

## 黄河流域生态效率的空间差异、 动态演进及驱动因素<sup>①</sup>

陈明华 岳海璐 郝云飞 刘文斐

(山东财经大学经济学院)

**研究目标：**揭示黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素。**研究方法：**构建 MinDS 模型测算 2004~2017 年黄河流域生态效率水平，采用 Dagum 基尼系数和核密度估计方法探究其空间差异和动态演进，借助地理探测器考察生态效率时空演进的驱动因素。**研究发现：**黄河流域生态效率呈现“东高西低”空间分布格局；区域间差异是生态效率空间差异的主要来源；中上游地区内部生态效率的绝对差异呈扩大态势，流域整体及三大地区均存在右拖尾和极化现象；从内源性因素看，经济发展差异是生态效率空间差异的主导因素，经济发展与能源消耗的交互组合是关键性驱动因素；从外源性因素看，人口密度差异对流域整体及中上游地区的驱动作用较高，外在因素协同作用增强了对生态效率时空演进的解释力。**研究创新：**基于城市视角考察黄河流域生态效率的时空演进规律，并从内源和外源两个层面揭示其成因。**研究价值：**为推动黄河流域生态效率协同提升提供有益借鉴。

**关键词** 黄河流域 生态效率 时空演进 地理探测器

**中图分类号** F061.5 **文献标识码** A

### 引 言

黄河流域是汇集淡水资源补给地、能源储蓄基地和农产品主产区等的重要生态功能区和经济地带。自党的十八大以来大力推进生态文明建设以来，黄河流域经济绿色发展取得长足进展，生态治理保护工作卓有成效，但仍面临着较为严峻的生态环境形势。由于黄河流域生态本底脆弱，加之经济发展方式与生态保护要求相矛盾，以能源化工为主的产业结构对生态承载力造成巨大压力，使得黄河治理保护工作依旧存在水资源短缺、资源环境高负载、流域发展质量较低等问题与挑战。2019 年 9 月，习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上强调，在治理黄河的过程中要坚持绿水青山就是金山银山的发展理念，秉持“生态优先、绿色发展”的治理观，遵循“共同抓好大保护、协同推进大治理”的治理思路，让黄河成为造福人民的幸福河。这意味着统筹推进黄河流域生态保护与经济社会建设协调发展、综合提升全域生态效率水平已经成为推动黄河流域高质量发展的必然选择。然而，黄河流域经区域的经济社会基础、资源要素禀赋和生态环境状况等差异较大，实现黄河流域生态效

<sup>①</sup> 本文获得国家社会科学基金项目“空间异质性视角下长江经济带生态效率评价及提升路径研究”(19BJY087)、山东省高等学校青创科技支持计划“雾霾污染的全球交互影响网络及协同治理战略研究”(2020RWE001)、山东省社会科学规划研究项目“黄河流域生态效率评价及高质量发展路径研究”(20CJJJ29)的资助。

率协同提升并非易事。城市作为经济发展和生态治理保护的载体,是促进流域绿色协调发展的核心推动力,故本文基于城市视角科学测度黄河流域生态效率水平,全面考察黄河流域生态效率空间差异、动态演进及驱动因素,这对于实现黄河流域高标准生态保护与高质量转型发展的和谐统一具有重要的理论和现实意义。

Schaltegger 和 Sturm (1990) 首次基于经济社会与生态环境协调发展思想提出“生态效率”的概念,即经济增值与环境影响的比值。世界可持续发展工商理事会(WBCSD)于1992年对生态效率的含义进行补充和完善,认为生态效率是以最小化的资源消耗和环境影响为代价,来获得能够满足人类生活所需的产品与服务。此后,国内外学者在生态效率领域的研究成果不断涌现,相关研究主要从三个方面展开:第一,生态效率测度。已有研究主要采用比值法、指标体系法、模型法等方法对生态效率进行测度。比值法的核心思想在于通过测算经济产出价值与环境影响的比值对生态效率进行评价,但指标选取弹性有限,难以确定生态效率最优的比率集合,故无法对生态效率做出准确评价(Quarriguasi等,2009)。指标体系法通过选取各要素的效率指标来构建效率评价体系,能够综合反映经济、社会发展和自然环境的可持续发展程度,但在环境指标和经济指标赋权过程中难以克服主观因素的影响(Caneghem等,2010)。由于模型法通过统计学中的客观赋权法替代传统主观赋权法,故能有效克服指标体系法在赋权方面的局限性(Lauwers,2009)。数据包络分析法(Data Envelopment Analysis, DEA)可同时采用多重投入和产出单元对经济发展和环境影响的相对效率进行评价,是应用最为广泛的模型法(杨斌,2009;程晓娟,2013)。传统DEA模型在角度和径向选择中往往存在投入和产出同比例变动等松弛性问题,而Tone(2001)提出的非期望产出SBM模型能够最大限度地克服传统DEA模型在径向测度中的松弛性问题,但SBM模型采用至生产前沿最远投影点作为有效决策单元的衡量标准,使得无效决策单元的效率改进进程相对困难。为克服上述问题,强有效前沿最近距离模型(Minimum Distance to Strong Efficiency Frontier, MinDS)引入强有效前沿面最小距离法作为投影点的距离,从而更加真实、客观地评价效率水平(李静和任继达,2018)。李胜兰等(2014)运用MinDS模型测算1997~2010年中国30个省份生态效率,并考察了环境规制对生态效率的影响。第二,生态效率空间差异分析。已有研究多采用传统基尼系数等方法对生态效率空间差异进行测度,往往忽略了子样本的具体分布状况,Dagum基尼系数及其分解方法能够有效解决子样本的交叉重叠问题,从而准确地反映相对差异大小及来源(陈明华等,2016)。第三,生态效率时空演进的驱动因素研究。尽管现有文献围绕经济社会因素与自然因素对生态效率时空演进的成因进行了广泛研究,但大多采用传统的回归统计方法和空间分析方法,在考察多个驱动因素的交互作用方面相对薄弱。地理探测器作为度量和挖掘空间异质性的新兴统计方法,在识别时空演进背后的驱动因素及其交互影响方面具有独特优势(王劲峰和徐成东,2017),正逐渐被应用于区域经济、生态经济和贫困问题等研究中(丁悦等,2014;程哲等,2020;刘彦随和李进涛,2017)。

随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略,学术界围绕黄河流域生态问题开展了大量理论和实证研究。部分学者从定性角度对统筹推进黄河流域生态保护和高质量发展进行了理论分析。金凤君(2019)认为协同推进黄河流域生态保护与高质量发展,需要重点把握“四大关系”,强化长效机制与体系,充分发挥“三区七群”的比较优势并促进流域绿色发展;依据“共同抓好大保护,协同推进大治理”战略思路。任保平和张倩(2019)提出通过完善战略内容设计和战略支撑体系来共同推进黄河流域高质量发展,进而实现“让

黄河成为造福人民幸福河”的战略目标。此外,也有部分文献从定量角度对黄河流域资源利用与绿色发展进行实证研究。如关伟等(2020)基于超效率SBM模型从省际视角出发刻画了黄河流域能源综合效率的时空演变特征,研究发现其能源综合效率呈现“U”形时序演进与“东高西低”的空间格局。基于数据包络分析框架,陈明华等(2020)考察了黄河流域生态效率的内在增长潜力与外部驱动因素,为推进黄河流域生态效率协同提升与经济高质量发展提供了依据。从已有文献来看,关于黄河流域生态效率的研究仍存在较大拓展空间:第一,大多文献基于省际尺度展开研究,缺乏城市口径的相关分析;第二,已有研究多采用SBM模型测算黄河流域生态效率水平,在评价无效的生产决策单元时往往会低估其实际效率值;第三,对黄河流域生态效率的空间分析以定性研究为主,关于生态效率时空演进规律的定量研究相对不足;第四,聚焦黄河流域生态效率空间差异与动态演进成因的文献相对匮乏。鉴于此,本文将基于城市口径对黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素展开研究。首先,采用MinDS模型从流域整体、三大地区对比和地级市评级三个层次全面评价黄河流域生态效率水平;其次,运用Dagum基尼系数及分解方法考察黄河流域生态效率空间差异大小及其来源;再次,利用核密度估计方法刻画黄河流域生态效率的动态演进;最后,借助地理探测器分别探究内源性因素和外源性因素对黄河流域生态效率时空演进的驱动作用及交互影响,进而提出有针对性的生态效率协同提升对策。

