

## 专栏:黄河流域生态保护

【特约主持人】苗长虹:国家“万人计划”领军人才

【主持人按语】黄河是中华民族的母亲河,但由于历史上长期的不合理开发和利用,人地关系非常紧张,黄河流域本身是生态脆弱地带,从上游的三江源到黄土高原,生态退化和水土流失都非常严重;华北平原虽然是沃野千里,但黄河防洪安全问题还没有得到根本解决,黄河流域是国家重要农牧业基地和能源重化工基地,但面临着水资源短缺、环境污染严重、人地关系紧张等一系列突出问题,这些问题在新发展阶段如何有效解决,是黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略实施的重点和关键.推动黄河流域生态保护和高质量发展,亟须把全流域、上下游、干支流、左右岸作为一个系统整体统筹起来,协同推进流域生态、经济和文化一体化建设.在论文《黄河流域生态效率与产业结构转型驱动作用研究》中,作者采用非期望产出的超效率SBM模型对黄河流域地级市生态效率进行测算,构建空间杜宾模型分析产业结构转型、科技创新、城镇化等因素对生态效率的影响,揭示了黄河流域生态效率的时空动态和产业结构合理化、产业结构高级化等因素的驱动作用,可为促进流域生态文明建设和经济高质量发展提供理论支撑.在论文《黄河上游流域径流变化特征与归因分析研究》中,作者基于黄河上游头道拐水文站多年月尺度径流量数据,采用多元线性回归等方法,评估了气候变化和人类活动对黄河上游植被变化和径流变化的贡献率,可为黄河上游应对气候变化和保护修复生态系统提供科学依据.

# 黄河流域生态效率与产业结构转型驱动作用研究

杨东阳<sup>a</sup>,张晗<sup>a</sup>,苗长虹<sup>a,b</sup>,王相彪<sup>a</sup>,张静<sup>a</sup>

(河南大学 a.黄河文明与可持续发展研究中心暨黄河文明省部共建协同创新中心;

b.地理与环境学院,河南 开封 475001)

**摘要:**生态效率作为度量区域可持续发展状况的综合指标,能反映出经济发展与资源环境的耦合协调水平.探讨黄河流域生态效率时空动态及产业结构转型对其驱动影响,可为黄河流域生态文明建设和经济高质量发展提供科学支撑.采用非期望产出超效率SBM模型对2009—2018年黄河流域地级市生态效率进行测算,将产业结构转型分解为产业结构合理化和产业结构高度化两个维度,并构建空间杜宾模型分析产业结构转型、科技创新、城镇化水平等因素对生态效率的影响.结果表明:黄河流域生态效率和产业结构高级化整体呈上升态势,下游地区生态效率较高、产业结构相对合理;产业结构合理化、产业结构高级化、科技创新、对外开放等对生态效率表现出正向影响,城镇化水平对生态效率表现出负向影响.黄河流域应持续推进产业结构转型,提升科技创新和对外开放水平,同时应注重城镇化向资源节约集约、生态环境保护方向的根本性转变.

**关键词:**生态效率;产业结构转型;Super-SBM模型;黄河流域

**中图分类号:**K902

**文献标志码:**A

收稿日期:2022-03-28;修回日期:2022-05-21.

基金项目:国家自然科学基金(42171186);河南大学研究生教育创新与质量提升计划项目(SYL20060171).

作者简介:杨东阳(1988—),男,河南杞县人,河南大学讲师,博士,硕士生导师,主要研究方向为地理建模与可持续性.

通信作者:张晗(1998—),女,湖北咸宁人,研究方向为区域发展与产业转型,E-mail:1838840413@qq.com.

改革开放以来,中国经济快速发展,城镇化与工业化持续推进,中国经济和社会发展成就辉煌,但生态环境问题逐渐成为经济发展的瓶颈.为扭转生态环境不断恶化的状况,我国迎来了生态纪元,在注重经济发展质量的同时强调生态环境保护.黄河流域作为我国重要的生态屏障和经济带,在我国生态安全和社会经济高质量发展中具有十分重要的地位<sup>[1]</sup>.黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略,明确黄河流域要走生态保护与高质量发展相结合的道路.目前黄河流域整体发展滞后、产业结构单一、资源消耗过度、污染严重等问题已经成为黄河流域发展不平衡、自身发展不充分的突出表现,并且黄河流域本身存在水土流失、沙漠化、水资源有限等脆弱的自然生态本底,因此关注黄河流域产业转型过程中的生态效率问题显得十分有必要.生态效率作为度量可持续发展状况的综合性指标<sup>[2]</sup>,能够反映出经济发展与资源环境的耦合协调状况<sup>[3]</sup>.产业结构作为社会经济体系的主要组成部分,对不同产业间劳动力、资本、技术、能源等都有着巨大的影响<sup>[4]</sup>,目前已有部分研究证实产业结构升级对生态效率改善有显著正向作用,可以有效提高资源使用效率,降低污染排放,改善环境质量<sup>[5-7]</sup>.因此,探讨黄河流域生态效率及其演变,揭示黄河流域产业转型过程对城市生态效率的影响,对支撑黄河流域高质量发展具有重要的现实意义.

## 1 文献综述

关于生态效率,国内外学者做了大量研究,研究主题包括生态效率概念解析<sup>[8]</sup>、时空分析<sup>[9-10]</sup>、影响因素<sup>[11]</sup>等,研究涉及行业、区域和国家多个尺度.在生态效率的时空分析方面,关伟等<sup>[12]</sup>利用非期望产出 SBM 模型对中国 1997—2012 年省际能源生态效率进行测度,从空间格局规模、格局强度和格局纹理三个方面分析能源生态效率的时空演变规律,发现全国生态效率总体呈现 U 型演变格局,且有明显的全局和局部集聚特征.王胜鹏等<sup>[13]</sup>利用非期望产出的 Super-SBM 模型计算黄河流域 2000—2016 年旅游生态效率的时空演变,并利用 VAR 模型,构建旅游生态效率和旅游经济发展之间的脉冲响应函数,发现多数省域处于平滑响应态势,前期波动大后期趋于平稳.王圣云等<sup>[14]</sup>将水足迹和灰水足迹指标纳入农业生态效率指标体系之中,利用 SBM 模型衡量 1990—2016 年中国农业生态效率空间演化特征,发现中国农业生态效率明显降低,中国农业生态效率有明显区域特征.阎晓等<sup>[5]</sup>发现产业转型、科技创新、基础设施完善和区位条件对生态效率改善具有显著正向驱动作用,外向型经济、资源依赖和环境规制抑制生态效率提高,城镇化、工业化和外资利用对生态效率演变的影响不显著.对于生态效率的影响因素,已有研究证实了生态效率受到城镇化、工业化、产业结构、科技水平、对外开放等要素的影响.但关于产业转型方面,目前对产业转型的定义更多局限于产业结构升级,没有体现对产业转型含义的深刻理解,如较少同时关注产业结构合理化和产业结构高级化.

