

# 黄河流域资源型城市生态效率时空演变及驱动因素

阎晓<sup>1,2</sup>, 涂建军<sup>3</sup>

(1. 山西财经大学资源型经济转型协同创新中心, 太原 030006; 2. 山西财经大学资源型经济  
转型发展研究院, 太原 030006; 3. 西南大学经济管理学院, 重庆 400700)

**摘要:** 生态效率是区域发展质量和人地协调程度的综合体现。采用TOPSIS法测度2003—2017年黄河流域37个资源型城市的生态效率, 借助泰尔指数、全局空间自相关和热点分析揭示其时空演变规律, 利用面板Tobit回归模型探寻关键驱动因素。结果表明: (1) 黄河流域资源型城市生态效率总体上以2007年为分水岭, 先平稳、后上升; 不同城市生态效率的增速和增幅差异较大, 下游城市明显高于中、上游城市, 再生型城市明显高于成长、成熟和衰退型城市。(2) 城市间生态效率差异大小先略微下降、后持续上升; 生态效率空间格局由随机分布向集聚分布演变, 低值集聚区从山西、河南交界处向山西中、北部移动, 高值集聚区分布具有空间粘性, 一直位于下游山东境内。(3) 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, 城镇化和外资利用对生态效率演变的影响不显著; 不同类型资源型城市生态效率改善的主要驱动因素存在异质性。

**关键词:** 黄河流域; 资源型城市; 生态效率; 时空演变; 驱动因素

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带<sup>[1]</sup>, 但生态本底脆弱、资源环境负载高、经济发展不充分且发展质量有待提升<sup>[2]</sup>。2019年9月, 习近平总书记在郑州主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会并发表重要讲话, 强调“黄河流域生态保护和高质量发展”是重大国家战略<sup>[1]</sup>。黄河流域煤炭、石油、天然气、矿产等资源丰富, 依托资源开采和加工形成资源型城市30余座, 占流域城市总数的50%以上、全国资源型城市总数的30%左右。因此, 黄河流域资源型城市转型发展既关乎本流域高质量发展, 也对全国其他资源型城市转型具有重要参考价值。然而, 资源型城市转型是一项复杂系统工程, 涉及产业结构调整、资源利用方式转变、生态环境治理、收益分配机制改革、就业和社会保障等诸多维度<sup>[3,4]</sup>。生态效率作为度量可持续发展状况的综合性指标<sup>[5,6]</sup>, 能够反映产业系统与资源环境系统的耦合协调状况<sup>[7,8]</sup>, 能够从资源节约和环境友好角度体现区域发展质量<sup>[9]</sup>, 为考察资源型城市转型成效和发展质量提供了新的视角和切入点。

生态效率概念最早由德国学者肖特嘉等提出<sup>[10]</sup>, 后被世界可持续发展工商理事会(WBCSD)积极推广并定义为“在提供具有价格优势的产品和服务, 以满足人类基本需求、提升生活质量的同时, 至少要把整个生命周期的环境影响和资源消耗强度逐渐降低

收稿日期: 2020-05-18; 修订日期: 2020-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701630); 国家社会科学基金西部项目(16XSH001); 山西省高等学校哲学社会科学项目(2017246)

作者简介: 阎晓(1985-), 女, 山西大同人, 博士, 副教授, 研究方向为产业生态、生态经济与区域可持续发展。  
E-mail: yanxiao85China@163.com

通讯作者: 涂建军(1973-), 男, 四川金堂人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市与区域发展。  
E-mail: 654532972@qq.com

至与地球承载力估算值相一致的水平”<sup>[11]</sup>。宏观区域、中观行业、微观企业和产品的生态效率问题已受到学者们的广泛关注<sup>[7,12,13]</sup>。本文涉及的城市生态效率属于区域生态效率范畴,其实质是将城市作为生态经济复合系统,通过系统内各种自然、经济和社会要素的有效配置,使经济产出最大化、生态环境影响最小化,从而实现社会经济与生态环境之间的和谐共赢<sup>[6,14,15]</sup>。城市生态效率定量评估常用的方法有数据包络分析及其改进模型<sup>[16,17]</sup>、随机前沿面模型<sup>[18]</sup>、TOPSIS模型<sup>[7,19]</sup>、物质流分析<sup>[20]</sup>、能值或生态足迹法与数据包络分析的联合模型<sup>[21,22]</sup>。定量评价使用的指标通常包括资源、能源、土地、资本和劳动力等生产要素投入指标,GDP、工业增加值或销售产值等经济产出指标,废水、废气和固体废弃物排放量等生态环境影响指标<sup>[6,18]</sup>。已有实证研究表明,城市生态效率常受工业化、城镇化、产业结构、科技水平、产业集聚水平、交通状况、对外开放、市场化程度及政策法规等因素的影响<sup>[6,9,18]</sup>。

资源型城市作为一种特殊类型的城市,其生态效率问题受到部分学者关注。已有研究表明<sup>[23,24]</sup>,与非资源型城市相比,资源型城市的生态效率往往较低。这一方面是由于采矿业在资源型城市经济体系中占据重要地位,而探矿、勘探、开发、开采生产等各个环节均会对生态环境产生强烈影响<sup>[25]</sup>,导致空气污染、水质下降、土地侵占、生物群落破坏等<sup>[26]</sup>。另一方面是因为自然资源禀赋会通过对人力、资本等要素的挤出效应抑制经济发展,形成生态效率层面的“资源诅咒”效应<sup>[27]</sup>。同时已有研究也发现,不同资源型城市的生态效率表现存在较大差异。例如,黄雪琴等<sup>[22]</sup>和李惠娟等<sup>[28]</sup>经过对比分析发现,不同资源类型、城市规模和地理区位的城市之间生态效率差异明显;尹倩倩等<sup>[29]</sup>对再生型资源型城市、Liu等<sup>[30]</sup>和Wang等<sup>[31]</sup>对煤炭城市的研究也得出相似结论。此外,关于资源型城市生态效率的驱动因素,已有研究表明除工业化水平、产业结构、城市规模、生产技术、环境治理等因子的影响较显著外<sup>[32,33]</sup>,政府决策行为、产业组织与布局等也具有重要作用。例如,Salmi<sup>[34]</sup>、Wang等<sup>[35]</sup>和Lu等<sup>[36]</sup>发现,构建产业共生网络有利于提高资源利用率、促进循环经济、形成产业共生体,进而改善资源型地区生态效率;Korhonen等<sup>[37]</sup>则指出,跨越时间系统边界的长期战略和跨越空间系统边界的城市间合作有益于生态效率提高。

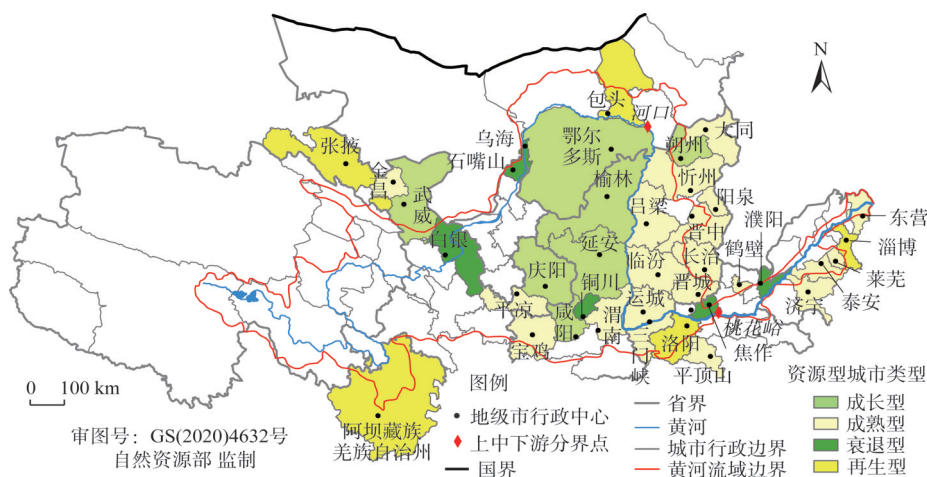
综上所述,目前关于城市生态效率的研究已较为丰富,但是针对资源型城市生态效率的研究相对薄弱,尚存在以下几点不足:一是注重对不同区位、规模、资源类型城市生态效率的比较,缺乏对成长型、成熟型、衰退型、再生型等资源保障和发展境况不同的资源型城市生态效率的对比,更缺乏对资源型城市生态效率时空格局动态演化规律的探索;二是常基于所有研究样本进行总体回归分析以探寻主要影响因素,忽视了影响因子对不同资源型城市作用的异质性;三是分析特定流域生态效率的文献较少,针对黄河流域资源型城市生态效率的全局性、系统性研究缺位。鉴于此,本文以黄河流域资源型城市为研究对象,系统分析其生态效率时序变化特征和空间格局演变规律;突出成长、成熟、衰退和再生型等资源型城市之间的异质性,分类探讨生态效率的关键驱动因素和内在作用机制,以期对决策部门制订差异化、精准化高质量发展政策提供依据和参考。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区域

