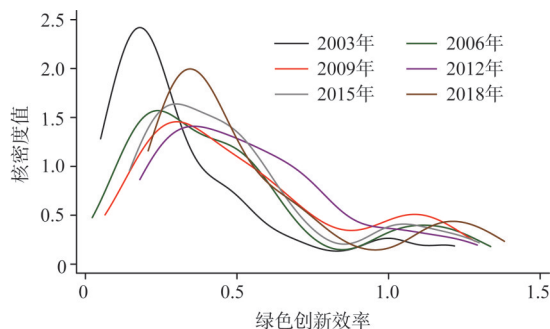


图2 2003—2018年黄河流域绿色创新效率核密度分布

Fig. 2 Kernel density distribution of green innovation efficiency in the Yellow River Basin during 2003-2018

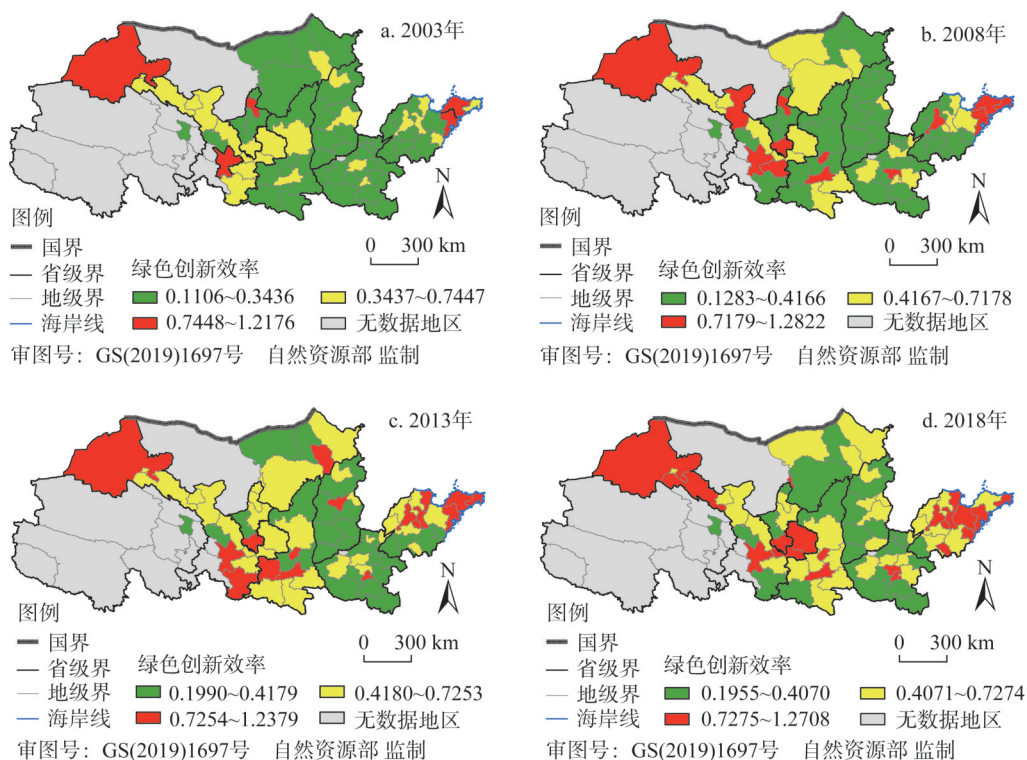
较为明显的空间非均衡性。从峰度上来看,核密度曲线主峰高度波动降低,且效率变化区间存在减少趋势,表明黄河流域绿色创新效率地区差异有所减小。

(2) 绿色创新效率空间非均衡特征分析

为进一步分析黄河流域绿色创新效率空间差异性,运用ArcGIS 10.5软件对各地区2003年、2008年、2013年和2018年绿色创新效率进行分析,采用自然断点法将效率值划分为高值区、中值区和低值区三种类型(图3)。

从地级市层面来看,2003—2018年黄河流域各地区绿色创新效率在0.11~1.30之间波动,定西、固原、青岛和威海效率均值大于1,且青岛历年均处于有效状态,商丘、大同、安阳和长治效率值最低,历年均值不足0.20。各年有效地区数量保持在3~12个之间,其中2003年有效地区数量最少,占地级市总数的3.80%,随后有效地区数量逐渐增加,2018年DEA有效地区数量已增至地级市总数的10.13%。对比2003年,2018年中等级和高等级地区数量有所增加,低等级地区数量则大幅下降,创新效率转移路径以由低等级向高等级转移为主。其中许昌、乌海、聊城、莱芜和渭南绿色创新效率值上升幅度最大;高等级向低等级转移的地区仅有9个,下降幅度最大的五个地区分别为银川、陇南、天水、商丘和呼和浩特。

从省级层面来看,2003—2018年绿色创新效率均值存在显著的地区差异,根据均值大小可将其分为三类,高效率省份(取值为(0.6, 1])为山东,中效率省份(取值为(0.4, 0.6])排序由高至低依次是甘肃、宁夏、陕西、内蒙古,低效率省份(取值(0,



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改,下同。

图3 2003年、2008年、2013年和2018年黄河流域绿色创新效率空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of green innovation efficiency in the Yellow River Basin in 2003, 2008, 2013 and 2018

0.4)] 排序由高至低依次是河南、山西和青海。就变动趋势而言,甘肃、内蒙古、陕西、河南、山东、宁夏绿色创新效率呈现为跨越式上升态势,其中内蒙古和河南由低效率地区转移至中效率地区,两地区效率上升幅度均在90%以上,陕西由低效率省份转移至高效率省份,甘肃、山东和宁夏由中效率地区转移至高效率地区,山西和青海绿色创新效率变动幅度较小,仍保持原有效率等级。