产业结构决定了不同产业间劳动力、资本、技术、能源等生产资源的配置<sup>[4]</sup>,对资源转换和污染物的数量和质量有决定性影响<sup>[15]</sup>,是人类影响自然环境的主要环节.因而,产业结构会对生态效率产生重要的潜在影响.在此方面,GROSSMAN 等<sup>[16]</sup>较早探讨了产业结构和生态的关系,并提出了自由贸易对美国本土环境影响的三大效应:规模效应、技术效应和结构效应,其中结构效应便是关于产业结构变迁对生态环境造成的影响.早期研究主要关注单一产业对生态环境的影响.近期相关研究主要集中于生态效率与产业结构两者之间的协调耦合状态以及两者关系的实证研究.例如,ZHANG 等<sup>[17]</sup>利用生态环境影响模数(EIMID)分析 1997—2008 年重庆市 9 个产业亚类对生态环境的整体影响,发现 2002—2008 年重庆市经济发展以生态环境恶化为代价,产业结构变化加剧了人类活动对当地环境的压力;ZHOU 等<sup>[6]</sup>利用 1995 至 2009 年的省级面板数据分析中国产业结构转型与二氧化碳排放的关系,发现产业结构调整的一阶滞后有效降低了污染排放,技术进步本身并没有减少排放,而是通过产业结构的升级和优化间接导致了排放减少,改善了环境质量;马俊等<sup>[7]</sup>认为产业结构高级化会抑制效率水平,而结构合理化会促进生态效率发展;ZHOU 等<sup>[18]</sup>探讨产业结构调整对绿色发展效率的影响,发现产业结构合理化和产业结构先进性都对绿色发展效率有积极影响.也有研究对比分析产业结构合理化和产业升级对绿色发展效率的影响,如顾典等<sup>[19]</sup>定性分析产业结构和生态效率影响机制,利用生态效率和产业结构优化的相关模型,证实产业升级对生态效率确有促进作用,然后利用莫兰指数和空间自回归

模型分析全国东中西部分析两者之间关系的空间相关性和滞后性,发现西部生态效率滞后性强于东部、中部地区。

综上,关于生态效率及其与产业转型关系的研究已有重要进展,主要集中于产业结构单因素对生态效率影响的研究,但仍有一些不足之处,如没有同时考虑产业结构合理化和产业结构高级化及科技创新与产业结构的协同作用。鉴于此,本文以黄河流域为研究区域,首先利用非期待产出 SBM 测算出黄河流域地级市生态效率,分析其时空变化过程;进而,将产业转型分解为产业结构合理化和产业结构高度化两个维度,引入产业结构合理化与科技创新交互项,产业结构高级化与科技创新交互项,并考虑制度质量指标,构建空间杜宾模型,探究产业转型对生态效率的影响。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究区域

黄河流域范围涉及青海、四川、甘肃、宁夏回族自治区、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等 9 省区,区域内有兰西城市群、关中平原城市群、宁夏沿黄城市群、呼包鄂榆城市群、晋中城市群、中原城市群及山东半岛城市群。考虑到各城市群的空间范围,本文研究区主要为青海省海东市、西宁市,内蒙古的巴彦淖尔市、包头市、鄂尔多斯市、呼和浩特市、乌海市、乌兰察布市,以及甘肃省,宁夏回族自治区,山西省,陕西省,河南省及山东省,共 81 个地级市。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 超效率 SBM 模型

本文从投入产出视角采用超效率 SBM 模型对生态效率进行量化,其模型形式为:

$$\min \rho = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{ik}}{1 - \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{rk}}, \tag{1}$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - s_i^- \leq x_{ik}, \tag{2}$$

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j + s_r^+ \leq y_{rk}, \tag{3}$$

$$s^+, s^-, \lambda \geq 0; i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, q; j = 1, 2, \dots, n (j \neq k),$$

其中,  $\rho$  为生态效率,  $m$  为投入指标类型数量,  $s$  为产出指标类型数量;  $x$  表示投入量,  $y$  表示产出量;  $s^-$  和  $s^+$  分别表示投入的冗余和产出的不足。

本文中,产出指标为各市 GDP。根据柯布-道格拉斯生产函数,本文投入指标包括劳动力,资本,资源投入。其中劳动力方面以全市单位从业人员期末数、私营和个体从业人员数汇总得到,资本投入利用永续盘存方法<sup>[20]</sup>估算得到,具体公式为:  $K_{it} = K_{i(t-1)}(1 - \delta_{it}) + I_{it}$ ,  $K_0 = I_0(1 + g_i)/(g_i + \delta)$ 。其中  $K_{it}$  是第  $t$  年  $i$  城市的资本存量,  $\delta_{it}$  是在第  $t$  年  $i$  城市的资本折旧率,本文取 9.6%,  $I_{it}$  是基期固定资产投资额,  $K_0$  是基期资本存量,  $I_0$  是基期前一年不变价固定资产投资,  $g_i$  是固定资产投资额三年几何平均增长率。城市资源投入包括能源消耗、水资源和土地资源,分别以全社会用电量、供水总量和建成区用地面积表示。非期待产出以三废排放量表示,分别为废水排放量、二氧化硫排放量及烟尘排放量,具体指标情况见表 1。

表 1 黄河流域生态效率评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of ecological efficiency in the Yellow River basin