根据《黄河流域综合规划(2012—2030年)》<sup>[38]</sup>,黄河大致呈“几”字形自西向东流经青海、甘肃、内蒙古等9个省(自治区),最终注入渤海。河源至内蒙古托克托县河

口镇为上游，河口镇至河南郑州桃花峪为中游，桃花峪至入海口为下游（图1）。结合《全国资源型城市可持续发展规划（2013—2020年）》<sup>[39]</sup>，黄河流域涉及38个资源型地级城市。由于阿坝藏族羌族自治州相关数据获取难度大且辖区多属于长江流域，故本文以其余37个资源型城市为研究样本，并根据资源保障能力和可持续发展能力<sup>[40]</sup>划分为四种类型：成长型（共7个，分别为朔州、鄂尔多斯、延安、咸阳、榆林、武威和庆阳）、成熟型（共20个，名单略）、衰退型（共6个，分别为乌海、焦作、濮阳、铜川、白银和石嘴山）、再生型（共4个，分别为包头、淄博、洛阳和张掖）。



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

图1 黄河流域资源型城市空间分布

Fig. 1 Distribution of resource-based cities in the Yellow River Basin

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 TOPSIS法

TOPSIS法根据评价对象与理想化目标的接近程度衡量评价对象的相对优劣。若评价对象最靠近正理想解、同时又最远离负理想解，则为最优；反之，则为最差。所谓正理想解是虚拟最优解（方案），其各项属性值均为所有评价对象中的最优值；而负理想解是虚拟最劣解（方案），其各项属性值均为所有评价对象中的最差值。该方法具有对样本无特殊要求、不易受参考序列选择干扰、可操作性强且结果合理等优点<sup>[7]</sup>，适用于多个评价单元或多种方案的综合测度<sup>[19]</sup>。本文以黄河流域37个资源型城市为研究样本，采用TOPSIS法评价其生态效率水平的相对优劣，从而体现生态效率的相对高低。具体计算步骤<sup>[7,19]</sup>如下：

假设有 $n$ 个被评价城市，每个城市有 $m$ 个评价指标，构建评价指标体系矩阵 $X$ ：

$$X = (x_{ij})_{n \times m} \quad (1)$$

然后，采用极值法对评价指标体系矩阵进行标准化处理，形成规范化决策矩阵 $Z$ ：

$$Z = (z_{ij})_{n \times m} \quad (2)$$

其次，确定最优解 $Z^+$ 和最劣解 $Z^-$ ：

$$Z^+ = (Z_{1\max}, Z_{2\max}, \dots, Z_{n\max}), Z^- = (Z_{1\min}, Z_{2\min}, \dots, Z_{n\min}) \quad (3)$$

再次，分别计算第 $i$ 个评价对象特征值与最优解、最劣解之间的欧式距离 $D_i^+$ 和 $D_i^-$ ：

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X^+ - X_{ij})^2}, D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X^- - X_{ij})^2} \quad (4)$$

最后, 计算第*i*个评价对象特征值与理想化目标的相对接近度  $C_i$ :

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (5)$$

式中: *i* 为被评价城市; *j* 为评价指标;  $C_i$  表示生态效率得分, 其值域为 [0, 1]。  $C_i$  值越接近 1, 表示生态效率水平越高; 反之, 表示生态效率水平越低。

### 1.2.2 泰尔指数

泰尔指数是衡量区域经济差异的常用方法, 其优势在于能够把区域整体差异分解为群组间差异和群组内差异, 从而较好地反映区域整体差异的来源<sup>[41]</sup>。本文对黄河流域资源型城市生态效率的泰尔指数进行二阶分解, 以得到成长、成熟、衰退和再生型四类资源型城市之间的差异以及各类型内部的差异。具体地, 假设包含 *n* 个个体的样本被分为 4 个群组, 每组分别为  $g_k (k=1, 2, 3, 4)$ , 第 *k* 组  $g_k$  中个体数目为  $n_k$ , 则泰尔指数的计算公式<sup>[41]</sup>如下:

$$T = T_b + T_w = \sum_{k=1}^4 y_k \log \left( \frac{y_k}{n_k/n} \right) + \sum_{k=1}^4 y_k \left( \sum_{i \in g_k} \frac{y_i}{y_k} \log \frac{y_i/y_k}{1/n_k} \right) \quad (6)$$

式中: *T* 表示泰尔指数, 其值越大表明生态效率整体差异越大;  $T_b$  和  $T_w$  分别表示四类城市的群组间和群组内差距;  $y_i$  和  $y_k$  分别表示个体 *i* 的生态效率份额和群组 *k* 的生态效率份额。

### 1.2.3 全局空间自相关分析

全局空间自相关是对属性值在整个区域空间特征的描述, 用于分析区域总体空间关联状况<sup>[42]</sup>, 常用 Moran's *I* 指数测度。本文借助 Moran's *I* 指数判断黄河流域资源型城市生态效率的空间相关性, 计算公式<sup>[42]</sup>如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

式中: *I* 为 Moran's *I* 指数;  $x_i$ 、 $x_j$  分别为城市 *i* 和 *j* 的生态效率;  $\bar{x}$  为生态效率均值;  $w_{ij}$  为空间权重矩阵, 通常相邻单元取值为 1, 其他取值为 0; *n* 为研究单元数量 (个)。 *I* 的值域为 [-1, 1], 其绝对值越接近 1, 则空间相关性越强; 其值越趋于 0, 则呈随机空间分布。

### 1.2.4 热点分析

热点分析是一种基于零假设 (即要素属性值空间分布完全随机) 的推论统计, 用于识别不同空间位置的高值集聚区 (热点) 与低值集聚区 (冷点), 其判别工具为 Getis-Ord  $G_i^*$  统计返回的 *Z* 值。本文利用热点分析识别生态效率高值集聚区和低值集聚区的空间位置, 计算公式<sup>[43]</sup>如下:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d) x_j}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (8)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\text{Var}(G_i^*)}} \quad (9)$$



式中： $G_i^*$ 为Getis-Ord  $G_i^*$ 统计量； $Z(G_i^*)$ 为统计检验值； $E(G_i^*)$ 、 $\text{Var}(G_i^*)$ 分别为 $G_i^*$ 的期望值和方差； $w_{ij}(d)$ 为空间权重； $n$ 为样本城市个数（个）。 $Z(G_i^*)$ 显著为正，表示高值聚类，是热点区域； $Z(G_i^*)$ 显著为负，表示低值聚类，是冷点区域。

1.2.5 面板Tobit回归模型

采用TOPSIS模型测算得到的生态效率取值范围为[0, 1]，若采用普通最小二乘法进行回归分析，参数估计结果将有偏且不一致。故采用受限因变量模型（Tobit）进行参数估计，以探寻黄河流域资源型城市生态效率演变的关键驱动因素，回归模型具体如下：

$$Y_{it} = \alpha + \beta X_{it} + \varepsilon_{it} \tag{10}$$

式中： $Y_{it}$ 为被解释变量，表示*i*城市第*t*期的生态效率； $X_{it}$ 为解释变量矩阵，表示*i*城市第*t*期的生态效率影响因子； $\alpha$ 和 $\varepsilon_{it}$ 分别为截距项和随机扰动项。