从地带层面来看,黄河流域上中下游的绿色创新效率存在显著差异,效率均值分别为0.49, 0.43和0.56,整体呈现出流域下游>上游>中游的空间分异格局(图4)。样本期内黄河流域上中下游地区绿色创新效率呈现出波动上升趋势,上游和中游地区效率的变动幅度(73.01%和90.00%)显著大于下游地区的变动幅度(38.36%)。2003—2011年间,上中下游地区的绿色创新效率均呈现波动上升态势,2008年下游地区实现了对上游地区绿色创新效率的全面超越;2012—2015年间,上中下游地区绿色创新效率表现为不同程度的下降趋势,其中上游地区变动较为平稳,中下游地区的下降幅度较大;2016—2018年间,上中下游地区的绿色创新效率均有所反弹,最终呈现出效率值下游>上游>中游空间分异格局,对比2003年,2018年上中下游地区的绿色创新效率差异缩小趋势。

(3) 绿色创新效率空间格局演进分析

通过重心—标准差椭圆来分析黄河流域绿色创新效率的空间格局演进特征,根据式(6)~式(8),借助ArcGIS 10.5软件计算效率的空间标准差椭圆相关参数(表2),并绘制2003—2018年黄河流域绿色创新效率的空间格局演进图(图5)。

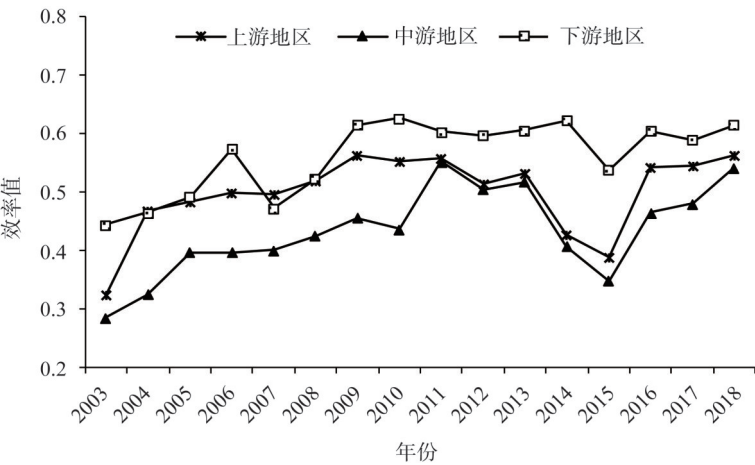


图4 2003—2018年黄河流域上中下游绿色创新效率

Fig. 4 Green innovation efficiency in the upper, middle and lower reaches of the Yellow River Basin during 2003-2018

表2 黄河流域绿色创新效率分布格局重心和标准差椭圆参数

Table 2 Standard deviation ellipse parameter of the distribution pattern of green innovation efficiency in the Yellow River Basin

年份	X轴标准差/km	Y轴标准差/km	方向角/(°)	重心坐标X	重心坐标Y
2003	9.29	2.89	94.95	110.64°E	36.62°N
2008	7.63	2.98	96.26	111.33°E	36.38°N
2013	8.07	2.97	93.36	111.24°E	36.42°N
2018	8.56	2.85	95.60	111.18°E	36.39°N

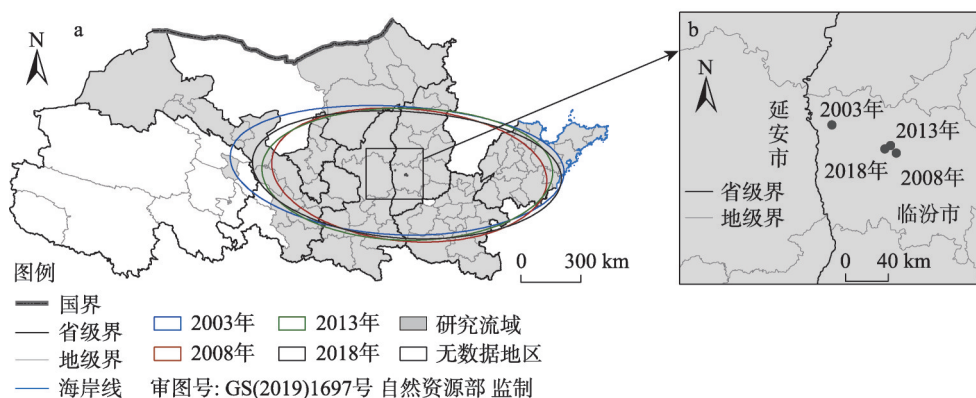


图5 黄河流域绿色创新效率重心轨迹与标准差椭圆

Fig. 5 Green innovation efficiency center trajectory and standard deviation ellipse of the Yellow River Basin

重心变化分析。2003—2018年的绿色创新效率重心在 $111.64^{\circ}\sim 111.33^{\circ}\text{E}$ 、 $36.38^{\circ}\sim 36.62^{\circ}\text{N}$ 之间分布。从重心移动轨迹可以看出，2003—2008年重心向东南方向移动，移动距离为67.16 km，表明黄河流域中下游地区绿色创新效率显著提升；2008—2013年重心向西北方向移动，移动距离较小，仅为5.71 km，表明黄河流域中上游地区绿色创新效率稍有回升；2013—2018年重心稍向西南方向移动，移动距离为3.93 km，表明陕西、甘肃等地区绿色创新效率持续提升。整体而言，黄河流域绿色创新效率重心显著向东南方向移动，总移动距离为54.57 km，表明下游地区绿色创新效率的提升显著高于上游地区。