类别	指标名称	单位	类别	指标名称	单位	类别	指标名称	单位
投入	年底就业人数	万人	投入	建成区面积	km <sup>2</sup>	非期望产出	废水排放总量	万t
	资本存量	亿元		供水总量	万m <sup>3</sup>		二氧化硫排放量	万t
	全社会用电量	亿 kW·h	期待产出	实际地区生产总值	亿元		烟尘排放量	万t

#### 2.2.2 产业结构转型

产业结构升级可以分为产业结构合理化和产业结构高级化两方面。产业结构合理化是指产业结构由不

合理向合理发展的过程,要求在一定的经济发展阶段上,根据当地的资源条件与消费需求,调整本地的产业结构,让资源在产业间得到合理配置和有效利用.根据前人研究利用泰尔指数<sup>[21]</sup>计算产业合理化( $T_L$ ),公式如下:

$$T_L = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{Y}\right) \ln\left(\frac{Y_i}{L_i} / \frac{Y}{L}\right). \quad (4)$$

产业结构高级化是指产业结构从低级化向高级化转变的过程,表示产业结构的改变和劳动生产率的提高,根据已有研究<sup>[22]</sup>,采用产业结构层次系数构造产业结构高级化( $T_S$ ),具体公式如下:

$$T_S = \sum_{i=1}^n i \frac{Y_i}{Y}, \quad (5)$$

$Y$  表示产业总产值,  $L$  表示就业人数,  $i$  表示第  $i$  产业部门,  $n$  为产业部门总数,  $t$  为年份.

### 2.2.3 空间杜宾模型

空间杜宾模型是空间滞后模型和空间误差模型的扩展形式.它有空间杜宾滞后模型和空间杜宾误差模型两种形式,分别:

$$Y = \rho WY + \beta X + \delta WX + \epsilon, (\epsilon \sim N(0, \sigma^2)), \quad (6)$$

$$Y = \beta X + \delta WX + \mu,$$

$$\mu = \lambda W\mu + \epsilon, (\epsilon \sim N(0, \sigma^2)), \quad (7)$$

式中,  $Y$  是因变量,  $X$  是自变量矩阵,  $\rho$  为空间自相关系数,  $\beta$  为自变量系数,  $W$  是空间权重矩阵,  $\delta$  是自变量的空间效应系数,代表自变量的空间溢出,即对其他城市生态效率的影响,  $\lambda$  是随机误差项的空间效应系数,  $\mu$  代表随机扰动.

考虑到产业结构升级对地区生态效率的影响,本研究选择生态效率作为被解释变量.核心解释变量为产业结构合理化指数与产业结构高级化指数,同时综合考虑经济发展、城镇化、开放度、技术创新和地方财政支出水平等因素对生态效率的潜在影响,分别以人均 GDP(元)、城镇化率(%)、进出口贸易占 GDP 的比重(%)、技术创新指数和财政支出占 GDP 比重等作为上述因素的代理变量.其中技术创新指数是一个综合指标,涉及发明专利授权数目、实用新型专利数目、外观专利公开数目和商标授权数目.开放度水平指标是利用各地级市进出口贸易占 GDP 的比重进行衡量.

表 2 各变量的统计描述

Tab. 2 Statistical description of each variable

	变量符号	变量名称	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	生态效率	Eco	0.783	0.194	0.366	1.306
解释变量	产业合理化	TL	0.281	0.213	0.002	1.722
	产业高级化	TS	2.285	0.127	1.982	2.663
控制变量	人均 GDP/元	pergdp	$5.040 \times 10^4$	$3.327 \times 10^4$	$6.916 \times 10^4$	$2.366 \times 10^5$
	城镇化率/%	urban	52.513	14.851	21.263	95.000
	开放度/%	open	0.510	0.956	0.001	8.851
	技术创新	innov	46.830	25.024	4.437	95.307
	财政支出	expenditure	0.205	0.134	0.067	0.916

### 2.3 数据来源

地级市生产总值、人均生产总值、三产生产总值、年底劳动力、土地资源、财政支出等数据来自 2010—2018 年地级市统计年鉴;水资源数据来自 2010—2018 年各地级市水资源公报;废水排放量、二氧化硫排放量、烟尘排放量数据来自 2010—2018 年中国城市统计年鉴.科技创新数据来自北京大学企业大数据研究中心.



### 3 黄河流域生态效率与产业结构转型的时空演变

#### 3.1 生态效率和产业结构时序演变特征

##### 3.1.1 生态效率时序演变特征

本文采用超效率 SBM 模型测算 2009—2018 年黄河流域 81 个城市的生态效率,以反映黄河流域及上中下游生态效率的变化情况(图 1).总体上,黄河流域生态效率从 2009 年的 0.56 上升至 2012 年的 0.62,在 2013 年下降至 0.57,随后黄河流域整体上主要呈现上升趋势.分区域看,下游地区生态效率曲线变化较为平稳,在 2011—2013 年间有小幅波动;中游地区生态效率变化明显,总体上呈现上升趋势,其中于 2016 年生态效率显著降低,之后迅速上升.主要原因是山西省晋城市、晋中市、太原市以及忻州市等地级市生态效率明显改善提升;上游地区生态效率波动变化较大,在 2012 年达到最高值(0.57),之后虽有个别年份生态效率提高,但最终呈现下降趋势.进一步,从黄河流域 7 个城市群(东半岛城市群、中原城市群、关中城市群、晋中城市群、呼包鄂城市群、宁夏沿黄城市群和兰西城市群)的生态效率来看(图 2),每个城市群生态效率变化较为平缓,其中关中城市群、晋中城市群和中原城市群在 2018 年生态效率明显提高.呼包鄂城市群和山东半岛城市群生态效率值历年均处于高值,而宁夏沿黄城市群生态效率一直处于低值,且与其他城市群差距较大.