1.3 指标选取及数据来源

1.3.1 生态效率指标

根据城市生态效率的内涵<sup>[6,14,15]</sup>，参考现有文献中城市生态效率评估指标体系<sup>[6,18]</sup>，从自然资源消耗、经济要素投入、经济价值创造和生态环境破坏4个方面选取8项评价指标（表1），然后采用TOPSIS模型评价资源型城市生态效率。具体地，选取城市水资源消耗、能源消耗和土地消耗指标体现城市生态经济复合系统的资源损耗，选取劳动力和资本投入指标体现城市的社会经济要素消耗，选取GDP表征价值创造，选取水体和大气污染指标体现人类活动对生态环境的破坏。

表1 生态效率评价指标体系  
Table 1 Evaluation index system of eco-efficiency

准则层	指标层	具体说明	指标类型
自然资源消耗	水资源消耗	城市用水总量	极小型指标
	能源消耗	城市用电总量	极小型指标
	土地消耗	城市建设用地面积	极小型指标
经济要素投入	劳动力投入	单位从业人数	极小型指标
	资本投入	固定资产存量	极小型指标
经济价值创造	GDP	以2003年为不变价	极大型指标
生态环境破坏	水环境污染	工业废水排放量	极小型指标
	大气污染	工业SO <sub>2</sub> 排放量	极小型指标

1.3.2 影响因子指标

根据已有文献，影响城市生态效率的因素通常有城镇化水平、产业结构、外资利用和对外贸易状况、科技与创新水平、环境规制及交通状况等<sup>[9,32,33]</sup>。就资源型城市而言，经济对自然资源的依赖度也会对生态效率产生重要影响。鉴于此，选取表2中所列的11项指标作为解释变量，探寻黄河流域资源型城市生态效率时空演变驱动因素。

1.3.3 数据来源

数据主要来源于2004—2018年《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国环境年鉴》《中国区域经济统计年鉴》以及各省、市统计年鉴，城镇人口、进出口总额等指标的部分缺漏数据通过线性回归拟合补齐。固定资产存量借鉴张军<sup>[44]</sup>算法估算而得；为消除价格变动的影响，GDP已折算成2003年可比价。

表2 资源型城市生态效率影响因素

Table 2 Influencing factors of eco-efficiency for resource-based cities

指标名称	符号	具体指标	指标说明
城镇化水平	<i>urban</i>	城镇人口占比	城镇常住人口/常住人口总量
工业化水平	<i>indus</i>	工业增加值占比	工业增加值/GDP
产业转型程度	<i>third</i>	第三产业增加值占比	第三产业增加值/GDP
外资吸引度	<i>fdi</i>	外商及港澳台商投资企业产值占比	外商及港澳台商投资企业产值/工业总产值
经济外向度	<i>trade</i>	对外贸易系数	进出口总额/GDP
科技投入强度	<i>tech</i>	科技支出强度	科学技术支出/财政支出
科技产出水平	<i>innov</i>	人均专利授权量	专利授权总量/常住人口总量
资源依赖度	<i>rely</i>	资源型产业从业人员占比	采掘业、电力煤气及水生产供应业从业人员数/年末单位从业人员数
基础设施保障度	<i>traff</i>	人均城市道路面积	—
环境规制强度	<i>envir</i>	污染治理综合指数	工业SO <sub>2</sub> 去除率、工业烟尘去除率、一般工业固体废物综合利用率和生活垃圾无害化处理率4项指标熵权法均值
区位条件	<i>locat</i>	在黄河流域中的位置	上游附值为1，中游附值为2，下游附值为3

2 结果分析

2.1 生态效率时序演变特征

从37个城市整体变化角度看，2003—2017年黄河流域资源型城市生态效率大致以2007年为时间分水岭，前期保持平稳、后期持续上升（图2）：2003—2006年为平稳期，生态效率均值大致稳定在0.30左右；2007—2017年为上升期，生态效率均值从0.31爬升至0.43，增幅为0.12，年均增长率约为3.31%。根据生态效率增长速度，可进一步以2012年为分界点将上升期划分为两个阶段：2007—2011年为稳步上升阶段，生态效率增长相对较慢，增长率保持在2%~3%之间，低于年均增长率；2012—2017年为快速上升阶段，生态效率提升速度相对较快，除2013年和2015年以外，多数年份增长率高于年均增长率。

从城市间生态效率变化对比角度看，各城市表现参差不齐，存在明显差异。淄博、济宁、东营、洛阳、泰安和包头的生态效率提升最快，年均增长率大于6%；鄂尔多斯、焦作和咸阳的生态效率增长也较明显，年均增长率介于4%~6%之间；忻州、吕梁和榆林的生态效率则出现不增反降的逆向变化，下降幅度介于0.01~0.04之间；其余城市生态效率增长不明显。采用等间距法将生态效率值划分为低（0.10~0.30）、较低（0.30~0.50）、较高（0.50~0.70）和高（0.70~0.90）四个等级。进一步分析发现，15年间淄博和东营（低→高）、济宁和泰安（较低→高）、洛阳和包头（低→较高）的生态效率发生了等级跃迁，而其他城市仅在相邻等级之间转化。

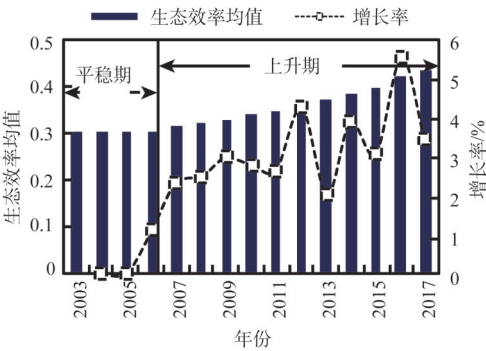


图2 黄河流域资源型城市生态效率总体演变趋势

Fig. 2 Overall changing trend of eco-efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin

从流域不同区段变化角度看,黄河流域下游地区资源型城市生态效率的初始水平略低,但研究期内增长最快(年均增长率达到5.28%)、增幅最大(约为0.31)。而中游和上游地区的资源型城市生态效率变化相对较小,增幅仅分别为0.07和0.11,年均增长率仅分别为1.53%和2.23%,上游地区略高于中游地区(图3)。由此可见,过去15年间黄河流域下游地区资源型城市的生态效率呈现持续向好局面,而中、上游地区在改善生态效率方面依然任重道远。

分城市类型看,四类资源型城市的生态效率均有不同程度上升,其中再生型城市表现最好(图4)。研究期内,再生型城市生态效率均值从2003年的0.25上升至2017年的0.61,增幅高达0.36,年均增速达到6.67%,明显高于其他三类城市;成熟型城市生态效率的改善程度接近流域平均水平,增幅约为0.12,年均增长率为2.41%;成长和衰退型城市生态效率的增幅、增速略低于流域平均水平,二者增幅均为0.08,增速仅分别为1.55%和1.59%。可见,再生型城市通过调整经济发展方式、寻求经济发展新动能,在社会经济和生态环境方面已经取得了较好成效,明显改善了生态效率。

然而,成长和成熟型城市正处于资源开发的上升或稳定阶段,资源类行业带来的经济红利尚存,转变经济发展方式的动力不足;衰退型城市正处于转型发展探索过程中,经济与生态兼顾的新发展模式尚未形成,故这三类城市生态效率改善成效甚微。

## 2.2 生态效率空间格局演变特征

运用ArcGIS 10.2软件绘制2003年、2007年、2012年和2017年4个时间节点黄河流域资源型城市生态效率的等级空间分布图(图5),发现2007年以前生态效率整体空间格局基本未变,但2007年以后变化显著且呈现明显的空间路径依赖特征。具体而言,2003年和2007年,流域生态效率水平整体较低,37个城市均处于低或较低等级;空间格局基本相同,沿黄河“几”字湾形成生态效率相对较好的连片分布带,洛阳、平顶山、焦作、宝鸡、咸阳、渭南、朔州、包头和石嘴山等流域边缘城市构成生态效率低值区。2012年,下游地区的淄博、东营、泰安和济宁从低或较低等级上升为较高等级,成为黄河流域的生态效率高地区;多数流域边缘城市生态效率得以改善,从低等级向较低等级递进。然而此时,大同和长治依旧处于低等级,榆林从较低向低等级退化,成为生态效率最低的三个城市。到2017年,下游地区的淄博、东营、泰安和济宁进一步从较高等级上升为高等级,与其他城市之间的差距继续拉大,生态效率持续向好;中、上游地区城市