## 一、研究方法 with 数据

### 1. 研究方法

(1) 非期望产出 MinDS 模型。本文采用非期望产出 MinDS 模型测算黄河流域生态效率。首先利用 SBM 模型筛选出所有有效决策单元作为参考标杆形成有效子集  $E$ , 再采取标准化引入松弛变量以增加约束条件的方法, 将有效子集  $E$  置于同一超平面内, 最后将强有效前沿上距离最近的点作为投影点, 通过求解混合整数线性规划得到 MinDS 模型效率值 (Aparicio 等, 2007)。其中,  $\rho$  为生态效率, 样本考察期为  $A$  ( $a=1, 2, \dots, A$ ), 被评价决策单元的数量为  $N$  ( $n=1, 2, \dots, N$ ), 每个决策单元的权重为  $\lambda_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ )。  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 代表每个决策单元的投入,  $v_i$  ( $v_i \geq 1$ ) 为投入权重,  $s_i^-$  为投入的松弛变量;  $y_r$  ( $r=1, 2, \dots, q_1$ ) 代表每个决策单元的期望产出,  $\mu_r$  ( $\mu_r \geq 1$ ) 为期望产出权重,  $s_r^+$  为期望产出的松弛变量;  $z_p$  ( $p=1, 2, \dots, q_2$ ) 代表每个决策单元的非期望产出,  $\beta_p$  ( $\beta_p \geq 1$ ) 为非期望产出权重,  $s_p^-$  为非期望产出的松弛变量。

$$\begin{aligned} \max \rho_k &= \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{s_i^-}{x_{ik}}\right)}{\frac{1}{q_1} \sum_{r=1}^{q_1} \left(1 + \frac{s_r^+}{y_{rk}}\right) + \frac{1}{q_2} \sum_{p=1}^{q_2} \left(1 + \frac{s_p^-}{z_{pk}}\right)} \quad (1) \\ \text{s. t. } &\sum_{j \in E} \sum_{a=1}^A x_{ij} \lambda_j + s_i^- = x_{ik} \quad s_i^- \geq 0 \\ &\sum_{j \in E} \sum_{a=1}^A x_{rj} \lambda_j - s_r^+ = y_{rk} \quad s_r^+ \geq 0 \\ &\sum_{j \in E} \sum_{a=1}^A y_{pj} \lambda_j + s_p^- = z_{pk} \quad s_p^- \geq 0 \\ &\lambda_j \geq 0 \quad j \in E \end{aligned}$$

$$-\sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + \sum_{r=1}^{q_1} \mu_r y_{rj} - \sum_{p=1}^{q_2} \beta_p z_{pj} + d_j = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} d_j &\leq M b_j & \lambda_j &\leq M(1 - b_j) \\ b_j &\in \{0, 1\} & d_j &\geq 0 \end{aligned}$$

(2) Dagum 基尼系数及其分解方法。本文采用 Dagum 基尼系数及其分解方法考察黄河流域生态效率的相对差异。基于子样本分解分析法, 总体差异来源可分解为区域内差异贡献、区域间净值差异贡献和超变密度贡献 (Dagum, 1997)。总体基尼系数如式 (3) 所示, 根据生态效率的均值对地区进行排序得到式 (4)。式 (5)、式 (6) 分别表示  $j$  地区的基尼系数  $G_{jj}$  和  $j$  地区内差异贡献  $G_w$ , 式 (7)、式 (8) 分别表示  $j$ 、 $h$  地区间的基尼系数  $G_{jh}$  和  $j$ 、 $h$  地区间净值差异贡献  $G_{nb}$ , 式 (9) 表示超变密度  $G_t$ , 三者关系满足:  $G = G_w + G_{nb} + G_t$ 。其中,  $y_{ji}$  ( $y_{hr}$ ) 代表  $j$  ( $h$ ) 地区中  $i$  ( $r$ ) 城市的生态效率,  $\bar{y}$  代表各城市生态效率的均值,  $n$  为城市个数,  $k$  为地区个数。  $n_j$  ( $n_h$ ) 为  $j$  ( $h$ ) 地区内城市个数;  $\bar{y}_j$  ( $\bar{y}_h$ ) 为  $j$  ( $h$ ) 地区内各城市生态效率的均值。

$$G = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{2n^2 \bar{y}} \quad (3)$$

$$\bar{y}_h \leq \cdots \leq \bar{y}_j \leq \cdots \leq \bar{y}_k \quad (4)$$

$$G_{jj} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |y_{ji} - y_{jr}|}{n_j^2 \bar{y}_j} \quad (5)$$

$$G_w = \sum_{j=1}^k G_{jj} p_j s_j \quad (6)$$

$$G_{jh} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}|}{n_j n_h (\bar{y}_j + \bar{y}_h)} \quad (7)$$

$$G_{nb} = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (p_j s_h + p_h s_j) D_{jh} \quad (8)$$

$$G_t = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (p_j s_h + p_h s_j) (1 - D_{jh}) \quad (9)$$

$$\text{s. t. } p_j = \frac{n_j}{n} \quad s_j = \frac{n_j \bar{y}_j}{n \bar{y}} (j = 1, 2, \cdots, k)$$

(3) 核密度估计方法。核密度估计方法是用以研究空间分布非均衡问题的非参数估计方法, 该方法旨在对随机变量的概率密度进行估计, 利用平滑的连续密度曲线描述其动态演进。随机变量  $X$  的密度函数  $f(x)$  在点  $x$  的概率密度公式如式 (10) 所示, 本文选择高斯核函数来研究黄河流域生态效率动态演进, 其表达式如式 (11) 所示。  $N$  为样本观测值个数;  $X_i$  为独立同分布的观测值;  $\bar{X}$  为均值;  $h$  为带宽, 带宽反映了密度函数曲线的平滑程

度和估计精确程度。核函数  $K(\cdot)$  作为加权函数或平滑转换函数需满足的条件如式 (12) 所示。

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{X_i - \bar{X}}{h}\right) \quad (10)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (11)$$

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow \infty} K(x) \cdot x = 0 \\ K(x) \geq 0, \int_{-\infty}^{+\infty} K(x) dx = 1 \\ \sup K(x) < +\infty, \int_{-\infty}^{+\infty} K^2(x) dx = 1 \end{cases} \quad (12)$$

(4) 地理探测器。地理探测器是探测地理要素空间分异性并揭示其驱动因素的统计学方法，其核心思想是将研究区域划分为若干子区域，通过比较区域总体方差与子区域方差之和的大小来判断地理要素是否存在空间分异性，通过探测自变量与因变量的空间分布是否具有相似性，即是否存在统计关联，来揭示引起因变量空间分异的驱动力（王劲峰和徐成东，2017）。本文引入决定力指标  $q$  值来度量各因素对黄河流域生态效率时空演进的影响程度，如式 (13) 所示。 $q$  的值域为  $[0, 1]$ ， $q$  值越大表示变量  $Z_i$  对生态效率时空演进的解释力越大。当  $q=0$  时表示变量  $Z_i$  无法解释生态效率的空间分布，当  $q=1$  时表示变量  $Z_i$  与生态效率的空间分布具有一致性。其中， $h=1, 2, \dots, m$ ，为自变量  $Z$  或因变量  $Y$  的分区， $n$  为研究区域的总样本数， $\sigma^2$  为研究区域的总离散方差， $n_h$  为分区  $h$  的样本数， $\sigma_h^2$  为因变量  $Y$  在分区  $h$  的离散方差。

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^m n_h \cdot \sigma_h^2 \quad (13)$$

交互作用探测器通过比较单变量的  $q$  值和双变量空间叠加后的  $q$  值来探测双变量交互作用的强弱及方向，并评估这种交互作用是否会影响单一变量对因变量空间非均衡的解释程度。具体探测原理是通过比较变量  $Z_i$ 、 $Z_j$  及两者叠加后的  $q$  值，即  $q(Z_i)$ 、 $q(Z_j)$  和  $q(Z_i \cap Z_j)$ ，判断变量  $Z_i$  和  $Z_j$  交互作用的类型。若  $q(Z_i \cap Z_j) < \min(q(Z_i), q(Z_j))$ ，则  $Z_i$  和  $Z_j$  的交互类型为非线性减弱型；若  $\min(q(Z_i), q(Z_j)) < q(Z_i \cap Z_j) < \max(q(Z_i), q(Z_j))$ ，则  $Z_i$  和  $Z_j$  的交互类型为单因子非线性减弱型；若  $\max(q(Z_i), q(Z_j)) < q(Z_i \cap Z_j) < q(Z_i) + q(Z_j)$ ，则  $Z_i$  和  $Z_j$  的交互类型为双因子加强型；若  $q(Z_i \cap Z_j) = q(Z_i) + q(Z_j)$ ，则  $Z_i$  和  $Z_j$  相互独立；若  $q(Z_i \cap Z_j) > q(Z_i) + q(Z_j)$ ，则  $Z_i$  和  $Z_j$  的交互类型为非线性加强型。

## 2. 指标选取与区域界定

投入指标包括劳动力、能源、土地和资本。本文选取城镇单位从业人员期末人数、城镇私营和个体从业人员（人）的汇总数据作为劳动力投入，选取全社会用电量（万千瓦时）作为能源消耗的代理变量，以建成区面积（平方公里）表示土地资源消耗，将通过永续存盘法计算得到的资本存量作为资本投入，具体计算公式为： $K_{i,t} = (1 - \delta_{i,t}) K_{i,t-1} + I_{i,t}$ 、 $K_0 = I_0 / (g_i + \delta)$ 。其中， $K_{i,t}$  为  $i$  城市第  $t$  年的资本存量， $K_0$  为基期的资本存量，用  $i$  城市基期

的全社会固定资产实际投资  $I_{i,0}$  对第  $t$  年的全社会固定资产投资平减后的值作为  $I_{i,t}$ ,  $I_0$  为基期全社会固定资产实际投资,  $\delta_{i,t}$  为  $i$  城市第  $t$  年的资本折旧率,  $g_i$  为样本考察期内全社会固定资产实际投资的几何平均增长率,  $\delta$  为资本折旧率。

产出指标包括期望产出与非期望产出。本文选取地区生产总值作为生态效率评价的期望产出指标,并以2004年为基期对数据进行平减处理来剔除价格因素的影响。在非期望产出指标选取方面,本文利用熵权法对工业二氧化硫排放量和工业废水排放量进行客观赋权,从而构建污染指数作为生态效率评价的非期望产出指标。

黄河流域上、中、下游地区自然流域划分是以内蒙古河口镇和河南省桃花峪为节点,而经济流域划分范围尚未有统一的界定。本文在自然流域划分范围的基础上,以保持地理单元的连续性和省级行政单元的完整性为原则,选取2004~2017年黄河流域9个省份100个地级及以上城市为考察对象,并将城市样本分为上、中、下游三大地区<sup>①</sup>。以上数据均来源于《中国城市统计年鉴》及各省份统计年鉴。