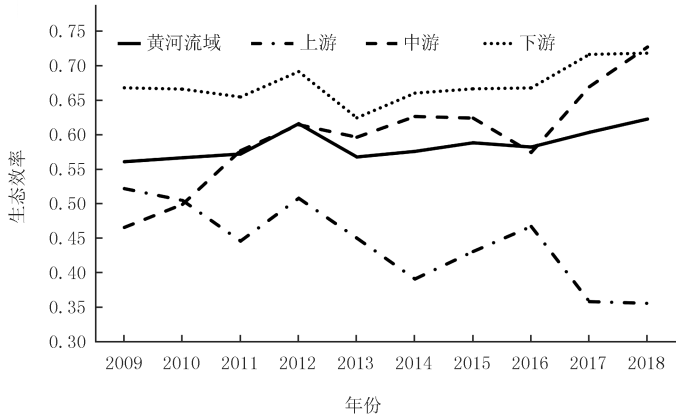


图1 黄河流域及上中下游生态效率的变化情况

Fig.1 Temporal variation of ecological efficiency in the Yellow River Basin and its upper, middle and lower reaches

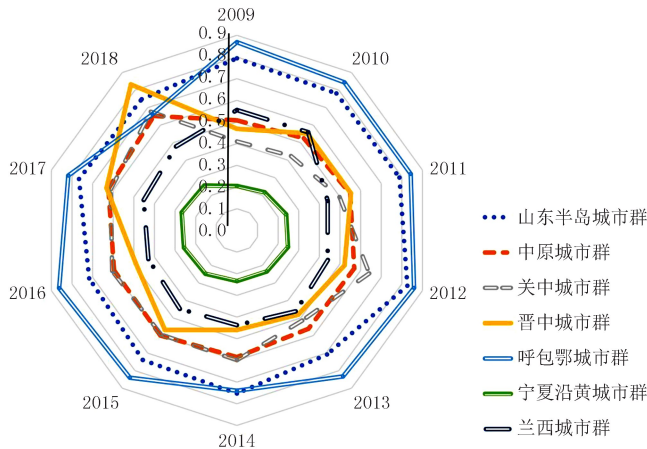


图2 黄河流域城市群生态效率情况

Fig.2 Ecological efficiency of urban agglomeration in the Yellow River Basin

### 3.1.2 产业结构时序演变特征

图3是黄河流域上中下游区域产业结构合理化的时间变化.从整体趋势来看,黄河流域产业结构合理化指数呈小幅变动,无明显变化趋势.尤其是2015年和2016年产业结构合理性指数达到最高值,说明2015年及2016年不同产业之间的协调度和资源的有效配置达到相对最优化.从上中下游来看,中游产业合理化指数呈现下降趋势,这是由于中游城市主要为资源依赖性城市,随时间变化,中游城市对自然资源的依赖和产业结构不均衡的问题开始凸显.上游及下游区域产业合理化指数与黄河流域总体变化趋势一致,且下游游整体产业结构最为合理.图4是黄河流域产业高级化指数变化趋势,黄河流域整体呈现稳定的上升趋势,说明近年来黄河流域产业结构都在不断调整优化.黄河流域上中下游区域于2013年至2016年产业结构高级化有显著上升趋势,2016年后上升趋势变缓.其中上中游产业高级化指数均高于黄河流域平均水平,呈现“S”型变化.主要是由于上游区域中甘肃省产业高级化调整力度强劲,有显著上升趋势;中游陕西省在升级过程中动力不足,逐渐落后;黄河流域下游产业高级化指数低于黄河流域平均水平,主要是由于下游河南省产业结构高级程度一直偏低,但上升趋势明显,逐渐缩小与其他省份的差距.

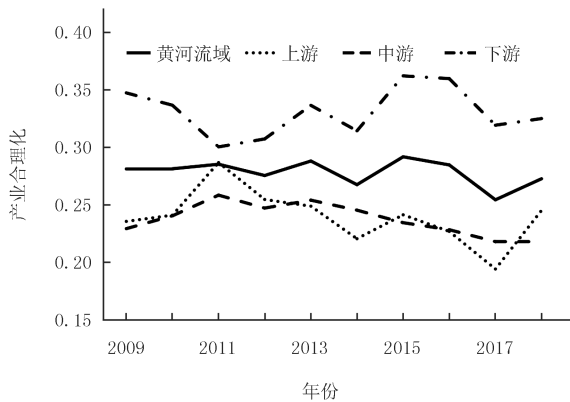


图3 黄河流域产业合理化变化趋势

Fig. 3 The changing trend of industrial rationalization in the Yellow River Basin

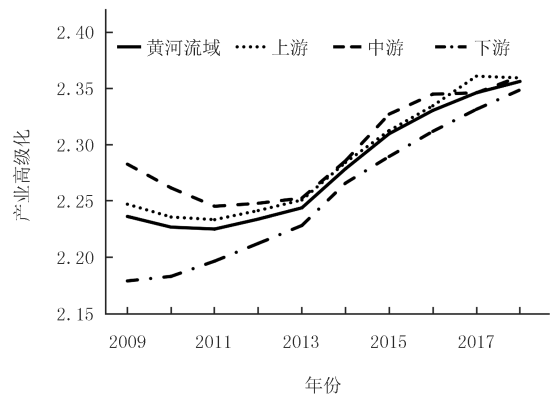


图4 黄河流域产业高级化变化趋势

Fig. 4 The changing trend of advanced industry in the Yellow River Basin

## 3.2 黄河流域城市生态效率的空间格局

### 3.2.1 空间相关性检验

黄河流域相邻的城市在自然环境、要素禀赋、制度环境等方面存在相似性,同时相邻的城市由于人口、资本和技术等要素的流动导致城市的产业结构不仅受到本区域环境的影响,还会受到邻近地区的影响<sup>[23]</sup>.本文通过测算墨兰指数来考察黄河流域2011—2018年生态效率、产业合理化及产业高级化的空间关联性,测算结果如表3.结果显示,无论是在邻接矩阵还是地理距离矩阵下,生态效率、产业合理化和产业高级化的墨兰指数都为正数,且通过了1%水平的显著性检验,这说明生态效率和产业结构升级不是随机分布,而存在正的空间关联性.

### 3.2.2 生态效率空间格局

利用ArcGIS直观分析2012,2014,2016及2018年黄河流域生态效率时空变化特征,并将生态效率按照相同间隔划分为4个等级分别为高效率(0.798,1.000]、中高效率(0.596,0.798]、中等效率(0.394,0.596]及低效率(0.191,0.394],结果见图5.可以看出,黄河流域生态效率较高的区域主要分布在中部且成片分布,其中山东省整体生态效率最优.2012年高生态效率区有26个城市,中高生态效率区有13个城市,铜川市和莱芜市是高值集聚区的洼地,嘉峪关市是低值聚集区的高地.2014年高生态效率及中高生态效率区域数量明显减少,出现较多零碎高值生态效率区.2016年高生态效率区贯穿南北,高效率及中高效率开始呈现集聚趋势,低效率值明显环绕高及中高效率区域.2018年中等效率值区域增多,在黄河流域中下段,中等效率及以上等级主要分布在黄河流域南岸.