标准差椭圆分析。2003—2018年绿色创新效率主要覆盖黄河流域中南部地区，包括宁夏、陕西、山西、河南和山东等地，长轴标准差始终大于短轴标准差，绿色创新效率空间分布以西北—东南方向为主导。长轴标准差整体呈缩小趋势，表明黄河流域绿色创新效率在东西方向呈现出集聚趋势，短轴标准差变化幅度较小，说明黄河流域绿色创新效率在南北方向的集散状态保持相对稳定，因此椭圆面积表现为下降趋势，即绿色创新效率的地区差异呈现出缩小态势。由表2可知，转角呈现出波动上升趋势，其中2003—2008年转角由 94.95° 升至 96.26° ，2008—2018年转角先波动下降，最终升至 95.60° ，椭圆整体呈顺时针方向转动，黄河流域绿色创新效率呈现出越发显著的西北—东南空间分布格局。

2.2 绿色创新效率影响因素分析

2.2.1 模型设定

由于黄河流域各市绿色创新存在一定的地理空间依赖性，而建立在空间独立性假设下的传统计量模型难以将空间特性纳入其中，因此本文采用空间计量模型对绿色创新效率的主要因素进行分解。在构建模型前需采用Moran's I 检验绿色创新效率是否具有空间依赖性，公式如下：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

式中： y_i 代表*i*地区的绿色创新效率； \bar{y} 代表所有地区绿色创新效率均值； n 代表研究地区数（个）； w_{ij} 代表空间权重矩阵，考虑到地区之间空间关联性随地理距离衰减，本

文选取反地理距离来构建空间权重矩阵。Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$, 绝对值越大表明绿色创新效率的空间相关性越强。检验存在空间效应的基础上进一步构建空间面板计量模型, 研究周边地区被解释变量对研究地区存在溢出效应, 考虑以下三种情况:

(1) 空间依赖性以被解释变量滞后项的形式来体现, 即空间滞后模型 (SLM):

$$y = \lambda Wy + X\beta + \varepsilon \quad (10)$$

(2) 空间依赖性通过误差项的形式来体现, 即空间误差模型 (SEM):

$$y = X\beta + u, u = \rho Wu + \varepsilon \quad (11)$$

(3) 空间依赖性通过解释变量和被解释变量滞后项的形式共同体现, 即空间杜宾模型 (SDM):

$$y = \lambda Wy + X\beta + WX\delta + \varepsilon \quad (12)$$

式中: y 表示绿色创新效率; W 代表研究单元的空间权重矩阵; X 代表效率影响因素矩阵; β 和 δ 为待估系数; λ 和 ρ 为空间相关系数; ε 为随机扰动项。

2.2.2 影响机理与变量选取

绿色创新是多主体、多因素相互作用的复杂系统, 其影响因素不仅来自创新主体, 还要考虑系统内外的创新环境因素。实证研究也表明绿色创新效率影响因素众多, 故本文结合已有研究成果^[41,42]与黄河流域自身特点, 将绿色创新效率的影响因素划分为经济因素、科技因素和制度因素三个层面 (表3), 其中经济因素是绿色创新的基础, 科技因素是绿色创新的动力, 制度因素是绿色创新的保障。

经济发展水平, 考虑经济平均产出和经济产出结构两个方面, 选取人均收入水平、产业结构予以表征。第一, 绿色创新过程根植于具有不同经济本底条件的流域地理环境中, 创新主体的引育、创新产出和创新成果的转化与应用, 均与创新过程所依赖的经济产出条件密切相关。良好的经济产出条件提供更完备的基础设施、科技研发条件和高效的市场交易体系, 有利于吸引和培育企业、高校、科研院所和人才等创新主体, 增进主体间的知识交互与溢出, 集聚平台创新优势, 便捷创新成果的转化及社会化应用。第二, 通常认为, 工业是高耗能、高排放产业, 而服务业是无烟经济、绿色行业, 地区绿色创新主要依赖于服务业, 也有学者^[43]指出服务业未必具有绿色环保的行业特性, 各地区产业结构不同使得绿色创新带动作用往往存在地区差异。

科技运行环境, 考虑国内和国际两个方面, 选取金融发展水平和对外开放水平 (交通便利度和实际利用外资水平) 进行表征。第一, 完善金融体系可以为企业创新研发活

表3 黄河流域绿色创新效率影响因素

Table 3 Influencing factors of green innovation efficiency in the Yellow River Basin

影响层面	影响因素	变量简称	衡量指标	单位
经济发展水平	人均收入水平	PGDP	人均GDP	元
	产业结构	INDU	第二产业产值/GDP	%
		SERV	第三产业产值/GDP	%
科技运行环境	金融发展水平	FINA	金融机构存贷款余额	元
	对外开放水平	ROAD	人均城市道路面积	m ²
		WZ	实际利用外资	元
政府制度导向	师资力量	TEAC	普通高等学院专任教师数	人
	环境规制强度	ENVI	(工业固体废物综合利用率+污水集中处理率)/2	%

动提供资金支持，还可以为投资人分散相应的风险，促进创新资源在市场范围内的合理配置，事实上只有与实体经济结构相配的金融体系才能有效发挥上述功能^[44]。第二，便利的交通有利于地区内外绿色创新人才和资源要素的流动，可能推动该地区要素聚集，周边地区产生创新溢出效应，也可能产生创新要素向发展环境好、行政效率高的地区流动，形成虹吸效应，交通条件对绿色创新的影响需要综合考虑两方面的效应^[45]。第三，外商投资可以弥补本地资金不足问题，有利于创新要素流通，带来先进的管理模式和营销经验，进而促进绿色创新效率的提升，但同时也会带来竞争效应，产生低端锁定^[46]。