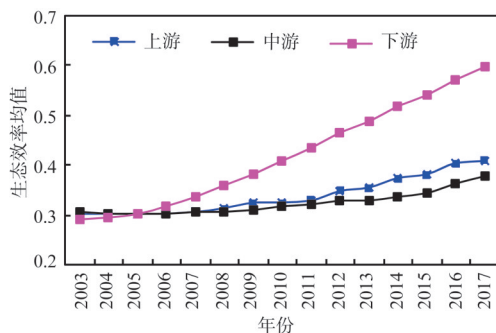


图3 黄河流域不同区段资源型城市生态效率演变趋势

Fig. 3 Evolution trends of eco-efficiency of resource-based cities in different reaches of the Yellow River

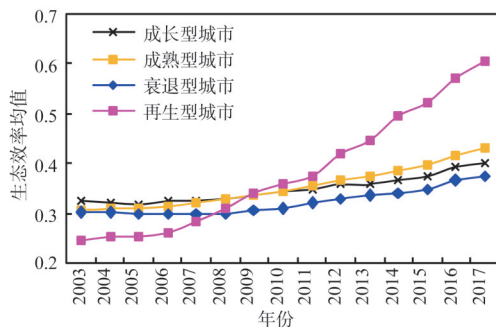


图4 不同类型资源型城市生态效率演变趋势

Fig. 4 Evolution trends of eco-efficiency in different types of resource-based cities

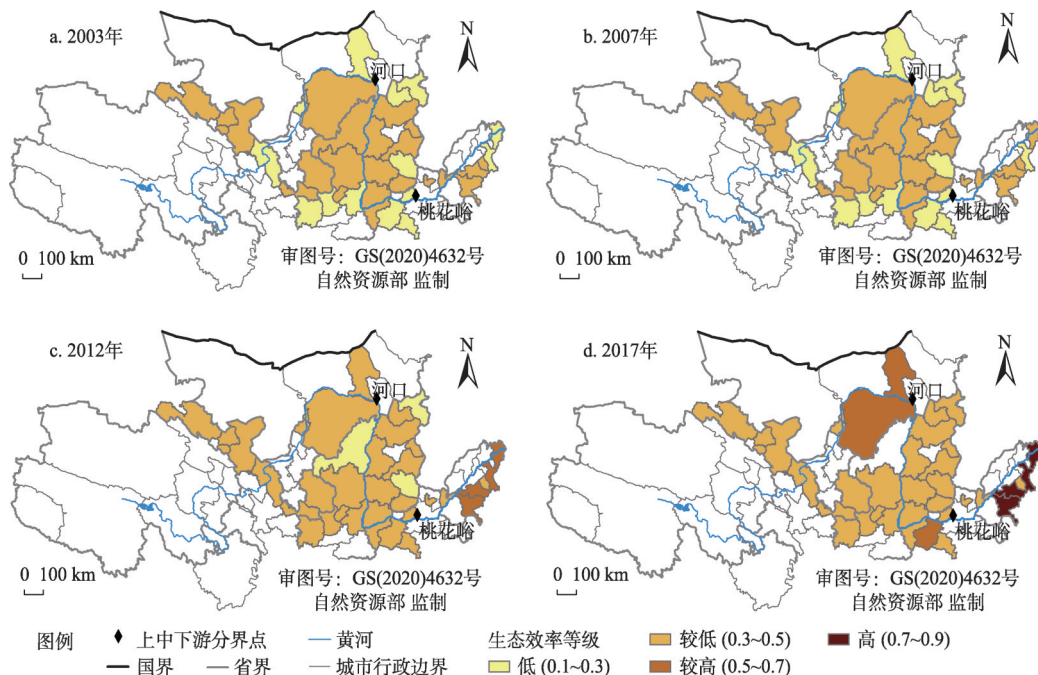


图5 黄河流域资源型城市生态效率等级空间分布演变趋势

Fig. 5 Spatial distribution evolution trends of eco-efficiency grade of resource-based cities in the Yellow River Basin

大多处于“较低”等级，仅有包头、鄂尔多斯和洛阳三个相对高值点。纵观2007年以后黄河流域生态效率空间格局可以发现，强者愈强的“马太效应”特征非常明显，说明资源型城市一旦步入生态化转型的发展轨道，将会与原来资源依赖性发展路径脱钩，形成新的发展惯性。因此，斩断资源型城市原有路径依赖因子，下决心调转发展方向是实现转型发展的关键。

全局空间自相关分析发现，2007年以前Moran's  $I$ 指数未通过显著性检验，2007年以后Moran's  $I$ 指数为正且通过0.01水平显著性检验，表明15年间黄河流域资源型城市生态效率从随机分布向空间集聚格局演变。进一步借助Getis-Ord  $G_i^*$ 工具进行热点分析（图6），发现2007年以后生态效率低值集聚区先是位于黄河流域中游山西、河南二省交界处，然后逆流移动至山西中部和北部地区；生态效率高值集聚区则一直分布在黄河流域下游山东境内，存在明显的空间粘性，这与上述生态效率空间格局演变分析的结论相吻合。

泰尔指数计算结果表明，以2007年为分水岭，研究期内黄河流域生态效率总体差异先略微缩小、后持续扩大，且主要源于不同城市类型的组群内差异（图7）。具体而言，2003—2007年，生态效率总体差异略有下降，主要源于再生型城市的组群内差异。此阶段4个再生型城市中，上游的张掖虽然生态效率本底较好（2003年时为0.35），但基本未增长；包头、洛阳和淄博虽本底较差（2003年时均约0.21），但提升明显，故组群内差异有所缩小。2008—2017年流域生态效率总体差异不断扩大，成熟型城市的组群内差异对流域总体差异贡献最大，再生型和成长型城市次之，衰退型城市贡献极小。此阶段20个成熟型城市中，下游的东营、济宁和泰安生态效率明显提高，增幅均达到0.35以上，其他城市增幅较小或维持不变；4个再生型城市中，仅上游的张掖生态效率基本未变，淄博、洛阳和包头的生态效率增幅分别高达0.51、0.42和0.36；7个成长型城市中，上游鄂



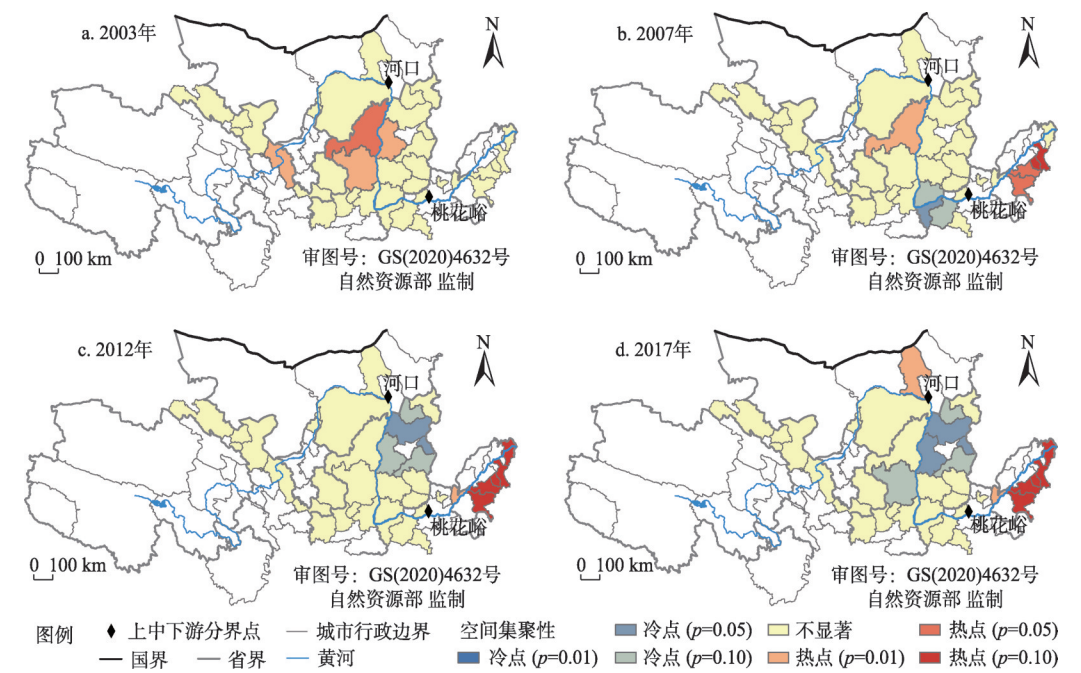


图6 黄河流域资源型城市生态效率冷热点分布

Fig. 6 Spatial distribution of eco-efficiency cold and hot spots of resource-based cities in the Yellow River Basin