表 3 生态效率及产业结构墨兰指数

Tab. 3 Moran index of ecological efficiency and industrial structure

年份	生态效率 Moran'I	产业合理化 Moran'I	产业高级化 Moran'I	年份	生态效率 Moran'I	产业合理化 Moran'I	产业高级化 Moran'I
2011	0.191(0.099)	0.141(0.155)	0.213(0.129)	2015	0.290(0.277)	0.262(0.257)	0.244(0.174)
2012	0.152(0.116)	0.160(0.155)	0.188(0.098)	2016	0.312(0.294)	0.226(0.262)	0.276(0.218)
2013	0.114(0.072)	0.169(0.134)	0.248(0.149)	2017	0.257(0.290)	0.171(0.193)	0.209(0.196)
2014	0.297(0.215)	0.211(0.205)	0.199(0.141)	2018	0.297(0.282)	0.104(0.104)	0.154(0.150)

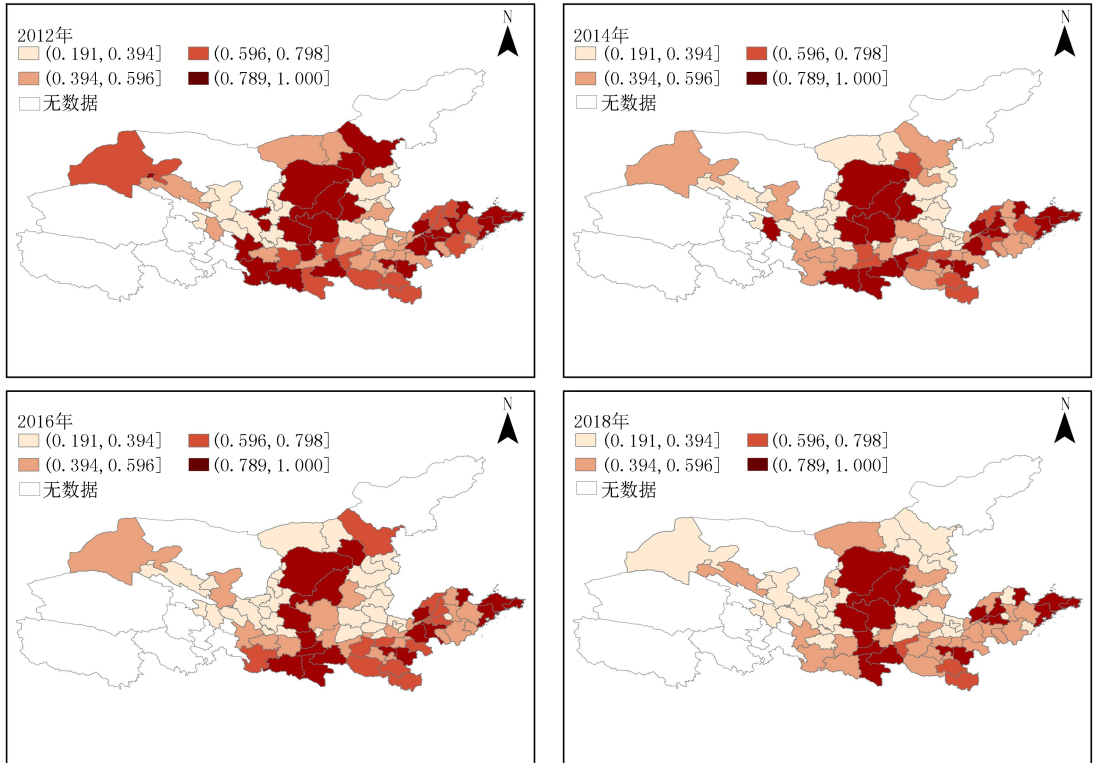


图5 黄河流域生态效率空间分布

Fig.5 Spatial distribution of ecological efficiency in the Yellow River Basin

## 4 黄河流域生态效率驱动因素分析

在进行空间计量模型构建之前,本文先利用拉格朗日乘子(LM)对空间自相关性进行检验.检验结果如表 4 所示,可以看出,LM-lag 和 LM-error 及二者稳健性指标(Robust LM-lag 和 Robust LM-error)均通过 0.01水平的显著性检验,因而,可以选择空间滞后或空间误差模型及二者的扩展形式,空间杜宾模型.进一步,对比两个统计量,LM-error 和 Robust LM-error 较大,因而,选择空间误差模型及空间杜宾误差模型更为合适.由于 2009 和 2010 年部分变量数据有较多缺失,本文选取 2011—2018 年数据进行建模.此外,河南省济源市和山东省莱芜市无技术创新指数数据,故在建模时予以排除,最终选取黄河流域 79 个地(市)级行政单元的数据进行建模.

表 4 拉格朗日乘子(LM)检验结果

Tab. 4 Results of Lagrange multiplier test

检验指标	LM-lag	LM-error	Robust LM-lag	Robust LM-error
统计值	222.999***	531.451***	7.002***	315.454***

显著性水平:\*\*\*表示  $p < 0.01$ , \*\*表示  $p < 0.05$ , \*表示  $p < 0.1$ .

经上述检验,本文构建了空间误差模型和空间杜宾误差模型,并构建了多元线性回归模型进行对比,结果见表 5. SEM 和 SDM 模型的空间误差的相关系数分别为 0.906 和 0.887,且都在 1% 的水平下通过显著性检验,说明黄河流域地级市生态效率的误差项存在空间相关性,说明要考虑空间杜宾误差模型,探讨自变量的空间效应或外生变量的空间效应<sup>[24]</sup>.