## 二、黄河流域生态效率的测度与评价

本文采用MinDS模型对2004~2017年黄河流域城市生态效率进行测度,进而从流域整体、三大地区对比和地级市评级3个层次全面评价黄河流域生态效率的发展状况。从流域全局层面看,如图1(a)所示,黄河流域生态效率在波动中有所提升,年均增长0.18%,说明随着生态文明建设的稳步推进,在经济社会发展过程中兼顾生态治理保护,生态效率得到有效提升。从演变过程看,2004~2008年生态效率呈先降后升的波动态势。此阶段,随着经济高速发展,黄河流域存在产业结构不合理、资源开发方式粗放、污染严重等问题,生态效率水平相对较低。2008~2011年生态效率得到较大幅度提升,这表明受2008年全球金融危机的冲击,中国开始加快调整经济增长方式和产业结构,健全生态环境法治与监管机制,在建设资源节约型和环境友好型社会的背景下,黄河流域生态环境状况不断得到改善,生态效率水平逐步提高。2011年以后生态效率波动下降,年均递减率为0.49%,长期以来工业化发展加重了环境承载压力,资源开发与环境保护的矛盾日益加深,黄河流域生态环境保护与治理进入攻坚克难时期,生态效率面临下行压力。

从三大地区对比的视角看,黄河流域生态效率呈现“东高西低”的空间分布格局。从图1(b)可以看出,下游地区生态效率在0.88~0.91区间平稳波动,其生态效率水平显著高于中上游地区,中上游地区生态效率水平较为接近,但中游总体高于上游,其差值呈现“收敛—发散—收敛”的波动趋势。从演变趋势看,2004~2011年中游地区生态效率波动上升,此后呈波动下降趋势,上游地区演变过程与之基本一致。由此可见,伴随着黄河流域经济发展的空间差异化现象,三大地区生态环境质量不平衡问题也逐渐凸显。中上游地区正面临着发展方式粗放、煤烟型污染严重、生态环境问题加剧等挑战。具体来说,上游地区荒漠化问

① 上游地区包括36个城市:西宁、兰州、嘉峪关、天水、定西、平凉、庆阳、张掖、武威、白银、酒泉、金昌、陇南、中卫、吴忠、固原、石嘴山、银川、乐山、内江、南充、宜宾、巴中、广元、广安、德阳、成都、攀枝花、泸州、眉山、绵阳、自贡、资阳、达州、遂宁、雅安;中游地区包括30个城市:乌兰察布、乌海、包头、呼伦贝尔、呼和浩特、巴彦淖尔、赤峰、通辽、鄂尔多斯、咸阳、商洛、安康、宝鸡、延安、榆林、汉中、渭南、西安、铜川、临汾、吕梁、大同、太原、忻州、晋中、晋城、朔州、运城、长治、阳泉;下游地区包括34个城市:三门峡、信阳、南阳、周口、商丘、安阳、平顶山、开封、新乡、洛阳、漯河、濮阳、焦作、许昌、郑州、驻马店、鹤壁、东营、临沂、威海、德州、日照、枣庄、泰安、济南、济宁、淄博、滨州、潍坊、烟台、聊城、莱芜、菏泽、青岛。

题较为严重,植被稀疏、生态承载力较差;中游地区煤炭资源丰富,在生产和深加工煤炭的过程中也形成了废水、二氧化硫等污染物的高排放现象,生态环境承载压力不断增加,阻碍了生态效率的有效提升。

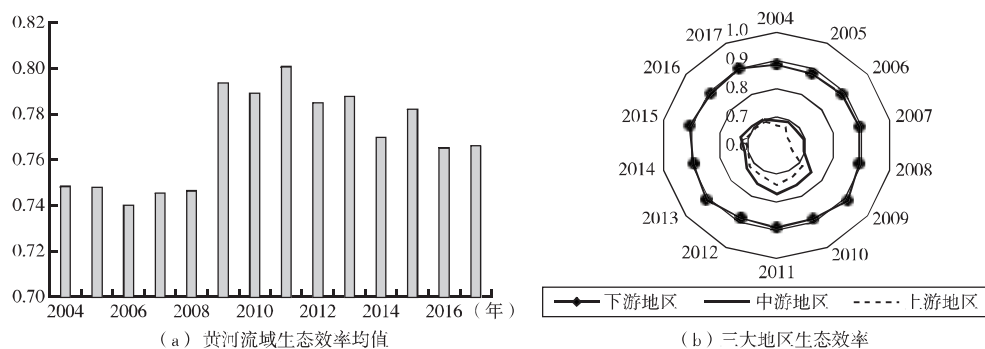


图1 黄河流域生态效率的时空演变过程

资料来源:作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴数据计算结果绘制。

为更加细致地反映黄河流域生态效率的空间格局,本文对所有城市生态效率进行评级<sup>①</sup>。结果显示下游地区有44.12%的城市生态效率达到优良水平,这与其自然经济基础良好、绿色创新技术领先、产业结构合理等方面的优势密切相关。值得注意的是,生态效率评级为“中”的城市比重高达50%,且主要分布于河南,豫北地区生态效率排名较为靠后,应作为治理工作的重中之重。

中游地区城市间生态效率水平差异较大。内蒙古鄂尔多斯市在考察期内生态效率均大于1,生态效率均值在全域位列第一。21世纪初,在生态环境严重过载的情况下,鄂尔多斯市采取了“转移收缩”战略、建设“大漠披绿”和“水草丰美”工程等一系列举措,保证经济社会发展稳中有进的同时,在退耕还林、维持生态涵养、自然保护区建设等多方面收效显著。然而,中游地区有60%的城市生态效率评级为“中”,这表明其生态问题依然严峻,生态效率仍有较大提升空间。评级为“差”的城市约占36%,多分布在山西和陕西,内蒙古只有乌兰察布市和乌海市生态效率均值在0.7以下。山西、陕西和内蒙古部分地区是严重的煤烟型污染区,其能源利用以煤炭为主,二氧化硫等废气排放浓度高、污染面积大,加剧了生态环境脆弱性和敏感性,制约了中游地区经济绿色发展。

上游地区生态效率评级为“差”的城市所占比例高达52.78%,主要分布在宁夏、甘肃和青海。其中,宁夏和青海所有城市生态效率均值均低于0.7,甘肃除定西市和庆阳市以外,其他城市生态效率评级均为“差”,生态环境状况亟待改善。上游地区本就面临着生态环境本底脆弱和生态承载力较差等多重考验,宁夏、甘肃和青海等地虽然拥有丰富的能源资源储备,但粗放型资源开发和初级加工,以及能源化工基地排放大量污染废弃物,加重了生态脆弱性,使得水土流失、土地荒漠化问题严重,经济社会发展的资源环境代价较大。因此,应充分认识各地区经济结构和生态环境的差异性,因地制宜、分类发展,促进黄河流域城市生态效率协同提升。

<sup>①</sup> 生态效率评级标准(解亚丽等,2020):生态效率均值小于0.7,则评级为“差”;生态效率均值在0.7~0.9之间,则评级为“中”;生态效率均值在0.9~1之间,则评级为“良”;生态效率均值不小于1,则评级为“优”。

### 三、黄河流域生态效率空间差异大小及其来源

本文采用 Dagum 基尼系数及其分解方法对黄河流域生态效率的总体差异、区域内差异、区域间差异及贡献率进行测算,旨在揭示黄河流域生态效率空间差异大小及来源,测算结果如表 1、表 2 所示。

表 1 黄河流域生态效率的基尼系数

| 年 份  | 总体基尼系数 | 区域内基尼系数 |        |        | 区域间基尼系数 |        |        |
|------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
|      |        | 上游      | 中游     | 下游     | 下游与中游   | 下游与上游  | 中游与上游  |
| 2004 | 0.1549 | 0.1832  | 0.1035 | 0.1076 | 0.1526  | 0.1864 | 0.1543 |
| 2005 | 0.1517 | 0.1764  | 0.1063 | 0.1055 | 0.1501  | 0.1813 | 0.1518 |
| 2006 | 0.1577 | 0.1766  | 0.1158 | 0.0998 | 0.1590  | 0.1952 | 0.1558 |
| 2007 | 0.1562 | 0.1777  | 0.1195 | 0.0927 | 0.1543  | 0.1942 | 0.1576 |
| 2008 | 0.1511 | 0.1660  | 0.1212 | 0.0904 | 0.1540  | 0.1856 | 0.1501 |
| 2009 | 0.1286 | 0.1606  | 0.0847 | 0.0806 | 0.1186  | 0.1603 | 0.1316 |
| 2010 | 0.1209 | 0.1452  | 0.0928 | 0.0844 | 0.1104  | 0.1439 | 0.1245 |
| 2011 | 0.1247 | 0.1554  | 0.1009 | 0.0845 | 0.1107  | 0.1436 | 0.1336 |
| 2012 | 0.1304 | 0.1570  | 0.1128 | 0.0795 | 0.1216  | 0.1502 | 0.1400 |
| 2013 | 0.1381 | 0.1758  | 0.1019 | 0.0746 | 0.1311  | 0.1639 | 0.1479 |
| 2014 | 0.1408 | 0.1646  | 0.1099 | 0.0877 | 0.1437  | 0.1630 | 0.1440 |
| 2015 | 0.1402 | 0.1662  | 0.1069 | 0.0895 | 0.1383  | 0.1654 | 0.1430 |
| 2016 | 0.1410 | 0.1667  | 0.1062 | 0.0905 | 0.1410  | 0.1658 | 0.1430 |
| 2017 | 0.1427 | 0.1676  | 0.1030 | 0.0904 | 0.1464  | 0.1688 | 0.1429 |
| 均 值  | 0.1413 | 0.1671  | 0.1061 | 0.0898 | 0.1380  | 0.1691 | 0.1443 |