尔多斯和中游咸阳的生态效率增幅大于0.20，其他城市变化极小；6个衰退型城市中，下游的焦作和濮阳生态效率增幅约为0.10，而其他中、上游城市变化极小。由此可见，多数再生型城市、下游成熟型城市生态效率的大幅改善是黄河流域资源型城市生态效率总体差异扩大的关键原因所在。

2.3 生态效率演变驱动因素解析

2.3.1 模型处理与检验

以上分析表明，成长型、成熟型、衰退型和再生型城市之间的生态效率演变规律存在明显差异，故从流域整体和城市类型两个维度解析生态效率的主要影响因子，以探寻黄河流域资源型城市生态效率演变的关键驱动因素。进行回归分析之前，为保证数据平稳性，削弱序列异方差对估计结果的影响，对各变量进行对数化处理。为避免多重共线性对回归结果的负面影响，对变量进行共线性检验，结果显示各变量方差膨胀因子均在4以下，远小于10，说明自变量间不存在明显共线性问题。然后，采用面板Tobit模型进行回归分析，结果如表3所示。其中，第（1）列是以黄河流域37个资源型城市为样本的总体回归结果，第（2）~第（5）列分别是以成长型、成熟型、衰退型和再生型城市为样本的分类回归结果。根据各列的沃尔德卡方检验（Wald chi2）及伴随概率P值（Prob>chi2）、对数似然值（Log Likelihood）可知，基于流域整体样本和不同类型城市样本的各个回归模型总体上均显著。

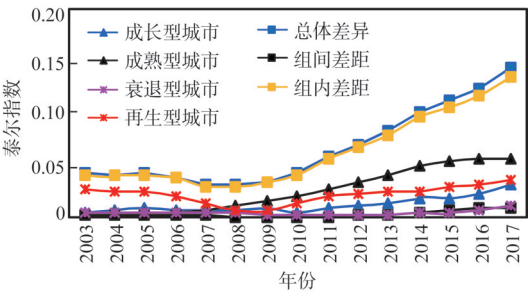


图7 黄河流域资源型城市生态效率泰尔指数演变趋势

Fig. 7 Evolution trends of eco-efficiency Theil Index of resource-based cities in the Yellow River Basin

### 2.3.2 流域整体层面的驱动因素

从流域整体层面看,产业转型、科技创新、基础设施完善和区位条件对黄河流域资源型城市生态效率改善具有显著正向驱动作用。如表3第(1)列所示,产业转型程度的系数显著为正,其值每提高1个单位,生态效率提升0.112。研究期内,黄河流域37个资源型城市第三产业占GDP比例的均值从32.24%波动上升至41.30%,增幅超过10个百分点。特别是大同、运城和白银等城市,通过发展以文化旅游为重点的现代服务业,推动第三产业对GDP的贡献率上升了20多个百分点。这促使资源型城市经济发展的资源、能源消耗强度和污染物排放强度下降,助力生态效率提升。科技投入强度和科技产出水平的系数均显著为正,其值每提高1个单位,生态效率分别上升0.064和0.036。研究期内,

表3 黄河流域资源型城市生态效率影响因素回归结果

Table 3 Regression results of influencing factors on eco-efficiency of the resource-based cities in the Yellow River Basin

变量	(1) 流域整体	(2) 成长型城市	(3) 成熟型城市	(4) 衰退型城市	(5) 再生型城市
$\ln(\text{urban})$	0.088 (1.291)	0.070 (0.667)	0.311*** (3.126)	0.596*** (7.359)	0.778*** (3.104)
$\ln(\text{indus})$	-0.070 (-1.167)	-0.067 (-0.590)	0.154** (2.194)	0.128 (1.557)	-0.443** (-2.286)
$\ln(\text{third})$	0.112** (2.182)	-0.242*** (-2.943)	0.287*** (4.819)	0.130** (2.134)	0.135 (0.384)
$\ln(\text{fdi})$	-0.008 (-0.919)	-0.027** (-2.040)	0.001 (0.045)	-0.016** (-2.251)	-0.299*** (-4.253)
$\ln(\text{trade})$	-0.032*** (-2.981)	-0.020 (-1.134)	0.014 (0.924)	-0.011 (-1.245)	-0.073 (-0.985)
$\ln(\text{tech})$	0.064*** (5.861)	-0.025 (-1.107)	0.037*** (2.828)	-0.006 (-0.527)	0.169*** (5.727)
$\ln(\text{innov})$	0.036*** (2.947)	0.003 (0.147)	0.021 (1.267)	-0.003 (-0.231)	0.045 (1.113)
$\ln(\text{rely})$	-0.109*** (-4.855)	-0.039 (-1.124)	-0.136*** (-4.180)	-0.069*** (-2.799)	-0.327*** (-2.954)
$\ln(\text{regul})$	-0.145*** (-4.243)	0.084 (1.396)	-0.169*** (-4.472)	-0.073** (-2.328)	-0.054 (-0.269)
$\ln(\text{traff})$	0.100*** (4.397)	0.182*** (3.973)	0.081*** (3.254)	0.011 (0.350)	0.119** (2.233)
$\ln(\text{locat})$	0.207*** (3.003)	-0.138 (-1.256)	0.411** (2.354)	0.375** (2.437)	0.593*** (4.019)
cons	-0.939** (-2.121)	-0.895 (-1.320)	-3.276*** (-5.320)	-4.124*** (-7.524)	-2.143 (-1.155)
<i>N</i>	555	105	300	90	60
Wald chi2	366.70	64.00	268.86	295.94	340.12
Prob>chi2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Log likelihood	274.949	82.512	213.438	131.872	32.400

注: \*、\*\*和\*\*\*分别表示在10%、5%和1%的水平上显著,括号中为 $z$ 值。

37个资源型城市的科技支出强度均值从0.17上升至0.97左右;人均专利授权量均值从0.35件/万人上升至4.38件/万人,下游的淄博、济宁、东营和焦作等城市更是于2017年时分别达到10.94件/万人、8.03件/万人、7.80件/万人和7.79件/万人。这有益于生产效率和资源、能源利用效率的提高,从而促进综合生态效率改善。交通基础设施保障度的系数显著为正,其值每提高1个单位,生态效率提高0.100,这是由于良好的交通条件可以通过网络效应和时空压缩效应推动资源优化配置和生产效率提升。另外,区位条件的系数为正且在1%水平上显著,表明越是靠近下游的资源型城市,其市场临近性、参与全球经济分工等方面的优势越有利于经济发展方式转变。

然而,外向型经济、资源依赖和环境规制抑制了生态效率的改善。如表3第(1)列所示,经济外向度的系数显著为负,其值每提高1个单位,生态效率下降0.032,这是因为资源型城市对外贸易以资源和原材料等低层次产品为主,经济附加值低但资源环境代价大。例如,“外贸百强城市”金昌长期以原料进口为主,出口则以镍网、建筑支架、白瓜子、头花等初级产品为主。即使是情况相对较好的淄博,2017年其高新技术产品进出口额也仅占外贸总额的3.02%,远低于全国平均水平(30.62%)。资源依赖度的系数显著为负,其值每提高1个单位,生态效率下降0.109,说明经济对自然资源的依赖度越高,越不利于资源型城市绿色转型,生态效率层面的“资源诅咒”现象客观存在。环境规制强度的系数显著为负,其值每提高1个单位,生态效率下降0.145。由于改进生产工艺、转变从事行业的难度相对较大,故资源型企业和污染密集型企业常常选择购进治污设施或技术进行污染物末端处理,以达到国家或地方环境保护标准。研究期内黄河流域37个资源型城市的污染治理综合指数从47.96上升到86.54,翻了近一番,但环境成本内化,产品成本随之上升,企业不得不提高产量以弥补环境规制增加的成本。因此,末端治理式的环境规制不利于生态效率提高。