表 5 空间杜宾模型与多元回归估计结果

Tab. 5 Regression estimation results of spatial Durbin model

变量	OLS	SEM	SDM
Intercept	-1.806*** (-7.924)	-2.370*** (-9.234)	-3.413*** (-2.803)
$T_L$	0.235*** (4.501)	0.109* (2.101)	0.135*** (2.629)
$T_S$	0.083*** (3.773)	0.058* (2.555)	0.065*** (2.897)
Log_pergrdp	0.306*** (10.052)	0.415*** (12.202)	0.437*** (12.983)
Log_urban	-0.479*** (-8.323)	-0.612*** (-10.346)	-0.640*** (-10.920)
Log_innova	0.014(1.018)	0.007(0.540)	0.011(0.809)
Log_open	0.007(0.999)	0.014* (1.954)	0.025*** (3.318)
Log_expenditure	0.012(0.372)	0.004(0.118)	0.025(0.695)
lag $T_L$			1.060*** (3.792)
lag $T_S$			0.276*** (2.692)
lag Log_pergrdp			-0.315*** (-2.393)
lag Log_urban			1.021*** (3.357)
lag Log_innova			-0.183*** (-2.158)
lag Log_open			-0.045(-1.275)
lag Log_expenditure			-0.192(-1.298)
$\lambda$		0.906***	0.887***
LR 检验		162.82***	120.850***
Log likelihood		172.841	193.405
Wald 统计量		718.65***	536.810***
调整 $R^2$	0.214	0.180	0.291
AIC	-164.87	-325.68	-352.810

显著性水平:\*\*\*表示  $p < 0.01$ ,\*\*表示  $p < 0.05$ ,\*表示  $p < 0.1$ .

从各变量系数来看,产业结构合理化和产业结构高度化系数均显著为正,说明产业结构转型对于黄河流域生态效率的提升有明显促进作用.在控制变量方面,人均 GDP 的系数显著为正,这表明随着经济发展水平的提高,对生态效率的提升有正向促进作用.城镇化水平的系数显著为负,表明当前黄河流域的城镇化发展对其有负向影响.黄河流域近十年来的城镇化发展伴随着大量的资源、能源消耗和大规模的土地扩张,这难免对生态环境造成不利影响,而导致区域生态效率水平的降低.

技术创新的系数为正,但并不显著.理论上,技术创新有利于生态效率的提升,但不同的科技创新水平、规模和类型条件下,其对生态效率的影响有所差异.在此方面,陈余<sup>[25]</sup>通过测算中国 30 个省份科技创新效率和生态效率,并分析二者关系,发现二者存在着倒“U”形非线性关系.黄河流域区域总体创新水平不高,技术创新对生态效率的提升作用还有待结合创新类型(如绿色技术创新)和长期的数据开展进一步探讨.在黄河流域高质量发展的大背景下,开放度和政府财政支出水平是黄河流域生态文明建设中不可缺少的重要因素.空间误差模型和空间杜宾误差模型结果显示,开放度和财政支出水平的系数均为正,尤其是开放度的系数显著为正,表明目前黄河流域开放度因素有助于提升生态效率,而财政支出水平尚未能有效提升生态效率.

从各自变量的空间效应系数来看,产业结构合理化、产业结构高级化、城镇化的空间效应系数显著为正,



表明当地产业结构转型和城镇化发展对相邻其他城市生态效率的提升有正向作用。人均 GDP 和技术创新的空间效应系数为负,尤其是人均 GDP 和技术创新的系数显著,表明代表当地经济发展和科技创新对其他城市生态效率有负向影响。当前阶段,黄河流域各市经济发展和科技创新对生态效率的影响主要存在于本地,主要影响着或贡献于本地生态环境的改善,尚未出现正向溢出效应。开放度和财政支出水平的空间效应系数为负,但并不显著。

综合比较多元线性回归模型、空间误差模型和空间杜宾误差模型结果(表 5),除开放度因素显著性不一致外,各自变量系数取值和显著性结果比较相近,说明所构建模型具有较好稳健性。

## 5 结论与建议

为实现黄河流域经济发展与生态环境保护之间的平衡,推动黄河流域高质量发展。本文采用非期待产出超效率 SBM 模型测算了 2009—2018 年黄河流域地级市的生态效率,构建空间杜宾模型分析产业结构转型等因素对生态效率的影响。主要结论如下:

(1)2009—2018 年,黄河流域生态效率整体呈现上升趋势,但区域差异较大,下游地区生态效率较高,其次为中游地区,上游地区最低。在各城市群中,山东半岛城市群生态效率最优。从具体城市上看,陕西省大部分城市,山东省、河南省和内蒙古部分城市生态效率较高,但随着时间变化,部分生态效率高的城市生态效率有所下降。

(2)黄河流域产业结构合理化指数整体无明显变化,流域上游及中游有下降趋势,下游地区产业结构合理化程度相对较高。黄河流域产业结构高级化指数有明显上升趋势。黄河流域下游产业高级化指数低于黄河流域平均水平,但增长迅速,逐渐缩小与其他区域差距。

(3)从流域整体层面来看,产业结构转型对黄河流域生态效率有显著促进作用,并对相邻地市生态效率有正向影响;城镇化发展对生态效率有明显负向影响,但对相邻地市生态效率有正向溢出效应;提高开放度有助于提升生态效率,但技术创新和制度质量在提升生态效率方面的作用并未凸显。

据此,本文提出如下建议:

(1)持续推进产业结构优化,加强区域间合作。黄河流域资源型城市要立足现有支柱产业,延伸产业链,促进产业高端化;同时在支柱产业衰退前,开拓绿色新兴产业,寻求经济转型之路,发展循环经济。以粮食生产为主的区域要走农业产业化、规模化来推进新型城镇化。黄河流域要加强区域间合作,促进相邻城市产学研之间有效合作,实现优势互补。

(2)营造创新环境,加强绿色创新引导。注重知识价值分配机制,优化不同领域、行业创新评价机制,激励科研人员创新成果产出。提高科技资源利用效率,让科技进步凸显出其对生态效率的积极作用。同时注重科技创新与产业结构协同效应,利用科技进步促进产业结构转型,优化资源配置,以绿色科技创新为引导提升区域生态效率。

(3)重视制度保障,提升财政引导。强化生态文明建设理念,将绿色发展理念融入现代治理体系,完善制度保障。注重公共财政在生态环境资源配置中的引导作用,有效调节生态环境资源的行业流动、区域流动。