资料来源:作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴数据计算结果整理。

表 2 黄河流域生态效率空间差异来源贡献 (单位:%)

| 年 份  | 区域内贡献率 |      |      |       | 区域间贡献率 |       |       |       | 超变密度<br>贡献率 |
|------|--------|------|------|-------|--------|-------|-------|-------|-------------|
|      | 上游     | 中游   | 下游   | 总体    | 下游与中游  | 下游与上游 | 中游与上游 | 总体    |             |
| 2004 | 13.74  | 5.52 | 9.50 | 28.76 | 17.40  | 22.61 | 1.53  | 41.54 | 29.70       |
| 2005 | 13.51  | 5.83 | 9.46 | 28.80 | 17.04  | 22.66 | 1.95  | 41.66 | 29.55       |
| 2006 | 12.66  | 6.12 | 8.78 | 27.56 | 17.77  | 25.50 | 3.68  | 46.95 | 25.49       |
| 2007 | 12.79  | 6.43 | 8.22 | 27.44 | 17.30  | 25.94 | 4.58  | 47.82 | 24.74       |
| 2008 | 12.41  | 6.75 | 8.26 | 27.42 | 17.52  | 26.07 | 4.45  | 48.04 | 24.54       |
| 2009 | 14.58  | 5.62 | 8.34 | 28.54 | 16.10  | 23.77 | 3.93  | 43.80 | 27.66       |
| 2010 | 14.27  | 6.63 | 9.08 | 29.98 | 13.99  | 21.05 | 3.76  | 38.80 | 31.22       |
| 2011 | 14.93  | 7.02 | 8.71 | 30.66 | 12.20  | 18.50 | 3.41  | 34.11 | 35.23       |
| 2012 | 14.31  | 7.43 | 7.94 | 29.68 | 13.51  | 19.75 | 3.13  | 36.39 | 33.93       |
| 2013 | 15.07  | 6.17 | 7.21 | 28.45 | 16.71  | 21.38 | 1.17  | 39.25 | 32.29       |

(续)

| 年 份  | 区域内贡献率 |      |      |       | 区域间贡献率 |       |       |       | 超变密度<br>贡献率 |
|------|--------|------|------|-------|--------|-------|-------|-------|-------------|
|      | 上游     | 中游   | 下游   | 总体    | 下游与中游  | 下游与上游 | 中游与上游 | 总体    |             |
| 2014 | 13.80  | 6.49 | 8.37 | 28.66 | 17.23  | 21.78 | 0.97  | 39.98 | 31.36       |
| 2015 | 13.90  | 6.39 | 8.58 | 28.87 | 16.89  | 22.49 | 1.96  | 41.34 | 29.79       |
| 2016 | 13.90  | 6.27 | 8.64 | 28.81 | 17.29  | 22.36 | 1.42  | 41.08 | 30.12       |
| 2017 | 13.76  | 5.96 | 8.60 | 28.32 | 18.47  | 23.29 | 0.99  | 42.75 | 28.94       |
| 均 值  | 13.83  | 6.33 | 8.55 | 28.71 | 16.39  | 22.65 | 2.64  | 41.68 | 29.61       |

资料来源：作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴数据计算结果整理。

### 1. 黄河流域生态效率的总体及区域内差异

图 2 (a) 反映了黄河流域生态效率的总体及区域内差异演变过程。黄河流域生态效率总体基尼系数均值为 0.1413，生态效率的空间非均衡性较为显著。样本考察期内总体基尼系数从 0.1549 下降到 0.1427，年均递减率为 0.63%，说明黄河流域生态效率由空间差异化逐渐向全域协同提升格局转变。从演变过程看，2004~2010 年总体基尼系数呈波动下降趋势，此后则保持逐年平稳上升态势。从三大地区对比可以看出，上、中、下游地区内部生态效率差异分级明显：上游地区内部生态效率差异始终最大，其区域内基尼系数均值为 0.1671；中、下游地区内部生态效率空间非均衡性依次减弱，其区域内基尼系数均值分别为 0.1061 和 0.0898。样本考察期内上、中、下游地区内基尼系数年均递减率分别为 0.68%、0.04% 和 1.34%，说明三大地区内部生态效率空间差异均有不同程度改善。从演变过程看，下游地区内基尼系数呈波动下降趋势，2004~2013 年中游地区内基尼系数起伏较大，此后平稳下降；上游地区内基尼系数曲线大致呈“下降—上升”态势。

### 2. 黄河流域生态效率的区域间差异

图 2 (b) 刻画了黄河流域生态效率的区域间差异演变过程。下游与上游生态效率的区域间差异最大，其区域间基尼系数均值为 0.1691；中游与上游、下游与中游地区间差异程度依次降低，其区域间基尼系数均值分别为 0.1443 和 0.1380。样本考察期内下游与中游、下游与上游、中游与上游生态效率区域间差异均呈现波动下降趋势，其年均递减率分别为 0.32%、0.76% 和 0.59%。从演变过程来看，三大地区间差异均大致呈“下降—上升”波动趋势，下游与中游、中游与上游地区间基尼系数曲线交错波动，差值呈“收敛—发散—收敛”态势。

### 3. 黄河流域生态效率空间差异的来源贡献

黄河流域生态效率空间差异来源贡献的演变过程如图 2 (c) 所示。从贡献率大小看，区域间贡献率均值高达 41.68%，超变密度的平均贡献率为 29.61%，略高于区域内贡献率均值 (28.71%)，这表明区域间差异是黄河流域生态效率空间差异的主要来源。样本考察期内区域内和超变密度的贡献率总体呈下降态势，年均递减率分别为 0.12% 和 0.20%；区域间贡献率在波动中有所提升，年均增长率为 0.22%。从演变过程看，区域间贡献率呈“上升—下降—上升”的分布形态，超变密度贡献率曲线走势恰与之相反，区域内贡献率变化则相对平稳。对区域内贡献率进一步分解可以看出三大地区内差异的贡献程度由高到低依次为上游、下游、中游，平均贡献率分别为 13.83%、8.55% 和 6.33%。上游和中游

地区内差异的贡献率呈波动上升趋势,年均增加率分别为0.01%和0.58%;下游地区内差异的贡献率总体上有所下降,年均递减率为0.76%。对区域间贡献率再分解发现,下游与上游区域间差异的贡献率在样本考察期内始终最高,下游与中游也具有较高的影响力,其平均贡献率分别为22.65%和16.39%,中游与上游区域间差异的贡献程度最低,其均值仅为2.64%。

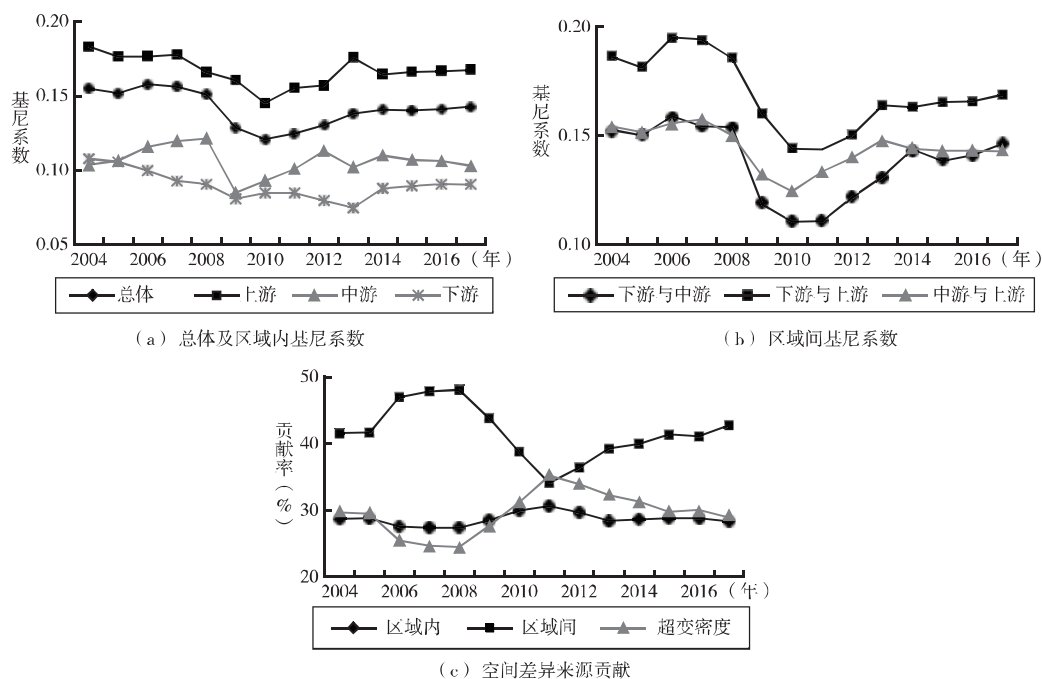


图2 黄河流域生态效率空间差异大小及贡献率

资料来源:作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴数据计算结果绘制。

#### 四、黄河流域生态效率的动态演进

在考察生态效率相对差异程度及来源的基础上,借助核密度估计方法识别生态效率的绝对差异,既能克服未知参数不确定性的影响,又能对生态效率空间差异研究起到很好的补充作用(陈明华等,2016)。因此,本文进一步利用核密度估计方法刻画黄河流域生态效率绝对差异分布的整体形态及动态演进规律,具体包括分布位置、分布态势、分布延展性、极化趋势等方面,具体如图3、表3所示。

从分布位置看,黄河流域总体及三大地区生态效率的主峰位置总体来看均呈右移趋势,生态效率均得到有效提升,这与前文客观事实相印证。具体地,黄河流域总体生态效率分布先右移后左移,2011年为“右移—左移”转折点,三大地区动态演进趋势与之基本一致,但生态效率提升幅度从上游到下游逐渐递增。