此外,城镇化、工业化和外资利用等对资源型城市生态效率改善未发挥显著作用。如表3第(1)列所示,城镇化水平的系数为正但不显著,说明城镇化在一定程度上可以改善生态效率。这可能是因为农村人口向城镇集聚会引发城镇住宅投资需求和消费需求等,但目前城镇化的质量还不高。工业化水平的系数为负但不显著,说明工业化一定程度上抑制了生态效率改善,这是由于当前资源型城市工业结构高度化水平偏低,仍以传统工业行业为主,而附加值高、污染低的高端制造业发育尚不充分。外资吸引度的系数虽不显著但却为负,说明外资利用未起到改善生态效率的作用。这是因为资源型城市常以土地、税收等优惠吸引外资企业,而这些外企则多将产业链低端环节布局于此,且与当地其他企业关联较弱,扩散溢出效应有限。以晋城为例,富士康(晋城)科技工业园的存在使该市外资对工业总产值的贡献率明显高于黄河流域其他资源型城市,研究期内从11.96%增至22.54%。当地政府为营造良好发展环境,从土地、税收和地方性规费等12个方面给予其优惠<sup>[45]</sup>。然而长期以来该园区主要布局电子产业价值链低端环节,亦未围绕之形成产业簇或产业集群,正外部性效应不明显。

### 2.3.3 不同类型城市的驱动因素

成长型城市资源保障潜力大,正处于资源开发上升阶段,转型发展需求尚不急迫。相应地,研究期内其生态效率改善并不明显,仅从0.32上升至0.40。回归分析发现,仅基础设施保障对其生态效率改善具有显著正向驱动作用,面临生态效率提升动力严重不足的困境。如表3第(2)列所示,交通基础设施保障度的系数显著为正,其



值每提高1个单位,生态效率提升0.182。2003—2017年,朔州、榆林和延安等成长型城市的人均道路面积均值从 $7.32\text{ m}^2$  (低于流域均值 $8.15\text{ m}^2$ ) 逐渐上升到 $21.10\text{ m}^2$  (高于流域均值 $19.63\text{ m}^2$ ),良好的交通条件使得时空距离压缩、资源优化配置和城市功能完善,促进了生态效率改善。但是,外资吸引度的系数显著为负,其值每上升1个单位,生态效率降低0.027,不利于生态效率改善,这与流域整体层面的分析结果基本吻合。产业转型程度的系数显著为负,其值每提高1个单位,生态效率降低0.242,抑制了生态效率改善,这与流域整体层面的分析结果相悖。究其原因,2003—2017年,工业对黄河流域7个成长型城市GDP的贡献率均值从40.33%上升至54.75%左右,且一直高于第三产业对GDP的贡献率,大致处于工业化中期阶段。此时,工业仍是城市经济发展的重要引擎,若通过发展第三产业推动城市经济转型,则可能分散社会资本、人力和物力,导致城市整体效率下降。

成熟型城市资源保障能力较强,处于资源开发稳定阶段,经济社会发展水平较高且日渐完善,研究期内其生态效率均值从0.31上升至0.43。回归分析发现,城镇化、工业化、产业转型、科技创新、基础设施完善和区位条件均是其生态效率改善的显著正向驱动因子。如表3第(3)列所示,城镇化水平、产业转型程度、科技投入强度和基础设施保障度每提高1个单位,生态效率分别提升0.311、0.287、0.037和0.081。区位条件的系数在5%水平上显著为正,说明下游地区的成熟型城市生态效率改善状况更好。工业化水平的系数在5%水平上显著为正,说明工业发展有利于生态效率改善,这有异于流域整体层面分析结果。究其原因,2003—2017年,多数成熟型城市由工业化中期向工业化后期阶段过渡,完备的生产加工体系为城市带来较好的经济环境效益,此时资源类行业的红利尚存。然而,资源依赖和环境规制抑制了成熟型城市生态效率的改善,这与流域整体层面分析结果类似。其中,资源依赖度每提高1个单位,生态效率降低0.136,故成熟型城市应未雨绸缪、提前布局,积极引导非资源类产业发展,避免资源枯竭时经济断崖式下滑、无力转型。环境规制强度每提高1个单位,生态效率降低0.169,故成熟型城市应理性调整环境政策,吸引高新技术企业入驻、引导传统企业进行技术和设备改造升级,进而从根本上解决环境污染和生态破坏问题。

衰退型城市资源趋于枯竭,经济发展乏力、民生问题突出、生态环境问题严重,正处在加快转变经济发展方式的“窗口期”。然而研究期内,黄河流域6个衰退型城市生态效率均值从0.30上升到0.37,增幅仅为0.08,改善效果不佳,低于流域平均水平。回归分析发现,仅城镇化、产业转型和区位条件对生态效率提升具有显著正向作用,亟待探寻新的生态效率改善动力。如表3第(4)列所示,城镇化水平每提高1个单位,生态效率上升0.596。2003—2017年,焦作、乌海和濮阳等衰退型城市的城镇化率均值从46.82%上升至64.06%,人口向城镇的集聚为城市发展注入活力;同时公共服务和社会福利等不断改善推动了城镇化质量提高,使得人民生活方式向资源环境友好方向转变,从而促进了生态效率改善。产业转型程度每提高1个单位,生态效率上升0.130。研究期内,焦作等衰退型城市借助旅游业等推动第三产业较快发展,其对GDP的贡献率从21.24%上升到32.81%,资源消耗和环境污染有所下降。区位条件的系数在5%水平上显著为正,表明靠近下游的衰退型城市生态效率改善状况更好。然而值得注意的是,外资吸引度和环境规制强度的系数均显著为负,科技投入与产出的系数虽不显著但亦为负,



这些成为衰退型城市转型发展、生态效率改善的瓶颈所在。

再生型城市经济社会开始步入良性发展轨道,是资源型城市转变发展方式的先行区。研究期内,黄河流域4个再生型城市的生态效率均值从0.25上升至0.61,增幅和增速分别高达0.36和6.67%,明显领先于其他三类城市。回归结果表明,城镇化、科技投入、基础设施完善和区位条件是其生态效率改善的显著正向驱动因子,但未来还需要在产业转型、提升外贸层次等方面努力。如表3第(4)列所示,城镇化水平、科技投入强度和基础设施保障度的系数均显著为正,其值每提高1个单位,生态效率分别提升0.778、0.169和0.119。区位条件的系数在1%水平上显著为正,且其对再生型城市生态效率的影响比其他三类城市更加显著,表明在资源型城市发展历程中,区位对其的影响趋于增强。然而,工业化、外资利用和资源依赖抑制生态效率改善。其中,工业化水平的系数显著为负,其值每提高1个单位,生态效率降低0.443。这是由于淄博、洛阳、包头和张掖等城市虽为再生型城市,但工业结构高度化水平仍然较低,高新技术产业发展仍然滞后。外资吸引度的系数在1%水平上显著为负,且其对再生型城市生态效率的抑制效应比其他三类城市更强,这意味着再生型城市提高对外开放水平的需求更加迫切。资源依赖度的系数在1%水平上显著为负,说明虽然再生型城市的绝大部分矿山开采活动已经停止,但从生态效率角度看尚未彻底摆脱“资源诅咒”。

### 3 结论与讨论

本文以黄河流域资源型城市为研究对象,突出成长型、成熟型、衰退型和再生型城市的异质性,揭示其生态效率时空演变规律,识别关键驱动因素并阐明内在机制,主要结论如下:

(1) 从时序变化角度看,黄河流域资源型城市生态效率整体上以2007年为分水岭,前期保持平稳、后期持续上升,且2012年以后生态效率增速有所提高。不同城市生态效率变化趋势存在明显差异,淄博、济宁、东营、洛阳、泰安和包头增速最快,且发生了生态效率等级跃迁;鄂尔多斯、焦作和咸阳的增速次之;忻州、吕梁和榆林呈微弱下降趋势;其他城市缓慢上升。分流域区段看,下游资源型城市生态效率的增速和增幅明显高于中、上游城市。分城市类型看,再生型城市的生态效率增幅和增速明显高于成长型、成熟型和衰退型城市。