## 参 考 文 献

- [1] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].中国水利,2019(20):1-3.  
XI J P.Speech at the symposium on ecological protection and high quality development of the Yellow River Basin[J].China Water Resources,2019(20):1-3.
- [2] YIN K,WANG R S,AN Q X,et al.Using eco-efficiency as an indicator for sustainable urban development:a case study of Chinese provincial capital cities[J].Ecological Indicators,2014,36:665-671.
- [3] 黄建欢,杨晓光,成刚,等.生态效率视角下的资源诅咒:资源开发型和资源利用型区域的对比[J].中国管理科学,2015,23(1):34-42.  
HUANG J H,YANG X G,CHENG G,et al.Resource curse from the perspective of eco-efficiency:comparison of resource-dependent regions and resource-utilizing ones[J].Chinese Journal of Management Science,2015,23(1):34-42.
- [4] CHEBBI H E.Long and short-Run linkages between economic growth,energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in Tunisia[J].Middle East Development Journal,2010,2(1):139-158.

- [5] 阎晓,涂建军.黄河流域资源型城市生态效率时空演变及驱动因素[J].自然资源学报,2021,36(1):223-239.  
YAN X,TU J J.The spatio-temporal evolution and driving factors of eco-efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin[J].  
Journal of Natural Resources,2021,36(1):223-239.
- [6] ZHOU X Y,ZHANG J,LI J P.Industrial structural transformation and carbon dioxide emissions in China[J].Energy Policy,2013,57:  
43-51.
- [7] 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.  
MA J,ZHOU P C.How does industrial structure upgrading improve eco-efficiency in Yangtze River economic zone? [J].Journal of Nan-  
jing Tech University(Social Science Edition),2020,19(2):73-88.
- [8] 姚治国,陈田.国外旅游生态效率研究综述[J].自然资源学报,2015,30(7):1222-1231.  
YAO Z G,CHEN T.Review on overseas tourism eco-efficiency studies[J].Journal of Natural Resources,2015,30(7):1222-1231.
- [9] 任宇飞,方创琳,蔺雪芹.中国东部沿海地区四大城市群生态效率评价[J].地理学报,2017,72(11):2047-2063.  
REN Y F,FANG C L,LIN X Q.Evaluation of eco-efficiency of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China[J].Acta  
Geographica Sinica,2017,72(11):2047-2063.
- [10] 陈明华,刘文斐,王山,等.长江经济带城市生态效率的时空分异及其驱动因素[J].中国人口·资源与环境,2020,30(9):121-127.  
CHEN M H,LIU W F,WANG S,et al.Spatial-temporal differentiation of urban eco-efficiency in the Yangtze River Economic Belt and its  
driving factors[J].China Population,Resources and Environment,2020,30(9):121-127.
- [11] 郭存芝,罗琳琳,叶明.资源型城市可持续发展影响因素的实证分析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(8):81-89.  
GUO C Z,LUO L L,YE M.Empirical analysis of factors influencing the sustainable development of resource-based cities[J].China Popu-  
lation,Resources and Environment,2014,24(8):81-89.
- [12] 关伟,许淑婷.中国能源生态效率的空间格局与空间效应[J].地理学报,2015,70(6):980-992.  
GUAN W,XU S T.Study on spatial pattern and spatial effect of energy eco-efficiency in China[J].Acta Geographica Sinica,2015,70(6):  
980-992.
- [13] 王胜鹏,乔花芳,冯娟,等.黄河流域旅游生态效率时空演化及其与旅游经济互动响应[J].经济地理,2020,40(5):81-89.  
WANG S P,QIAO H F,FENG J,et al.The spatio-temporal evolution of tourism eco-efficiency in the Yellow River Basin and its interac-  
tive response with tourism economy development level[J].Economic Geography,2020,40(5):81-89.
- [14] 王圣云,林玉娟.中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素:水足迹与灰水足迹视角[J].地理科学,2021,41(2):290-301.  
WANG S Y,LIN Y J.Spatial Evolution and its Drivers of Regional Agro-ecological Efficiency in China's from the Perspective of Water  
Footprint and Gray Water Footprint[J].Scientia Geographica Sinica,2021,41(2):290-301.
- [15] CHEN H.Introduction to the science of industrial sector structure[M].Beijing:China Renmin University Press,1990:1-10.
- [16] GROSSMAN G M,KRUEGER A B.Economic growth and the environment[J].The Quarterly Journal of Economic,1995,110(2):  
353-377.
- [17] ZHANG J F,DENG W.Industrial structure change and its eco-environmental influence since the establishment of municipality in  
Chongqing,China[J].Procedia Environmental Sciences,2010,2:517-526.
- [18] ZHOU Y,KONG Y,SHA J,et al.The role of industrial structure upgrades in eco-efficiency evolution:spatial correlation and spillover  
effects[J].Science of the Total Environment,2019,687:1327-1336.
- [19] 顾典,徐小晶.中国产业结构优化升级对生态效率的影响[J].生态经济,2020,36(6):58-67.  
GU D,XU X J.The influence of industrial structure optimization and upgrading on ecological efficiency in China[J].Ecological Economy,  
2020,36(6):58-67.
- [20] 单豪杰.中国资本存量 K 的再估算:1952-2006 年[J].数量经济技术经济研究,2008,25(10):17-31.  
SHAN H J.Reestimating the capital stock of China:1952-2006[J].The Journal of Quantitative & Technical Economics,2008,25(10):  
17-31.
- [21] 干春晖,郑若谷,余典范.中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J].经济研究,2011,46(5):4-16.  
GAN C H,ZHENG R G,YU D F.An empirical study on the effects of industrial structure on economic growth and fluctuations in China  
[J].Economic Research Journal,2011,46(5):4-16.
- [22] 钟茂初,李梦洁,杜威剑.环境规制能否倒逼产业结构调整:基于中国省际面板数据的实证检验[J].中国人口·资源与环境,2015,25(8):  
107-115.  
ZHONG M C,LI M J,DU W J.Can environmental regulation force industrial structure adjustment:an empirical analysis based on provin-  
cial panel data[J].China Population,Resources and Environment,2015,25(8):107-115.
- [23] 陈晋玲.教育层次结构对产业结构优化升级的影响研究:基于空间杜宾模型[J].技术经济,2020,39(10):112-118.  
CHEN J L.Research on the influence of educational hierarchy on the optimization of industrial structure:based on the spatial dubin model  
[J].Journal of Technology Economics,2020,39(10):112-118.
- [24] 姜磊.空间回归模型选择的反思[J].统计与信息论坛,2016,31(10):10-16.