政府制度导向，考虑投入和产出两个方面，选取师资力量和环境规制予以表征。第一，技术进步是推动绿色创新发展的重要动力，而教育是推动技术进步的必要路径，科技人才的培养、科技创新力的激发离不开教育的力量，教育制度也成为政府支持力度的重要方面。第二，环境规制对绿色创新的影响机制包括“遵循成本说”和“波特假说”两类。在环境政策实施的起始阶段，环境成本较低难以起到创新激励作用，“遵循成本说”认为环境规制增加的治理成本会挤占创新投资，不利于绿色创新效率的提升。随着环境规制强度的进一步提高，污染成本上升倒逼企业实行技术创新，“波特假说”认为合理的外部环境规制长期可以抵消环境规制成本，从而实现区域环境效益和经济效益的双赢，有利于促进绿色创新效率^[47]。

综合以上分析，考虑数据的可得性和准确性，选取经济发展水平、科技运行环境和政府规制三类共八种绿色创新效率影响指标进行实证分析，所有数据均来自于2004—2019年《中国城市统计年鉴》。

2.2.3 空间计量模型的检验与识别

根据反地理距离空间权重矩阵，运用式（9）对2003—2018年黄河流域绿色创新效率进行Moran's *I*指数计算，结果如表4，除2005年和2017年效率值未通过5%的莫兰指数检验外，其他年份均通过了显著性检验，表明黄河流域绿色创新效率整体存在显著的空间正相关性。

为对空间计量模型进行识别，应采取以下检验步骤。首先，进行LM检验判断SLM或SEM模型的适应性，结果显示两者LM检验值在1%的水平上显著，但SLM模型的稳健LM检验值为无法通过5%的显著性检验，表明SEM更为适宜。其次，进行Hausman检验判断模型采用固定效应或随机效应，结果强烈拒绝原假设，表明固定效应模型更为合

表4 2003—2018年黄河流域绿色创新效率Moran's *I*检验结果

Table 4 Moran's <i>I</i> test results of green innovation efficiency in the Yellow River Basin during 2003-2018					
年份	<i>I</i>	<i>Z</i>	年份	<i>I</i>	<i>Z</i>
2003	0.048***	4.037	2011	0.026***	2.560
2004	0.027***	2.604	2012	0.017**	1.967
2005	0.010*	1.478	2013	0.043***	3.665
2006	0.054***	4.399	2014	0.068***	5.337
2007	0.024***	2.439	2015	0.042***	3.599
2008	0.026***	2.572	2016	0.013**	1.670
2009	0.026***	2.527	2017	0.010*	1.499
2010	0.025***	2.457	2018	0.034***	3.050

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的统计水平上显著，下同。

适。最后，进行LR检验，判断是否可以用SDM模型来代替SEM模型，结果显示SDM模型可以退化为SEM模型；同时检验模型个体固定效应、时间固定效应和双向固定效应的适用性，结果表明个体固定效应更为合适。综合以上检验结果，本文选取最佳拟合的个体固定效应的SEM模型进行黄河流域影响因素分析，设定模型为：

$$EFFI_{it} = \alpha_1 PGDP_{it} + \alpha_2 INDU + \alpha_3 SERV + \alpha_4 FINA + \alpha_5 ROAD + \alpha_6 WZ + \alpha_7 TEAC_{it} + \alpha_8 ENVI + u_{it},$$
$$u_{it} = \rho \sum_{j=1}^N W_{ij} u_{jt} + \varepsilon_{it}$$

(13)

式中： $EFFI_{it}$ 为绿色创新效率； $\alpha_1 \sim \alpha_8$ 为待估系数； W_{ij} 为权重矩阵； ρ 为矩阵系数； ε_{it} 为随机误差项；为消除异方差对 $PGDP_{it}$ 、 $FINA_{it}$ 、 $TEAC_{it}$ 、 $ROAD_{it}$ 、 WZ_{it} 进行对数化处理。

2.2.4 结果分析

运用Stata 15软件对黄河流域整体及上中下游地区绿色创新效率的影响因素进行空间面板回归分析，结果见表5。全流域空间回归系数 ρ 显著为正，表明黄河流域绿色创新效率存在实质性的空间溢出效应，整体而言本地区对邻近地区的绿色创新效率具有正向影响关系。然而绿色创新效率的空间依赖性在上中下游地区表现并不一致，中游和下游地区对临近地区绿色创新具有正向影响关系，上游地区对邻近地区绿色创新具有负向影响关系。原因是各地区既可通过技术合作、资源合理配置等提升绿色创新效率，也在资金、劳动

表5 绿色创新效率影响因素空间面板回归结果
Table 5 Spatial panel regression results of influencing factors in green innovation efficiency

解释变量	全流域	上游	中游	下游
<i>PGDP</i>	0.361*** (0.049)	0.262*** (0.054)	0.371*** (0.012)	0.503*** (0.039)
<i>INDU</i>	-0.006*** (0.001)	-0.010*** (0.002)	-0.004** (0.002)	0.009** (0.005)
<i>SERV</i>	0.004** (0.002)	0.007*** (0.002)	0.001** (0.001)	-0.003* (0.002)
<i>FINA</i>	-0.005 (0.001)	-0.015 (0.010)	-0.018 (0.015)	0.029 (0.037)
<i>ROAD</i>	-0.001 (0.001)	0.003 (0.002)	-0.013 (0.014)	0.004 (0.003)
<i>WZ</i>	0.018** (0.009)	0.013* (0.007)	0.014** (0.007)	-0.016*** (0.004)
<i>TECH</i>	0.026** (0.013)	0.137** (0.057)	0.075*** (0.020)	0.019** (0.009)
<i>ENVI</i>	0.002*** (0.000)	0.004*** (0.001)	0.003* (0.002)	0.001** (0.001)
ρ	0.452*** (0.083)	-0.242** (0.115)	0.368*** (0.107)	0.417*** (0.095)
Sigma_2e	0.038*** (0.002)	0.052*** (0.004)	0.032*** (0.002)	0.040*** (0.003)
R^2	0.31	0.28	0.25	0.34