(2) 从空间格局演变角度看,可大致以2007年为分水岭划分为两个阶段。2007年以前,生态效率空间格局基本未变,黄河“几”字湾地区生态效率相对较高,低值区随机分布在流域边缘;生态效率差异大小略微下降,主要源于再生型城市的组群内差异。2007年以后,生态效率空间格局变化显著,由随机分布向集聚分布演变;低值集聚区从中游山西、河南两省交界处向山西省中、北部逆流移动,高值集聚区则一直分布在下游山东省境内,具有空间粘性;生态效率差异大小持续上升,主要源于成熟型、再生型和成长型城市的组群内差异。

(3) 从流域整体层面看,产业转型、科技投入与产出、基础设施保障和区位条件对黄河流域资源型城市生态效率的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不利于生态效率提高,其他因子影响不显著。分城市类型看,对成长型城市而言,仅基础设施保障对生态效率改善具有显著正向驱动作用,生态效率提升动力严重不

足;对成熟型城市而言,城镇化、工业化、产业转型、科技创新、基础设施完善和区位条件均具有显著正向驱动作用;对衰退型城市而言,仅城镇化、产业转型和区位条件具有显著正向作用,亟待探寻生态效率改善新动力;对再生型城市而言,城镇化、科技投入、基础设施完善和区位条件具有显著正向驱动作用,尚需在产业转型、提升外贸层次等方面努力。

根据上述研究结论,黄河流域资源型城市应充分考虑自身特质,从如下几个方面着手制订差异化政策,以提高生态效率、促进人地关系协调,切实落实黄河流域高质量发展和生态保护战略。第一,增强创新对经济发展的支撑引领作用。加大科技经费投入,支持企业和科研机构等从事R&D活动,提高原始创新、集成创新和引进消化吸收再创新能力,以提高资源深加工和综合利用水平、提升传统产业产品质量和档次、培育壮大高技术产业和战略性新兴产业。第二,加强产业结构调整升级力度。成长型城市应加快上下游产业配套,延长资源类产业链条,提高资源开发利用附加值,推动资源优势向经济优势转化。其他三类城市应通过外部产业承接和内部产业培育等多种方式促进非资源类产业(特别高新技术产业)发展,构建多元化产业体系,以充分发挥产业结构的“资源配置器”功能,调节资源消耗和环境污染的质与量。第三,以高水平开放推动高质量发展。有选择性地引进外资及港澳台资企业,注重其技术溢出效应和对本地企业的关联带动作用;逐步摒弃以资源和原材料为主的对外贸易结构,增加高技术产品占比,通过知识溢出和倒逼机制提高生态效率。特别是再生型城市,亟需调整对外贸易产品结构、提高外资引进门槛。第四,以“新基建”为契机进一步完善基础设施建设。重视城际高速铁路、城市轨道交通、工业互联网、5G基站等新型基础设施建设,推动城市智能化、信息化、高效化运转,提高基础设施对经济转型发展的支撑力;消除有形和无形的要素流动壁垒,促进资源优化配置和优质生产要素空间集聚;增强区际联系,促使资源型城市融入城市群或经济带之中。第五,调整环境规制方式和重点。在紧抓污染物末端治理不放松的同时,引导企业进行工艺创新、设备改造和产品升级,从源头上降低环境污染和生态破坏;提高企业准入门槛,避免城市成为污染型企业避难所或低端产业集聚地。

## 参考文献(References):

- [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. 求是, 2019, (20): 1-5. [XI J P. Speech at the symposium on high quality development of ecological protection in the Yellow River Basin. Qiushi, 2019, (20): 1-5.]
- [2] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展. 地理学报, 2019, 74(12): 2431-2436. [LU D D, SUN D Q. Development and management tasks of the Yellow River Basin: A preliminary understanding and suggestion. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2431-2436.]
- [3] 斯日吉模楞, 毛培. 资源型地区自然资源对经济增长影响的实证分析. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2491-2603. [SI R J M L, MAO P. Empirical analysis of the influence of natural resources on regional economic growth. Journal of Natural Resources, 2019, 34(12): 2491-2603.]
- [4] 张复明. 资源型区域面临的发展难题及其破解思路. 中国软科学, 2011, (6): 1-9. [ZHANG F M. Development dilemma and its solution in resource-based regions. China Soft Science, 2011, (6): 1-9.]
- [5] BJØRN A, HAUSCHILD M Z. Absolute versus relative environmental sustainability. Journal of Industrial Ecology, 2012, 17(2): 321-332.
- [6] 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. Ecological Indicators, 2014, 36: 665-671.
- [7] 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. 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. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2047-2063.]
- [8] 张晓娣. 生态效率变动的产业及要素推动: 基于投入产出和系统优化模型. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 748-760. [ZHANG X D. Eco-efficiency change driven by products and factors: Combining input-output and system optimization models. *Journal of Natural Resource*, 2015, 30(5): 748-760.]
- [9] 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. *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. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(1): 34-42.]
- [10] SCHALTEGGER S, STURM A. Ökologische rationalität. *Die Unternehmung*, 1990, 44(4): 273-290. [SCHALTEGGER S, STURM A. Ecological rationality. *The Enterprise*, 1990, 44(4): 273-290.]
- [11] WBCSD. Eco-efficient Leadership for Improved Economic and Environmental Performance. Geneva: WBCSD, 1996: 3-16.
- [12] CAMARERO M, CASTILLO J, PICAZO-TADEO A J, et al. Eco-efficiency and convergence in OECD countries. *Environmental and Resource Economics*, 2013, 55(1): 87-106.
- [13] ZHANG B, BI J, FAN Z, et al. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach. *Ecological Economics*, 2008, 68(1-2): 306-316.
- [14] MICKWITZ P, MELANEN M, ROSENSTRÖM U, et al. Regional eco-efficiency indicators: A participatory approach. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14(18): 1603-1611.
- [15] 胡熠娜, 彭建, 刘焱序, 等. 区域生态效率研究进展. *生态学报*, 2018, 38(23): 8277-8284. [HU Y N, PENG J, LIU Y X, et al. Review on regional eco-efficiency research. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23): 8277-8284.]
- [16] 盖美, 聂晨. 环渤海地区生态效率评价及空间演化规律. *自然资源学报*, 2019, 34(1): 104-115. [GAI M, NIE C. Ecological efficiency evaluation and spatial evolution in Bohai Rim Region. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 104-115.]
- [17] REN Y, FANG C, LIN X, et al. Evaluation of the eco-efficiency of four major urban agglomerations in Coastal Eastern China. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(8): 1315-1330.
- [18] 杨勇, 邓祥征. 中国城市生态效率时空演变及影响因素的区域差异. *地理科学*, 2019, 39(7): 1111-1118. [YANG Y, DENG X Z. The spatio-temporal evolutionary characteristics and regional differences in affecting factors analysis of China's urban eco-efficiency. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(7): 1111-1118.]
- [19] 韩瑞玲, 佟连军, 宋亚楠. 基于生态效率的辽宁省循环经济分析. *生态学报*, 2011, 31(16): 4732-4740. [HAN R L, TONG L J, SONG Y N. Analysis of circular economy of Liaoning province based on eco-efficiency. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4732-4740.]
- [20] ZHANG Y, YANG Z. Eco-efficiency of urban material metabolism: A case study in Shenzhen, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3124-3131.
- [21] 孙露, 耿涌, 刘祚希, 等. 基于能值和数据包络分析的城市复合生态系统生态效率评估. *生态学杂志*, 2014, 33(2): 462-468. [SUN L, GENG Y, LIU Z X, et al. Eco-efficiency evaluation of urban complex ecosystem based on emergy and data envelopment analyses. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(2): 462-468.]
- [22] 黄雪琴, 王婷婷. 资源型城市生态效率评价. *科研管理*, 2015, 36(7): 70-78. [HUANG X Q, WANG T T. An assessment for the eco-efficiency of resource-based cities. *Science Research Management*, 2015, 36(7): 70-78.]
- [23] YAN D, KONG Y, YE B, et al. Spatial variation of energy efficiency based on a Super-Slack-Based measure: Evidence from 104 resource-based cities. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 117669, Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117669.
- [24] YU T, HUANG J, ZHANG N. Modeling the eco-efficiency of Chinese prefecture-level cities with regional heterogeneities: A comparative perspective. *Ecological Modelling*, 2019, 402: 1-17.
- [25] HARTMAN H L, MUTMANSKY J M. *Introductory Mining Engineering*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002.
- [26] KUMAR A, NIKHIL K. Environmental impact assessment study of non-metal mines: A critical review. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2014, 2(5): 324-326.
- [27] WANG Y, CHEN X. Natural resource endowment and ecological efficiency in China: Revisiting resource curse in the context of ecological efficiency. *Resources Policy*, 2020, 66: 101610, Doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101610.