JIANG L. The Choice of Spatial Econometric Models Reconsidered in Empirical Studies[J]. Statistics & Information Forum, 2016, 31(10):10-16.

[25] 陈余. 科技创新效率是否促进生态效率: 基于空间模型与门槛模型的实证分析[D]. 泉州: 华侨大学, 2021.

CHEN Y. Whether scientific and technological innovation efficiency promotes ecological efficiency: empirical analysis based on spatial model and threshold model[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2021.

## Study on eco-efficiency and the driving effects of industrial structure transformation in the Yellow River Basin

Yang Dongyang<sup>a</sup>, Zhang Han<sup>a</sup>, Miao Changhong<sup>a,b</sup>, Wang Xiangbiao<sup>a</sup>, Zhang Jing<sup>a</sup>

(a. Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development & Collaborative Innovation Center of Yellow River Civilization; b. College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475001, China)

**Abstract:** As a comprehensive index to measure the status of regional sustainable development, ecological efficiency can reflect the coupling and coordination of economic development and resources and environment. Exploring the spatiotemporal dynamic of ecological efficiency and the impact of industrial structure transformation on ecological efficiency in the Yellow River Basin can provide scientific support for formulating industrial transfer route for regional development, promoting regional ecological civilization construction and improving development quality. In this paper, the super efficiency SBM model with non-expected output was adopted to measure the ecological efficiency of prefecture-level cities in the Yellow River Basin from 2009 to 2018. We divided industrial structure transformation into two dimensions: industrial structure rationality and industry structure upgrading, and constructed a spatial Durbin model to analyze the impact of industrial transformation on the ecological efficiency. The results showed that the overall ecological efficiency and industry structure upgrading of the Yellow River Basin kept a slow rising trend, and the lower Yellow River region has higher ecological efficiency and reasonable industrial structure. Both the rationalization of industrial structure and the upgrading of industrial structure have a positive effect on the ecological efficiency, and urbanization has a negative impact on ecological efficiency. The transformation of industrial structure should be continued to promote, the level of scientific and technological innovation and opening to the outside world should be moved up in the Yellow River Basin. Simultaneously, fundamental shift of urbanization to resource-conserving and eco-environmental protection should be noticed.

**Keywords:** ecological efficiency; industrial structure transformation; super-SBM model; Yellow River Basin

[责任编辑 陈留院 赵晓华]

## 本期专家介绍



苗长虹,河南大学教授,博士,博士生导师,教育部人文社科重点研究基地“黄河文明与可持续发展研究中心”主任、“黄河文明省部共建协同创新中心”主任,中国地理学会常务理事,中国地理学会黄河分会主任,国际区域研究协会(RSA)中国分会常务理事,享受国务院政府特殊津贴专家,入选国家“万人计划”领军人才.主要从事经济地理、区域发展与空间规划等研究.主持国家自然科学基金重点项目1项,面上和青年项目5项,国家社会科学基金项目1项.在专业核心期刊发表论文150余篇,出版专著10余部,获得河南省科技进步二等奖1项,河南省社会科学优秀成果一等奖1项.致力于推动“黄河学”学科创建和“学习场”理论发展,服务于“一带一路”、黄河流域生态保护与高质量发展和中原城市群建设等国家和区域重大战略实践.

徐甲强,河南卫辉人,上海大学教授,博士生导师,理学院副院长.2003年获得河南省杰出青年科学基金资助,2010年入选江苏省“双创人才”,入选由斯坦福大学和爱思维尔集团发布的1960—2019年终身科学影响力排行榜,2019年前2%顶尖科学家(分析化学),2022年前2%顶尖科学家(化学).研究方向为纳米材料化学,包括纳米结构材料的设计、可控制备及其在能源、信息和生命科学等领域中的应用.主持并完成国家重点研发计划项目课题、国家自然科学基金等研究课题10项,研究成果获得上海市自然科学二等奖1项、河南省科技进步奖5项.在 *Angew Chem Int Ed*, *Adv Funct Mater*, *J Mater Chem(A,B,C)*, *J Hazard Mater*, *Sens Actuators B*, *ACS Appl Mater Interf* 和 *Inorg Chem* 等 SCI 期刊发表论文300余篇,先后入选 ESI 高被引论文18篇,总被引次数12000次, H 指数63.现拥有国家发明专利25件,其中10多项成果在企业转化或授权使用,并获得上海市成果转化基金资助.



张冬至,中国石油大学(华东)教授,博士生导师,山东省泰山学者青年专家,中国石油大学(华东)控制科学与工程学院副院长,中国高校电工电子在线开放课程联盟山东省工作委员会主任,山东省电工技术学会副理事长,山东省高等学校青年创新团队带头人,首批国家级一流本科课程负责人,青岛市拔尖人才,青岛高校教学名师.主要从事微纳传感器技术与微系统、智能感知与柔性电子技术、电子信息技术与检测仪器等研究.主持国家自然科学基金项目、山东省重点研发计划项目等科研项目20余项,在 *ACS Nano*, *Nano-Micro Letters*, *Nano Energy*, *Sensors and Actuators B* 等



著名期刊上发表 SCI 收录论文170余篇,先后入选 ESI 高被引论文20篇,出版学术专著1部,授权国家发明专利20余件,以第一完成人获中国石油和化学工业联合会科技进步奖一等奖、山东省自然科学奖二等奖、中国电子学会自然科学奖二等奖、中国商业联合会科技进步奖二等奖、青岛市自然科学奖二等奖等科技奖励,荣获山东省高等教育教学成果奖一等奖、中国石油教育学会教学成果一等奖等多项教学奖项,入选全球前2%顶尖科学家榜单、全国高校矿业石油与安全工程领域优秀青年科技人才奖、中国电子学会优秀科技工作者等.