注：括号内为标准差。

力、能源投入等方面存在一定的竞争关系。当前我国创新资源地区分布不平衡,黄河流域中下游地区经济发展水平较高,创新要素相对充足,加之相对完善的市场化创新激励机制,地区间较易形成正向影响关系,而上游地区经济发展落后,创新资源相对匮乏,发展较好地区虹吸周边地区创新资源,从而形成上游地区的负向空间溢出效应。

经济发展水平方面。第一,人均收入水平回归系数为正且通过了1%的显著性检验,表明其对绿色创新效率起到正向影响作用。地区整体收入水平提升,创新人才的吸引力度增大,企业融资能力增强,地区创新效率得以提升。分地区而言,黄河流域下游地区的人均收入水平回归系数高于全流域及中上游地区,原因是经济发达地区绿色创新意识相对较强,创新基础设施、人才制度等方面也已形成相对完善的体系,具备更强的创新资源配置和产出能力。第二,第二产业结构回归系数为负,第三产业结构的回归系数为正,且均通过了5%的显著性检验,表明对黄河流域绿色创新起带动作用主要是第三产业。但上述影响在各地区的表现不完全一致,上游和中游地区第三产业发展更有利于绿色创新水平的提升,而下游地区绿色创新的提升主要来自第二产业。一般而言,服务业较制造业更具有绿色发展特性,尤其是内蒙古、山西等中上游地区经济依赖使用非清洁能源的制造业,具有较高的“三废”非期望产出水平,制造业难以起到促进该地区绿色发展的作用;下游地区服务业的绿色创新影响并不显著,原因是山东、河南两地区作为农业大省,对生产性服务业的需求相对较低,其第三产业主体为生活性服务业,而对经济发展质量起到显著作用的往往是生产性服务业^[48]。

科技运行环境方面。第一,金融发展水平回归结果不显著,表明黄河流域金融发展水平并未对地区绿色创新起显著影响作用。原因是资金和人力作为绿色创新的决定性要素,在企业创新中作用的发挥依赖完善的融资体系,但黄河流域以商业银行为核心的金融体系具有“所有制歧视”和“规模歧视”的特征,金融错配降低了金融机构分担企业创新活动风险和资源配置能力,难以发挥绿色创新的促进作用^[49]。第二,交通便利度的回归系数不显著,表明提高人均道路面积并不能改善地区绿色创新效率。虽然便利的交通可以降低创新要素流动成本,提高地区间技术合作水平,但也会形成中心城市对周边地区人才、资金的虹吸效应,尤其西安、郑州、银川等中西部地区存在“一市独大”现象,创新要素在同一空间的过度集聚,两种效应共同作用下的交通便利度影响并不显著。第三,实际利用外资水平回归系数为正且通过了5%的显著性检验,表明整体而言其对绿色创新效率起到促进作用。但两者的作用关系表现为显著的空间分异,上游和中游地区回归系数为正,下游地区的回归系数为负,原因是受地理位置和经济发展水平限制,中、上游地区的外资吸引力度相对较低,提高开放水平可以有效促进绿色创新效率的提升,而下游地区青岛、烟台和威海均为外资利用规模大市,对国外资金的过度依赖在一定程度上会阻碍地区自主研发^[50],不利于绿色创新水平的提高。

政府制度导向方面。第一,师资力量的回归系数为正且通过了5%的统计性检验,表明增加师资对于绿色创新水平的提升具有正向影响作用。分地区而言,师资力量对于黄河流域上游的影响显著高于中下游地区。高等教育是科技进步的引擎,对于形成人力资本、提升绿色创新具有突出作用,当前我国教育资源地区分配失衡,尽管近年来国家加大对西部地区的教育投入,甘肃、青海等上游地区各市在获取优质教育资源方面依然存在困难,扩大教育投入对于绿色创新提升的边际效用相对较高。第二,环境规制的回归系数为正且通过了1%的显著性检验,表明环境规制对绿色创新效率起正向影响作用。原因是随着黄

河流域资源环境问题的日益凸显,各流域政府根据上中下游草地退化、水土流失、水污染问题针对性地制定环保政策,企业生产和治理过程持续绿色性改进,环境规制对绿色创新的积极影响凸显,然而回归系数相对较小,也侧面说明当前环境规制处于探索阶段,需要进一步向波特假说的“合适环境规制”改进,以实现创新发展与环境良好的共赢局面。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文首先采用DEA模型对黄河流域绿色创新效率进行测度,进而结合统计学和地理学两个维度分析了绿色创新效率的空间演化规律,弥补了创新效率已有研究缺乏在黄河流域可视化分析的不足,最后采用空间计量模型尝试对黄河流域绿色创新效率的提升路径进行分析,研究得出以下结论:

(1) 2003—2018年黄河流域绿色创新效率均值为0.49,存在较大的效率改善空间,绿色创新科技研发效率略高于成果转化效率,整体效率及分阶段效率均呈波动上升趋势。

(2) 黄河流域绿色创新效率具有显著的空间非均衡性,整体呈现出下游>上游>中游的空间分异格局。绿色创新效率重心逐渐向东南方向移动,流域中下游地区效率提升较为显著;标准差椭圆分布以西北—东南方向为主导,覆盖面积有所下降,各地区绿色创新差异呈现不断缩小的趋势。