从主峰分布形态看,黄河流域整体、中游和上游地区内部生态效率的绝对差异呈扩大趋势,而下游地区内部生态效率的绝对差异呈缩小趋势。具体地,黄河流域整体生态效率分布的主峰峰值经历了“下降—上升—下降”的演变过程,宽度则呈“减小—增大”趋势,与2004年相比,2017年主峰较为平坦且峰值较小;中游地区主峰形态的演进趋势与之基本一

致, 总体表现为主峰高度下降、宽度变大; 上游地区生态效率分布的主峰高度波动下降、宽度略微增大, 这意味着黄河流域整体及中上游地区内部生态效率的绝对差异进一步扩大。下游地区生态效率分布的主峰峰值先上升后下降再上升, 总体显著升高, 宽度逐渐变窄, 说明下游地区内部生态效率的绝对差异状况得到了改善。

从分布延展性看, 黄河流域整体及三大地区生态效率分布曲线均呈现向右拖尾现象, 这是地区内部存在生态效率较高的城市所导致的。此外, 黄河流域整体、下游和中游地区生态效率分布延展性都经历了“拓宽—收敛—拓宽”的演变过程, 最终均呈现收敛趋势, 这表明地区内部生态效率较高的城市与平均水平越发接近。而上游地区分布延展性具有拓宽特征, 说明生态效率水平较高的城市得到进一步提升, 与地区内平均水平的差距逐渐拉大, 存在“优者更优”效应。

从极化趋势看, 黄河流域整体、下游和中游地区生态效率水平均呈两极分化状态, 而上游地区生态效率水平具有多极分化特征。具体地, 上游地区生态效率分布存在双峰或多峰现象, 说明生态效率水平存在较微弱的多极分化现象。黄河流域整体、下游和中游地区生态效率分布均由呈阶梯状排列的主峰和侧峰构成, 但两极分化程度存在明显差异: 对黄河流域总体而言, 主峰与侧峰之间保持稳定的高度差, 说明生态效率水平存在明显的梯度效应; 下游地区主峰和侧峰高度相当, 甚至在 2015 年侧峰高度超过主峰, 使得地区内部生态效率分布收敛于两个均衡点, 这意味着下游地区存在显著的两极分化现象; 中游地区主峰和侧峰的高度相差较大, 生态效率分布呈现微弱的两极分化趋势。

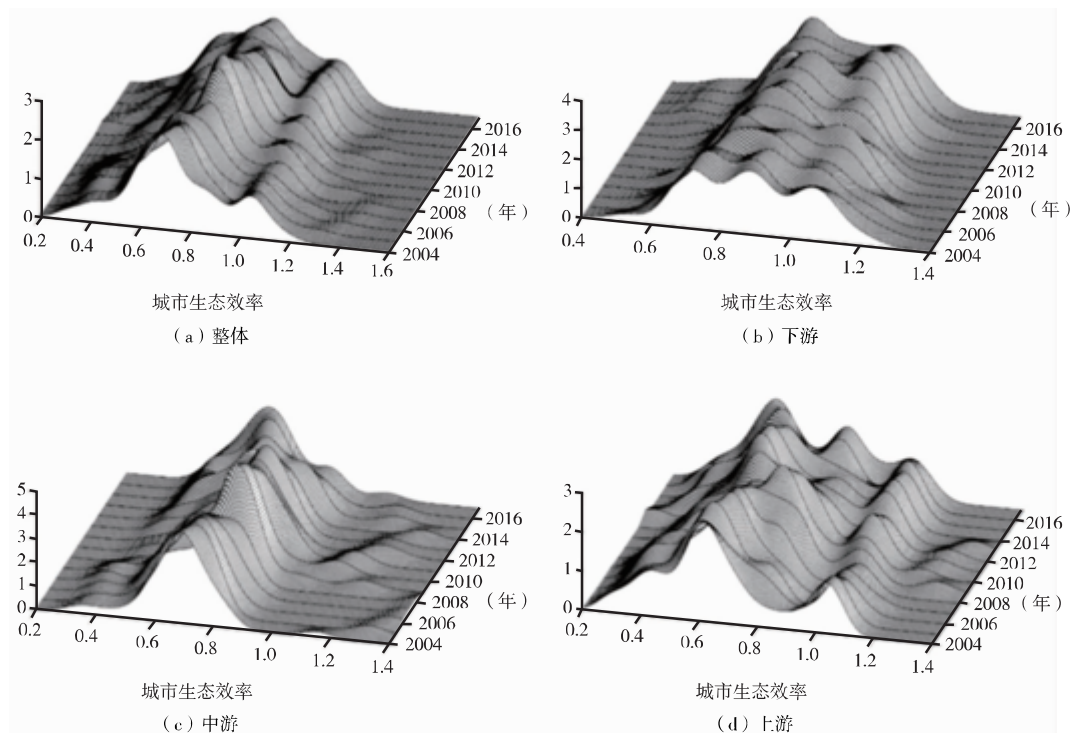


图3 黄河流域生态效率动态演进

资料来源: 作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴数据计算结果绘制。

表3 黄河流域生态效率分布动态的整体演进特征

| 地 区 | 分布位置 | 主峰分布形态     | 分布延展性     | 极化趋势 |
|-----|------|------------|-----------|------|
| 整体  | 右移   | 峰值下降, 宽度扩大 | 右拖尾, 延展收敛 | 两极分化 |
| 下游  | 右移   | 峰值上升, 宽度缩小 | 右拖尾, 延展收敛 | 两极分化 |
| 中游  | 右移   | 峰值下降, 宽度扩大 | 右拖尾, 延展收敛 | 两极分化 |
| 上游  | 右移   | 峰值下降, 宽度扩大 | 右拖尾, 延展拓宽 | 多极分化 |

资料来源: 作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴数据计算结果整理。

### 五、黄河流域生态效率时空演进的驱动因素

城市生态效率本质上包含资源投入、经济效益和环境影响3个部分, 其要求以最小化的资源消耗和环境影响为代价而达到经济产出最优化, 以实现“资源—经济—环境”三者的协调与共赢(任宇飞等, 2017)。影响生态效率时空演进的因素根植于构成系统的投入产出要素之间相互联系与相互反馈的过程中, 当存在投入冗余、非期望冗余或期望产出不足时, 会导致城市生态低效率问题, 因此投入产出要素作为内源性驱动因素是影响生态效率时空演进的重要决定力(陈黎明等, 2015; 任保平和吕春慧, 2019)。同时, 根据已有研究, 要素禀赋结构、产业结构、金融发展水平、教育发展水平、人口密度等作为外源性驱动因素对生态效率时空演进也具有重要影响(王兵等, 2010; 陈明华等, 2020)。鉴于此, 本文将从内源和外源两个视角出发, 运用地理探测器考察黄河流域生态效率时空演进的关键驱动因素并识别各因素之间交互作用的类型。其中, 以资本劳动比的对数表示要素禀赋结构( $K/L$ ), 以第三产业占GDP的比重表示产业结构水平( $IS$ ), 以存贷款之和占GDP的比重作为金融发展水平的代理变量( $FIR$ ), 以教育支出占GDP的比重作为教育发展水平的代理变量( $EDU$ ), 以年末户籍人口(万人)与行政区域土地面积(平方公里)的比值作为人口密度( $POP$ )。上述指标数据均来源于历年《中国城市统计年鉴》。

#### 1. 黄河流域生态效率时空演进的内源性驱动因素

本文借助因子探测器计算了各驱动因素的决定力 $q$ 值和显著性水平(见表4), 进而考察内源性因素对黄河流域生态效率时空演进的驱动作用。如图4(a)所示, 经济发展水平差异对黄河流域整体及三大地区的影响程度均显著高于其他因子, 是生态效率时空演进的内在主导因素。一方面, 经济发展相对落后的城市往往存在生产方式粗放和污染物排放高等问题, 不利于提高要素资源利用率, 从而抑制生态效率提升; 另一方面, 经济发展水平较高的城市更易于实现技术创新和产业结构优化升级, 从而资源利用率和生态效率均得以提升。此外, 对于流域整体而言, 劳动力投入和资本投入为影响生态效率时空演进的次要内在因素, 土地资源消耗和污染指数也具有一定推动作用。就下游地区而言, 劳动力投入为次要驱动因素, 土地资源消耗差异和资本投入差异对其生态效率时空演进也起到重要的决定作用。除经济发展水平以外, 中游地区其他驱动因素的决定力水平相差较小, 属于内源性多因素协同约束地区。从上游地区来看, 劳动力投入差异对其生态效率时空演进的作用强度仅次于经济发展水平。

图4(b)刻画了内源性驱动因素对黄河流域生态效率时空演进影响程度的动态演变过程。在样本考察期内, 经济发展水平的空间差异对生态效率时空演进的影响程度显著强于其他因素, 资本投入差异和劳动力投入差异是继经济发展水平之后对生态效率时空演进有较高

决定力的因素,土地资源消耗差异和污染指数差异的影响程度相对较小且较为接近,解释能力最弱的驱动因素是能源消耗。从演变过程看,除能源消耗以外,其余5个内源性驱动因素在2004~2009年的演进趋势大致呈倒“U”形。2010年以后,污染指数影响程度曲线持续波动下降,年均递减率为4.55%,说明污染指数的空间非均衡性与生态效率时空演进特征的一致性持续弱化,而经济发展水平差异、劳动力投入差异、能源消耗差异、土地资源消耗差异和资本投入差异对生态效率时空演进的影响程度趋向上升,年均增长率分别为8.71%、16.52%、19.23%、25.15%和9.84%。