- [28] 李惠娟, 龙如银, 兰新萍. 资源型城市的生态效率评价. 资源科学, 2010, 32(7): 1296-1300. [LI H J, LONG R Y, LAN X P. Assessment for eco-efficiency of resource-based cities. Resource Science, 2010, 32(7): 1296-1300.]
- [29] 尹倩倩, 仇方道. 再生性资源型城市生态效率异质性及工业结构解析. 地理与地理信息科学, 2019, 35(11): 119-216. [YIN Q Q, QIU F D. Heterogeneity and related industrial sector structure analysis on eco-efficiency of regenerative resource. Geography and Geo-Information Science, 2019, 35(11): 119-216.]
- [30] LIU L, SUN Q. Empirical research on ecological efficiency of coal resource-dependent cities in China. Journal of Environmental Engineering, 2019, 145(9): 04019047, Doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001564.
- [31] WANG D, WAN K, YANG J. Measurement and evolution of eco-efficiency of coal industry ecosystem in China. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 803-818.
- [32] LI B, DEWAN H. Efficiency differences among China's resource-based cities and their determinants. Resources Policy, 2017, 51: 31-38.
- [33] SONG M, ZHAO X, SHANG Y P, et al. Realization of green transition based on the anti-driving mechanism: An analysis of environmental regulation from the perspective of resource dependence in China. Science of the Total Environment, 2020, 698: 134317, Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134317.
- [34] SALMI O. Eco-efficiency and industrial symbiosis: A counterfactual analysis of a mining community. Journal of Cleaner Production, 2007, 15: 1696-1705.
- [35] WANG Y, LI P, ZHU Z, et al. The evaluation of eco-efficiency of the industrial coupling symbiosis network of the eco-industrial park in oil and gas resource cities. Energy Sciences & Engineering, 2019, 7(3): 899-911.
- [36] LU C, WANG S, WANG K, et al. Uncovering the benefits of integrating industrial symbiosis and urban symbiosis targeting a resource-dependent city: A case study of Yongcheng, China. Journal of Cleaner Production, 2020, 255: 120210. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120210>.
- [37] KORHONEN J, SNÄKIN J. Quantifying the relationship of resilience and eco-efficiency in complex adaptive energy systems. Ecological Economics, 2015, 120: 83-92.
- [38] 黄河水利委员会. 黄河流域综合规划(2012—2030). 郑州: 黄河水利出版社, 2013. [Yellow River Committee. Yellow River Basin Comprehensive Planning (2012-2030). Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2013.]
- [39] 国务院. 全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020). [http://www.gov.cn/zwggk/2013-12/03/content\\_2540070.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2013-12/03/content_2540070.htm), 2013-11-12/2020-03-05. [State Council. Sustainable development planning of the national resource-based cities (2013-2020). [http://www.gov.cn/zwggk/2013-12/03/content\\_2540070.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2013-12/03/content_2540070.htm), 2013-11-12/2020-03-05.]
- [40] 余建辉, 李佳洛, 张文忠. 中国资源型城市识别与综合类型划分. 地理学报, 2018, 73(4): 677-687. [YU J H, LI J, ZHANG W Z. Identification and classification of resource-based cities in China. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 677-687.]
- [41] THEIL H. Economics and Information Theory. Amsterdam: North Holland, 1967.
- [42] SOKAL R R, ODEN N L. Spatial autocorrelation in biology: 1. Methodology. Biological Journal of Linnean Society, 1978, 10(2): 199-228.
- [43] NAMAYANDE M S, NEJADKOORKI F, NAMAYYANDE S M, et al. Spatial hotspot analysis of acute myocardial infarction events in an urban population: A correlation study of health problems and industrial installation. Iranian Journal of Public Health, 2016, 45(1): 94-101.
- [44] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000. 经济研究, 2004, (10): 35-44. [ZHANG J, WU G Y, ZHANG J P. The estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000. Economic Research Journal, 2004, (10): 35-44.]
- [45] 晋城市人民政府办公厅. 关于鼓励富士康科技集团投资项目的优惠政策的批复. [http://www.jcgov.gov.cn/zwggk/wjgg/zxwj/201811/t20181129\\_300518.shtml](http://www.jcgov.gov.cn/zwggk/wjgg/zxwj/201811/t20181129_300518.shtml), 2008-11-29/2020-4-10. [General Office of Jincheng Municipal People's Government. Reply of preferential policies for encouraging investment projects of Foxconn Technology Group. [http://www.jcgov.gov.cn/zwggk/wjgg/zxwj/201811/t20181129\\_300518.shtml](http://www.jcgov.gov.cn/zwggk/wjgg/zxwj/201811/t20181129_300518.shtml), 2008-11-29/2020-4-10.]



## The spatio-temporal evolution and driving factors of eco-efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin

YAN Xiao<sup>1,2</sup>, TU Jian-jun<sup>3</sup>

(1. Cooperative Innovation Center for Transition of Resource-based Economics, Shanxi University of Finance & Economics, Taiyuan 030006, China; 2. Research Institute of Transition of Resource-based Economics, Shanxi University of Finance & Economics, Taiyuan 030006, China; 3. College of Economics and Management, Southwest University, Chongqing 400700, China)

**Abstract:** Eco-efficiency is the comprehensive embodiment of regional development quality, and the synthetic reflection of coordination degree between socio-economic system and environmental system. Taking the Yellow River Basin as the research area, this study explored the spatio-temporal evolution and driving forces of eco-efficiency of resource-based cities. At first, eco-efficiencies of 37 resource-based cities from 2003 to 2017 were evaluated, using the TOPSIS method. Then, the spatio-temporal changing trends were revealed through the Theil index, the Global Spatial Autocorrelation analysis and the Hotspot analysis. At last, the key driving factors of eco-efficiency change were explored by the Panel Tobit Regression model. The results showed that: (1) On the whole, the eco-efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin stabilized first and then increased during 2003 and 2017, with 2007 as the turning point. However, the quantity and rate of eco-efficiency growth varied considerably among resource-based cities. The two indexes of downstream cities were significantly higher than those of middle and upstream cities, and these two indexes of regenerative cities were significantly higher than those of growing cities, grow-up cities and recessionary cities. (2) The eco-efficiency gap between resource-based cities decreased slightly at first and then increased continuously during 2003 and 2017. Meanwhile, the eco-efficiency spatial distribution pattern of resource-based cities evolved from random state to aggregate state. Specifically, the low-value agglomeration areas were distributed at the junction of Shanxi and Henan provinces at first, and then moved upstream to the central and northern parts of Shanxi province. The high-value agglomeration areas, however, remained consistently in Shandong province, which is located in the lower reaches of the Yellow River. (3) In general, industrial transformation, scientific and technological innovation, infrastructure improvement and location conditions had significant positive effects on the improvement of eco-efficiency in the study area. However, export-oriented economy, resource dependence and environmental regulation had significant inhibitory effects, and urbanization, industrialization and foreign capital utilization had no significant impact. It is worth noting that the driving factors of eco-efficiency were heterogeneous across different types of resource-based cities, which means that different resource-based cities should take different measures to improve their eco-efficiencies.

**Keywords:** Yellow River Basin; resource-based cities; eco-efficiency; spatio-temporal evolution; driving factors