(3) 黄河流域绿色创新效率存在正向的空间溢出效应,提高人均收入水平、增加师资投入、加强环境规制会提升全流域及上中下游地区的绿色创新效率,而产业结构、实际利用外资水平对全流域绿色创新效率的正向影响在各流域表现并不一致,因此需要根据各地区发展实际针对性开展效率提升措施。

3.2 讨论

黄河流域生态保护和高质量发展是我国新时期的重大战略举措,提升黄河流域绿色创新效率、优化黄河流域绿色创新效率空间协调水平,对实现黄河流域生态养护与修复、推动黄河流域经济增长方式由粗放向高质量转变具有重要意义。基于此,结合实证研究结果,本文提出如下建议:

(1) 加快黄河流域经济发展,引导地区产业转型升级。协调经济发展与资源环境关系,因地制宜地探索各地区产业发展模式,打造上游绿色循环产业体系,构建中游清洁低碳型产业结构,推动下游产业链的高端化延伸,推动黄河流域走资源节约型和环境友好型发展战略。

(2) 适度扩大对外开放水平,增强地区外资利用效率。优化营商环境,加大中上游地区的外资吸引力度,同时增强自主创新研发能力,调整下游流域对外开放方式,避免过度外资依赖,形成流域开放与绿色创新发展的良性互动机制。

(3) 加大落后地区教育投入,优化教师队伍结构。打破黄河流域地理分割和行政壁垒,促进教育资源向甘肃、青海等地区的合理流动,协调地区教育力量差异,充分发挥教育对高质量发展的支撑作用。

(4) 动态调整环境规制,制定适宜的环境政策。加强环保宣传力度,尤其提高中游资源型城市环境保护意识,规范执行环境标准,同时充分考虑企业的环境治理成本,为企业提供适当的环境治理技术和资金支持。

绿色创新效率的空间非均衡性为多种因素和主体共同作用的结果,囿于数据限制,本文未对效率的所有影响因素进行完备性研究,仅探讨了关键性因素。且由于创新数据在地级市(州、盟)层面的缺失,本文对黄河流域绿色创新的研究仅包含主要地区,未来将对流域全样本展开更具有时效性和更充分的探讨。

参考文献(References):

- [1] 习近平. 决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利: 在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告. 北京: 人民出版社, 2017: 58-59. [XI J P. To Finish Building a Moderately Prosperous Society in all Aspects and Win the Great Victory of Socialism with Chinese Characteristics for the New Era: Report at the 19th National Congress of the Communist Party of China. Beijing: People's Publishing House, 2017: 58-59.]
- [2] 陈才, 刘曙光. 区域经济地理学方法论建设初探. 地理研究, 1999, 18(1): 2-7. [CHEN C, LIU S G. An initial approach to the construction of methodology in regional economic geography. Geographical Research, 1999, 18(1): 2-7.]
- [3] SEMAN N A A, GOVINDAN K, MARDANI A, et al. The mediating effect of green innovation on the relationship between green supply chain management and environmental performance. Cleaner Production, 2019, 229: 115-127.
- [4] BRUNTLAND G H. Our common future: Report of the world commission of environment and development. International Affairs, 1987, 64(1): 126.
- [5] NORDHAUS W D. To slow or not to slow: The economics of the greenhouse effect. Economic Journal, 1991, 101(407): 920-937.
- [6] ROMER P M. Increasing returns and long-run growth. The Journal of Political Economy, 1986, 94(5): 1002-1037.
- [7] COOKE P. Regional innovation systems: Development opportunities from the "green turn". Technology Analysis & Strategic Management, 2010, 22(7): 831-844.
- [8] HORBACH J. Determinants of environmental innovation: New evidence from German panel data sources. Research Policy, 2006, 37(1): 163-173.
- [9] SCHIEDERIG T, TIETZE F, HERSTATT C. Green innovation in technology and innovation management: An exploratory literature review. R & D Management, 2012, 42(2): 180-192.
- [10] GUPTA H, BARUA M K. Supplier selection among SMEs on the basis of their green innovation ability using BWM and fuzzy TOPSIS. Journal of Cleaner Production, 2017, 152: 242-258.
- [11] GERRARD J, KANDLIKAR M. Is European end-of-life vehicle legislation living up to expectations? Assessing the impact of the ELV directive on "green" innovation and vehicle recovery. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(1): 17-27.
- [12] 龚建立, 王飞绒, 王存波. 政府在中小企业绿色技术创新中的地位和作用. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(1): 114-117. [GONG J L, WANG F R, WANG C B. The position and role of government in environment in technology innovation. China Population, Resources and Environment, 2002, 12(1): 114-117.]
- [13] 李旭. 绿色创新相关研究的梳理与展望. 研究与发展管理, 2015, 27(2): 1-11. [LI X. Analysis and outlook of the related researches on green innovation. R&D Management, 2015, 27(2): 1-11.]
- [14] 丁堃. 论绿色创新系统的结构和功能. 科技进步与对策, 2009, 26(15): 116-119. [DING K. On the structure and function of green innovation system. Science & Technology Progress and Policy, 2009, 26(15): 116-119.]
- [15] 冯志军. 中国工业企业绿色创新效率研究. 中国科技论坛, 2013, (2): 82-88. [FENG Z J. Research on green innovation efficiency of Chinese industrial enterprises. Forum on Science and Technology in China, 2013, (2): 82-88.]
- [16] 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. 自然资源学报, 2019, 34(2): 312-324. [XIAO L M, ZHANG X P. Spatio-temporal characteristics of coupling coordination between green innovation efficiency and ecological welfare performance under the concept of strong sustainability. Journal of Natural Resources, 2019, 34(2): 312-324.]
- [17] 曹霞, 于娟. 绿色低碳视角下中国区域创新效率研究. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 10-19. [CAO X, YU J. Regional innovation efficiency in China from the green low-carbon perspective. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 10-19.]
- [18] 康鹏辉, 茹少峰. 环境规制的绿色创新双边效应. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(10): 93-104. [KANG P H, RU S F.