表4 内源性驱动因素对黄河流域生态效率时空演进的决定力

| 地区 | 决定力/显著性水平 | GDP    | L      | E      | LS     | C      | PI     |
|----|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 整体 | q 统计量     | 0.4237 | 0.2900 | 0.0089 | 0.1233 | 0.2201 | 0.1128 |
|    | P 值       | 0.0000 | 0.0000 | 0.0150 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 下游 | q 统计量     | 0.2957 | 0.2323 | 0.0744 | 0.1285 | 0.1457 | 0.0561 |
|    | P 值       | 0.0000 | 0.0000 | 0.5719 | 0.0000 | 0.0000 | 0.2399 |
| 中游 | q 统计量     | 0.2682 | 0.1124 | 0.0807 | 0.0976 | 0.1461 | 0.1071 |
|    | P 值       | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 上游 | q 统计量     | 0.3104 | 0.2284 | 0.0532 | 0.0380 | 0.1079 | 0.0556 |
|    | P 值       | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0208 | 0.0000 | 0.0099 |

注: GDP、L、E、LS、C、PI 分别代表经济发展水平、劳动力投入、能源消耗、土地资源消耗、资本投入和污染指数。

资料来源:作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴数据计算结果整理。

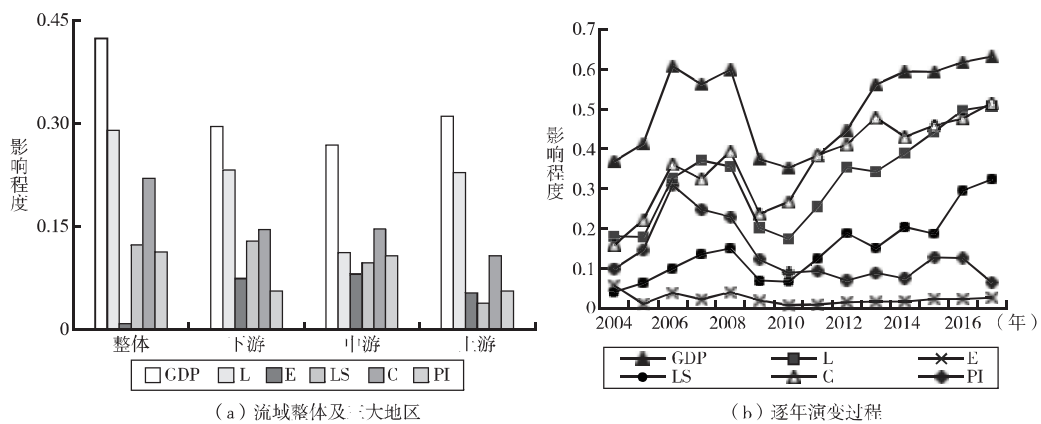


图4 内源性驱动因素探测结果

注: GDP、L、E、LS、C、PI 分别代表经济发展水平、劳动力投入、能源消耗、土地资源消耗、资本投入和污染指数。

资料来源:作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴数据计算结果绘制。

本文借助交互作用探测器对内源性驱动因素的叠加效应进行定量分析,考察双因子交互作用对单因子解释力的影响并识别交互作用类型。探测结果如图5所示,任何两个驱动因素的交互作用均会增强单一因素对生态效率时空演进的解释力,即生态效率时空演进是

由多个内在因素发挥合力共同作用的结果，其交互作用类型均为非线性加强或双因子加强。从黄河流域整体来看，经济发展水平与其他因素交互作用的  $q$  值最高，贡献率接近 50%，同时，劳动力投入与其他因素交互作用的  $q$  值均在 0.3 以上，进一步说明经济发展水平差异和劳动力投入差异是黄河流域生态效率时空演进的关键驱动因素。此外，无论是黄河流域整体还是三大地区，经济发展水平与影响力较低的能源消耗交互作用  $q$  值均显著高于其他交互组合。一方面，缺乏技术优势和政策支持的城市往往存在经济发展方式粗放与能源利用不合理等问题，生态环境污染严重，不利于生态效率提升；另一方面，部分城市提倡经济绿色发展，优化能源结构，不断提升能源利用效率，从而促进生态效率的提升。因此，经济发展水平与能源消耗的综合作用是影响生态效率时空演进的最主要交互驱动因素。

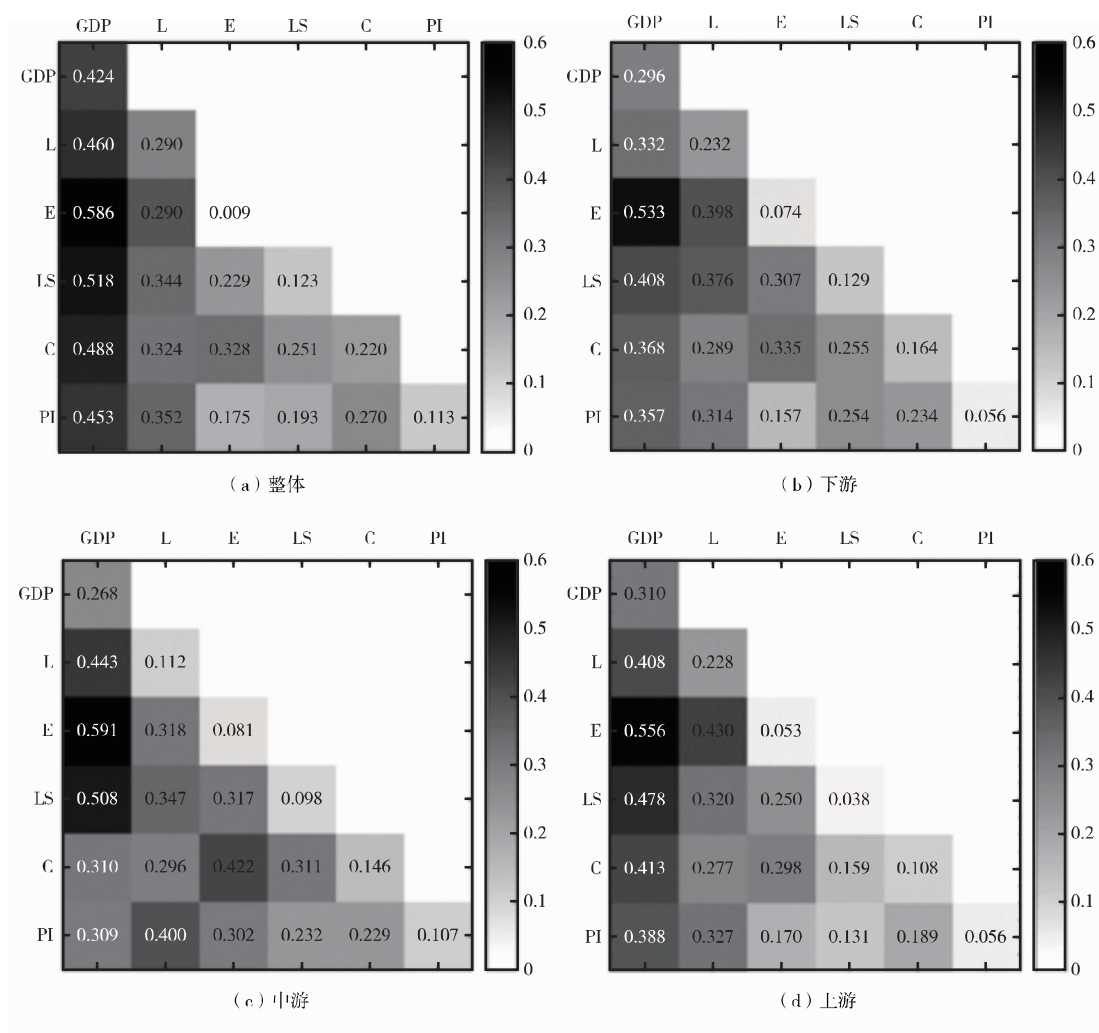


图5 内源性驱动因素交互作用探测结果

注：GDP、L、E、LS、C、PI 分别代表经济发展水平、劳动力投入、能源消耗、土地资源消耗、资本投入和污染指数。

资料来源：作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴数据计算结果绘制。

## 2. 黄河流域生态效率时空演进的外源性驱动因素

表5报告了外源性驱动因素对黄河流域生态效率时空演进的决定力大小、交互作用强度及其显著性水平。除中下游个别指标以外,大多外源性驱动因素均通过了10%的显著性水平检验,说明这些因素对生态效率时空演进具有显著决定力。从黄河流域整体来看,人口密度差异和金融发展水平差异是生态效率时空演进的主要驱动因素。其中,人口密度的作用强度最高,一方面,人口容纳能力较高的城市能够合理规划人口布局,对生态效率的提升具有促进作用;另一方面,人口容纳能力较低的城市,较高的人口密度对自然资源和生态环境产生较大负荷,对生态效率的提升具有抑制作用。金融发展水平的决定力仅次于人口密度,金融发展水平较高的地区鼓励将资金投向资源集约型或实现规模经济的企业,推动技术创新和产业结构高级化进程,从而促进生态效率不断提高,反之,金融发展水平相对落后的城市则不利于生态效率的提升。由此可见,人口密度差异和金融发展差异加剧了黄河流域城市生态效率的空间差异化。对于三大地区而言,外在因素的相对重要性存在一定差异:除金融发展水平不具有显著决定力以外,其他因素对下游生态效率时空演进的影响程度相近,属于外源性多因素协同驱动地区;中游地区的外在主导因素为人口密度差异和金融发展水平差异;上游地区外源性因素的决定力差距悬殊,人口密度决定力高达71.90%,是上游生态效率时空演进最主要的驱动因素。

本文进一步从动态视角考察外源性驱动因素对黄河流域生态效率时空演进作用强度的演变过程,如图6(b)所示。随着时间的推移,外在主导因素由金融发展水平转变为人口密度。人口密度和教育发展水平的影响程度有所增加,年均增长率分别为2.51%和4.22%;其他外源性因素的决定力均有不同程度的减弱,金融发展水平、产业结构和要素禀赋结构年均递减率分别为4.10%、3.35%和26.63%。从演变过程看,金融发展水平与人口密度的作用强度在2004~2012年呈交替波动下降趋势,2012年以后金融发展水平差异不再是生态效率时空演进的最主要决定力量,人口密度取而代之成为外在主导因素。教育发展水平作用强度起伏较大并于2016年超过金融发展水平,成为黄河流域生态效率时空演进的次要决定因素。要素禀赋结构的作用强度大致呈倒“U”形,2017年以后成为决定力最弱的外源性驱动因素,产业结构的决定力始终处于较低水平且波动幅度较小。

表5 外源性驱动因素对黄河流域生态效率时空演进的決定力

| 地 区 | 決定力/显著性水平 | K/L    | IS     | FIR    | EDU    | POP    |
|-----|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 整体  | q 统计量     | 0.0260 | 0.0070 | 0.1552 | 0.1001 | 0.2398 |
|     | P 值       | 0.0000 | 0.0443 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 下游  | q 统计量     | 0.0328 | 0.0514 | 0.0008 | 0.0611 | 0.0618 |
|     | P 值       | 0.0045 | 0.0000 | 0.9851 | 0.0000 | 0.0000 |
| 中游  | q 统计量     | 0.1027 | 0.0086 | 0.1724 | 0.0649 | 0.2323 |
|     | P 值       | 0.0000 | 0.4719 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 上游  | q 统计量     | 0.0281 | 0.0348 | 0.0871 | 0.0451 | 0.4990 |
|     | P 值       | 0.0079 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

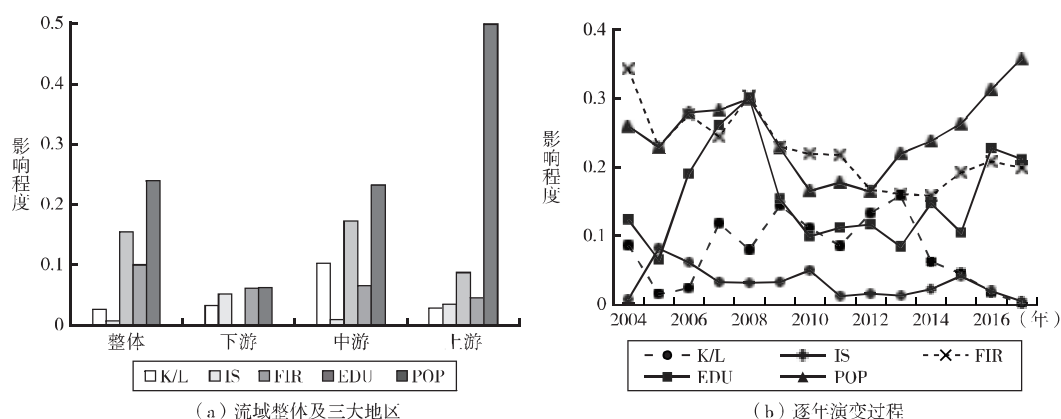


图6 外源性驱动因素探测结果

注：K/L、IS、FIR、EDU、POP 分别代表要素禀赋结构、产业结构水平、金融发展水平、教育发展水平和人口密度。

资料来源：作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省份统计年鉴数据计算结果绘制。

图7刻画了黄河流域整体及分区域外源性驱动因素交互探测结果，可以发现任意两个驱动因素交互作用对生态效率的影响均大于单因素作用强度，说明生态效率时空演进是多种外源性驱动因素综合作用的结果。所有交互组合类型均为非线性加强或双因子加强，这意味着各驱动因素的协同作用大大增强了对黄河流域生态效率时空演进的解释程度。此外，对黄河流域整体及上游地区来说，人口密度与其他驱动因素交互作用强度高于其他交互组合，尤其是上游地区的 $q$ 值均在0.5以上，是生态效率时空演进的核心驱动因素。下游地区交互作用的 $q$ 值均在0.2以下，说明驱动因素交互作用的空间分布与生态效率的空间分布一致性较弱。中游地区人口密度与教育发展水平交互作用的 $q$ 值高达0.5869，是中游生态效率时空演进最主要交互驱动因素。

### 3. 稳健性检验

作为以随机置换为基础的非参数检验方法，二次指派程序(QAP)能够有效克服计量模型中内生性和多重共线性问题(Barnett, 2011)。而在实际研究中往往存在被解释变量与解释变量双向因果关系，导致模型存在内生性问题，故本文采用QAP回归分析方法对黄河流域生态效率时空演进的驱动因素进行稳健性检验<sup>①</sup>。结果表明：从内源性因素看，经济发展水平差异是黄河流域整体及三大地区生态效率时空演进的主要成因。此外，资本投入差异和劳动力投入差异对下游地区具有较强的决定力，资本投入差异带动中游地区生态效率时空演进的能力仅次于经济发展水平，资本投入差异对上游地区的带动作用最强。从外源性因素看，教育水平差异、人口密度差异和金融发展水平差异的扩大都将促使黄河流域整体生态效率差异明显提高，下游地区各因素的回归系数明显低于中上游，金融发展水平差异是推动中游地区生态效率时空演进的较强力量，人口密度的回归系数在上游地区显著高于其他因素，这与本文结果具有较高的一致性，说明本文研究结论具有较强稳健性。

<sup>①</sup> 由于篇幅所限，本文省略具体估计结果，若有兴趣可向笔者索取。

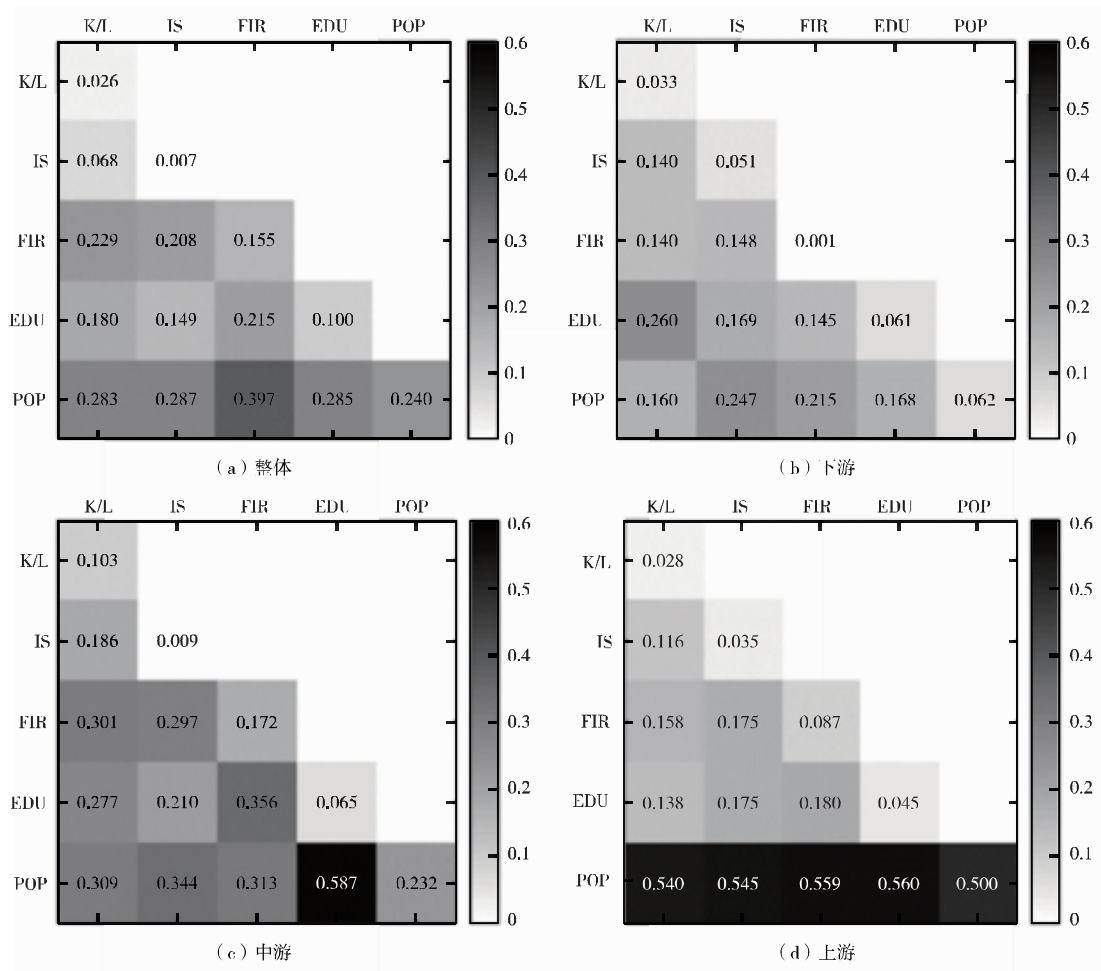


图7 外源性驱动因素交互作用探测结果

注：K/L、IS、FIR、EDU、POP 分别代表要素禀赋结构、产业结构水平、金融发展水平、教育发展水平和人口密度。

资料来源：作者根据历年《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴数据计算结果绘制。

## 六、结论与启示

本文基于 MinDS 模型对 2004~2017 年黄河流域生态效率水平进行了测度，结合 Dagum 基尼系数和核密度估计方法全面考察了黄河流域生态效率的空间差异和动态演进规律，并运用地理探测器从内源和外源两个层面识别驱动因素。研究结论如下：第一，样本考察期内，黄河流域整体和三大地区生态效率水平均有所提高，呈现“东高西低”的空间分布格局。从地级市评级结果看，下游地区近半数城市生态效率达到优良水平；中游地区生态效率水平差异较大，九成以上城市评级为“中”或“差”；上游地区生态效率“差”级率较高，生态效率仍有较大提升空间。第二，黄河流域生态效率的空间差异较为明显，三大地区内部生态效率相对差异均有所降低，但存在明显的梯度效应，上游地区内差异显著高于中、下游。区域间空间差异是黄河流域生态效率空间差异的主要来源，而下游与上游之间生态效率