- Bilateral effects of environmental regulation on green innovation. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(10): 93-104.]
- [19] 龚新蜀, 李梦洁, 张洪振. OFDI是否提升了中国的工业绿色创新效率: 基于集聚经济效应的实证研究. *国际贸易问题*, 2017, (11): 127-137. [GONG X S, LI M J, ZHANG H Z. Does OFDI improve the efficiency of industrial green innovation in China: An empirical study based on the effect of agglomeration economy. *Journal of International Trade*, 2017, (11): 127-137.]
- [20] 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. *经济地理*, 2019, 39(7): 184-193. [KUANG C E, WEN Z Z, PENG W B. The threshold effect of shadow economy on green innovation efficiency. *Economic Geography*, 2019, 39(7): 184-193.]
- [21] 汪芳, 苗长虹, 刘峰贵, 等. 黄河流域人居环境的地方性与适应性: 挑战和机遇. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 1-26. [WANG F, MIAO C H, LIU F G, et al. The locality and adaptability of human settlements in the Yellow River Basin: Challenges and opportunities. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 1-26.]
- [22] 汪芳, 苗长虹. 系统性、整体性与协同性: 黄河流域高质量发展的思维与策略: 写在专辑刊发之后的话. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 270-272. [WANG F, MIAO C H. Systematization, integrity and coordination: Thinking and strategy of high quality development in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 270-272.]
- [23] 刘曙光, 许玉洁, 王嘉奕. 江河流域经济系统开放与可持续发展关系: 国际经典案例及对黄河流域高质量发展的启示. *资源科学*, 2020, 42(3): 433-445. [LIU S G, XU Y J, WANG J Y. Relationship between river basin economic system opening-up and sustainable development: International experiences and implications for the Yellow River Basin high-quality development. *Resources Science*, 2020, 42(3): 433-445.]
- [24] 金凤君. 黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略. *改革*, 2019, (11): 33-39. [JIN F J. Coordinated promotion strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. *Reform*, 2019, (11): 33-39.]
- [25] 杨永春, 穆焱杰, 张薇. 黄河流域高质量发展的基本条件与核心策略. *资源科学*, 2020, 42(3): 409-423. [YANG Y C, MU Y J, ZHANG W. Basic conditions and core strategies of high-quality development in the Yellow River Basin. *Resources Science*, 2020, 42(3): 409-423.]
- [26] 任保平, 张倩. 黄河流域高质量发展的战略设计及其支撑体系构建. *改革*, 2019, (10): 26-34. [REN B P, ZHANG Q. Strategic design and supporting system construction of high quality development in the Yellow River Basin. *Reform*, 2019, (10): 26-34.]
- [27] 刘贝贝, 左其亭, 刁艺璇. 绿色科技创新在黄河流域生态保护和高质量发展中的价值体现及实现路径. *资源科学*, 2021, 43(2): 423-432. [LIU B B, ZUO Q T, DIAO Y X. The value and pathways of green technology innovation for the ecological conservation and high-quality development of the Yellow River Basin. *Resources Science*, 2021, 43(2): 423-432.]
- [28] 罗巍, 杨玄酷, 杨永芳. 面向高质量发展的黄河流域科技创新空间极化效应演化研究. *科技进步与对策*, 2020, 37(18): 44-51. [LUO W, YANG X Z, YANG Y F. Research on the evolution of spatial polarization effect of scientific and technological innovation in the Yellow River Basin for high quality development. *Science & Technology Progress and Policy*, 2020, 37(18): 44-51.]
- [29] 郭付友, 佟连军, 仇方道, 等. 黄河流域生态经济走廊绿色发展时空分异特征与影响因素识别. *地理学报*, 2021, 76(3): 726-739. [GUO F Y, TONG L J, QIU F D, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and influencing factors of green development in the eco-economic corridor of the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 726-739.]
- [30] 邓洪波, 陆林. 基于DEA模型的安徽省城市旅游效率研究. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 313-323. [DENG H B, LU L. Study on urban tourism efficiency of Anhui province based on DEA model. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 313-323.]
- [31] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [32] FARREL M J. The measurement of productive efficiency. *Journal of Royal Statistical Society*, 1957, 120: 253-281.
- [33] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 1984, 30(9): 1078-1092.
- [34] FÄRE R, GROSSKOP F S. Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2000, 34(1): 35-49.