空间分异问题最为严重。第三,黄河流域整体及三大地区生态效率均呈上升趋势,中上游地区内部生态效率的绝对差异有扩大趋势,下游地区则呈缩小态势。流域整体及三大地区均存在右拖尾和极化现象。第四,从内源性因素看,无论是黄河流域整体还是三大地区,经济发展水平、劳动力投入和资本投入是其生态效率时空演进的内在主导因素,经济发展水平与能源消耗的综合作用是最主要的交互驱动因素。样本考察期内经济发展水平差异的影响程度始终显著强于其他内在因子,资本投入和劳动力投入的决定力也有较大幅度提升。从外源性因素看,人口密度和金融发展水平是流域整体和中上游地区的主要驱动因素,人口密度与其他外在因素的交互作用大大增强了单因素的解释程度。对下游地区而言,外在因素差异性与生态效率空间分布的一致性较弱。在动态变化方面,外在主导因素由金融发展水平转变为人口密度,除人口密度和教育发展水平以外的因素决定力均有不同程度的减弱。

基于上述研究,本文认为协同提升黄河流域生态效率,既要从流域全局视角出发,也要针对区域优势进行分类施策,具体启示如下:首先,应充分考虑黄河流域三大地区经济发展水平和生态环境状况的差异,遵循因地制宜与协调发展原则,协同提升全域生态效率水平,推动绿色协调发展新格局的形成。具体地,上游地区作为“两屏三带”生态安全战略的核心区域,存在生态环境脆弱、水源涵养功能弱化、土地荒漠化严重等问题,应加强生态保护监管,优化生态补偿机制,推进实施生态修复与建设工程,强化上游地区生态防线功能;中游地区是重要的能源储备基地,针对大气煤烟型排放与污染问题,应优化能源生产结构,提高能源利用效率,发挥能源化工产业的经济聚集效益,在中游地区逐步形成低碳发展与绿色循环的格局;下游地区是实施创新驱动发展战略的关键区域,应继续加快产业结构优化升级,实现由资源依赖型向科技创新型产业转变,由粗放型制造业向集约型产业转变,促进下游地区生态建设与经济发展良性互动模式的形成。其次,缩小区域间差异是协同提升黄河流域生态效率的迫切要求。因此,应牢固树立黄河流域“一盘棋”思想,建立健全区域协调发展机制,促进三大地区间产业转移与技术交流,强化生态效率水平较高城市的辐射带动作用,低水平城市应主动寻求适应自身发展的环境保护与经济发展新平衡点,形成三大地区优势互补与协调发展格局,逐步缩小黄河流域生态效率的地区差异。最后,考虑到经济发展水平和人口密度是黄河流域生态效率时空演进的主导驱动因素。一方面,充分发挥经济发展水平与其他因子的合力作用,加快培育战略性新兴产业,促进资源合理配置和能源结构升级,不断将资源优势转化为经济优势,努力实现经济效益与生态效益的双赢。另一方面,应重点解决人地矛盾冲突问题,避免生态环境承载压力过载,通过加强教育提升劳动力素质并优化劳动力结构,使劳动力更好地适应产业结构升级、技术革新和金融发展的需要,从而缓解人口密度差异对生态效率协同提升的阻碍作用。

#### 参 考 文 献

- [1] Aparicio J., Ruiz J. L., Sirvent I., 2007, *Closest Targets and Minimum Distance to the Pareto Efficient Frontier in DEA* [J], *Journal of Productivity Analysis*, 28 (3), 209~218.
- [2] Barnett G. A., 2011, *Encyclopedia of Social Networks* [M], Sage Publications.
- [3] Dagum C., 1997, *A New Approach to the Decomposition of the Gini Income Inequality Ratio* [J], *Empirical Economics*, 22 (4), 515~531.
- [4] Lauwers L., 2009, *Justifying the Incorporation of the Materials Balance Principle into Frontier-based Eco-efficiency Models* [J], *Ecological Economics*, 68 (6), 1605~1614.

- [5] Quarriguasi Frota Neto J., Walther G., Bloemhof J., Van Nunen J. A. E. E., Spengler T., 2009, *A Methodology for Assessing Eco-Efficiency in Logistics Network* [J], *European Journal of Operational Research*, 193 (3), 670~682.
- [6] Tone K., 2001, *A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis* [J], *European Journal of Operational Research*, 130 (3), 498~509.
- [7] Van Caneghem J., Block C., Cramm P., Mortier R., Vandecasteele C., 2010, *Improving Eco-efficiency in the Steel Industry: The ArcelorMittal Gent Case* [J], *Journal of Cleaner Production*, 18 (8), 807~814.
- [8] 陈明华、刘华军、孙亚男:《中国五大城市群金融发展的空间差异及分布动态:2003~2013年》[J],《数量经济技术经济研究》2016年第7期。
- [9] 陈明华、王山、刘文斐:《黄河流域生态效率及其提升路径——基于100个城市的实证研究》[J],《中国人口科学》2020年第4期。
- [10] 陈黎明、王文平、王斌:《“两横三纵”城市化地区的经济效率、环境效率和生态效率——基于混合方向性距离函数和合图法的实证分析》[J],《中国软科学》2015年第2期。
- [11] 程晓娟:《资源、环境二维视角下区域生态效率DEA评价》[J],《当代经济管理》2013年第2期。
- [12] 程哲、杨振山、王大树:《中国旅游PPP的空间特征与影响因素研究》[J],《经济与管理评论》2020年第2期。
- [13] 丁悦、蔡建明、任周鹏、杨振山:《基于地理探测器的国家级经济技术开发区经济增长率空间分异及影响因素》[J],《地理科学进展》2014年第5期。
- [14] 关伟、许淑婷、郭岫垚:《黄河流域能源综合效率的时空演变与驱动因素》[J],《资源科学》2020年第1期。
- [15] 金凤君:《黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略》[J],《改革》2019年第11期。
- [16] 李静、任继达:《中国工业的用水效率与决定因素——资源和环境双重约束下的分析》[J],《工业技术经济》2018年第1期。
- [17] 李胜兰、初善冰、申晨:《地方政府竞争、环境规制与区域生态效率》[J],《世界经济》2014年第4期。
- [18] 刘彦随、李进涛:《中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策》[J],《地理学报》2017年第1期。
- [19] 任保平、吕春慧:《中国生态环境质量的变动态势及其空间分布格局》[J],《经济与管理评论》2019年第3期。
- [20] 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》[J],《改革》2019年第10期。
- [21] 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年第11期。
- [22] 王劲峰、徐成东:《地理探测器:原理与展望》[J],《地理学报》2017年第1期。
- [23] 解亚丽、柯小玲、闵园园、郭海湘、王德运:《基于超效率DEA模型的三峡库区生态效率评价及空间演化格局分析》[J],《中国环境管理》2020年第1期。
- [24] 杨斌:《2000~2006年中国区域生态效率研究——基于DEA方法的实证分析》[J],《经济地理》2009年第7期。
- [25] 王兵、吴延瑞、颜鹏飞:《中国区域环境效率与环境全要素生产率增长》[J],《经济研究》2010年第5期。

## The Spatial Disparity, Dynamic Evolution and Driving Factors of Ecological Efficiency in the Yellow River Basin

Chen Minghua Yue Haijun Hao Yunfei Liu Wenfei

(School of Economics, Shandong University of Finance and Economics)

**Research Objectives:** Reveal the spatial disparity, dynamic evolution and driving factors of ecological efficiency in the Yellow River Basin. **Research Methods:** This paper uses MinDS model to measure the ecological efficiency in the Yellow River Basin from 2004 to 2017. Dagum gini coefficient and kernel density estimation method are used to investigate the spatial disparity and dynamic evolution of urban ecological efficiency in the Yellow River basin, and the geographic detector is further used to analyze driving factors of the spatiotemporal evolution of eco-efficiency. **Research Findings:** The spatial distribution pattern of ecological efficiency in the Yellow River Basin is “high in the east and low in the west”. Intra-regional differences are the main source of spatial differences in ecological efficiency in the Yellow River Basin. The absolute difference in eco-efficiency in the middle and upper reaches of the Yellow River basin tends to expand. There are right-trailing and polarization phenomena whether in the whole basin or in three regions. From the perspective of endogenous factors, the economic development disparity is the leading factors for the spatial differences of eco-efficiency, and the comprehensive effect of economic development and energy consumption is the most important interactive driving factor. From the perspective of exogenous factors, the determinant of population density disparity is the highest for the whole basin, upper and middle reaches. The synergistic effects of exogenous factors enhance the explanatory power of the spatiotemporal evolution of ecological efficiency. **Research Innovations:** Based on the urban perspective, this paper examines the temporal and spatial evolution of ecological efficiency in the Yellow River Basin, and reveals its causes from the endogenous and exogenous factors. **Research Value:** Provide a useful reference for coordinately improving the ecological efficiency in the Yellow River Basin.

**Key Words:** Yellow River Basin; Ecological Efficiency; Spatiotemporal Evolution; Geographic Detector

**JEL Classification:** Q57; R11

(责任编辑: 陈星星)