- [35] TONE K, TSUTSUI M. Network DEA: A slacks-based measure approach. *European Journal of Operational Research*, 2009, 197(1): 243-252.
- [36] 许瑶, 纪建悦, 许玉洁. 中国养殖海域利用效率空间非均衡格局及成因. *资源科学*, 2020, 42(11): 2158-2169. [XU Y, JI J Y, XU Y J. Spatial disequilibrium of mariculture areas utilization efficiency in China and causes. *Resources Science*, 2020, 42 (11): 2158-2169.]
- [37] 金巍, 刘双双, 张可, 等. 农业生产效率对农业用水量的影响. *自然资源学报*, 2018, 33(8): 1326-1339. [JIN W, LIU S S, ZHANG K, et al. Influence of agricultural production efficiency on agricultural water consumption. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8): 1326-1339.]
- [38] LEFEVER D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse. *The American Journal of Sociology*, 1926, 32(1): 88-94.
- [39] 潘越, 翁钢民, 李聪慧, 等. 基于 D-S 证据理论的“丝绸之路旅游带”5A 景区区位优势度测评. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 297-312. [PAN Y, WENG G M, LI C H, et al. Evaluation on location advantages of 5A-Grade attractions in Silk Road Travel Belt based on the D-S evidence theory. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 297-312.]
- [40] 白俊红, 卞元超. 要素市场扭曲与中国创新生产的效率损失. *中国工业经济*, 2016, (11): 39-55. [BAI J H, BIAN Y C. Factor market distortion and the efficiency losses of chinese innovative production. *China Industrial Economics*, 2016, (11): 39-55.]
- [41] 杨树旺, 吴婷, 李梓博. 长江经济带绿色创新效率的时空分异及影响因素研究. *宏观经济研究*, 2018, (6): 107-117, 132. [YANG S W, WU T, LI Z B. Research on the spatial and temporal differentiation and influencing factors of green innovation efficiency in Yangtze River Economic Belt. *Macroeconomics*, 2018, (6): 107-117, 132.]
- [42] 彭文斌, 文泽宙, 邝嫦娥. 中国城市绿色创新空间格局及其影响因素. *广东财经大学学报*, 2019, 34(1): 25-37. [PENG W B, WEN Z Z, KUANG C E. The spatial pattern and influencing factors of green innovation. *Journal of Guangdong University of Finance & Economics*, 2019, 34(1): 25-37.]
- [43] 庞瑞芝, 王亮. 服务业发展是绿色的吗? 基于服务业环境全要素效率分析. *产业经济研究*, 2016, (4): 18-28. [PANG R Z, WANG L. Is the development of Chinese service industry definitely green? Based on analysis of environmental total factor efficiency of service industry. *Industrial Economics Research*, 2016, (4): 18-28.]
- [44] 李诗琪, 杨晨. 金融发展对绿色创新效率的影响研究. *江西师范大学学报: 哲学社会科学版*, 2018, 51(6): 84-92. [LI S Q, YANG C. On the influences of financial development on green innovation efficiency. *Journal of Jiangxi Normal University: Philosophy and Social Sciences Edition*, 2018, 51(6): 84-92.]
- [45] 周锐波, 刘叶子, 杨卓文. 中国城市创新能力的时空演化及溢出效应. *经济地理*, 2019, 39(4): 85-92. [ZHOU R B, LIU Y Z, YANG Z W. Spatial-temporal evolution and knowledge spillovers of urban innovation in China. *Economic Geography*, 2019, 39(4): 85-92.]
- [46] 刘和东. 中国区域研发效率及其影响因素研究: 基于随机前沿函数的实证分析. *科学学研究*, 2011, 9(4): 548-556. [LIU H D. Research on regional R&D efficiency and its influencing factors: Empirical analysis based on stochastic frontier function. *Studies in Science of Science*, 2011, 9(4): 548-556.]
- [47] PORTER M E, LINDE C V D. Toward a New conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 1995, 9(4): 97-118.
- [48] 曾艺, 韩峰, 刘俊峰. 生产性服务业集聚提升城市经济增长质量了吗? 数量经济技术经济研究, 2019, 36(5): 83-100. [ZENG Y, HAN F, LIU J F. Does the agglomeration of producer services improve the quality of urban economic growth?. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2019, 36(5): 83-100.]
- [49] 康志勇. 金融错配阻碍了中国本土企业创新吗? 研究与发展管理, 2014, 26(5): 63-72. [KANG Z Y. Does financial misallocation block Chinese local enterprises' innovation?. *R&D Management*, 2014, 26(5): 63-72.]
- [50] 高良谋, 马文甲. 开放式创新: 内涵、框架与中国情境. *管理世界*, 2014, (6): 157-169. [GAO L M, MA W J. Open innovation: Connotation, framework and Chinese context. *Management World*, 2014, (6): 157-169.]

Spatial pattern evolution and influencing factors of green innovation efficiency in the Yellow River Basin

XU Yu-jie¹, LIU Shu-guang^{1,2}

(1. School of Economics, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;

2. KRI Institute of Marine Development, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: As a new driving force of economic growth, green innovation is an important engine for promoting ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. This paper uses the network DEA model containing unexpected output to measure the green innovation efficiency of 79 prefecture-level cities (prefectures and leagues) from 2003-2018. Furthermore, it adopts the kernel density estimation and center of gravity-center model and standard deviation ellipse model to examine the spatio-temporal evolution pattern of green innovation efficiency, and explore the influencing factors. The results show that: (1) The green innovation efficiency level in the Yellow River Basin is relatively low, but the efficiency of green innovation, the efficiency of science and technology research and development and the transformation efficiency of innovation achievements show a significant upward trend as the elapse of time. (2) There are significant spatial imbalance of green innovation efficiency in the study area. The efficiency of green innovation in the lower reaches of the basin is higher than that of the upper reaches, and the efficiency of green innovation of the upper reaches is higher than that of the middle reaches. The efficiency center of green innovation is gradually moving towards the southeast, and the efficiency of the middle and lower reaches of the basin is significantly improved. The standard deviation ellipse distribution is dominated by northwest-southeast direction, showing a relatively stable north-south direction and a trend of east-west development. The coverage area of the ellipse declines, and the differences of green innovation among regions are narrowing. (3) The efficiency of green innovation in the basin has a positive spatial spillover effect. Increasing per capita income, increasing teacher input, and strengthening environmental regulations improve the efficiency of green innovation in the entire river basin and the upper, middle and lower reaches. The positive effects of industrial structure and the actual utilization of foreign capital on the green innovation efficiency of the whole basin are not consistent with those of each sub-basin. We should take efficient measures according to the actual development of various regions, such as giving full play to the green innovation driving role of producer services, and opening wider to the outside world.

Keywords: green innovation efficiency; spatial pattern evolution; network DEA model; spatial measurement analysis; Yellow River Basin