

# 黄河中下游地区水资源利用效率时空分异特征

赵金彩,范思盈,冯敬燕,史亚琦

(河南师范大学 商学院,河南 新乡 453007)

**摘要:**水资源短缺是阻碍黄河流域生态保护和高质量发展的主要因素之一.基于非期望产出 SBM-DEA 模型和 Malmquist-Luenberger(ML)指数分别刻画农业、工业、生活、生态 4 类用水效率的静态及动态趋势,并利用标准差椭圆、Gini 系数揭示 2003—2019 年间黄河中下游地区水资源利用效率的空间特征.结果表明,农业和工业用水具有相对较高的效率;就动态特征而言,农业和生态用水效率整体呈上升趋势,生活和生态用水效率具有较高的空间差异性;农业和工业用水效率具有较高的空间均衡性,但是随着时间推移,空间均衡程度波动下降,空间差异性凸显.

**关键词:**水资源利用效率;SBM-DEA;ML 指数;时空特征

**中图分类号:**TV213.9

**文献标志码:**A

黄河流域在我国经济社会发展和生态环境建设方面具有举足轻重的地位,黄河流域生态保护与高质量发展已经上升为我国的一项重大国家战略,然而黄河流域生态环境脆弱、水资源保障形势严峻<sup>[1]</sup>,区域可持续发展面临严峻挑战.黄河水资源人均占有量仅为全国平均水平的 27%,多年平均河川天然径流量仅占全国河川径流量的 2%,却承担着全国 15%的耕地面积和全国 12%人口的供水任务,以及流域外远距离调水的任务<sup>[2]</sup>,水资源短缺已成为黄河流域生态保护和高质量发展面临的重大挑战.尽管如此,黄河流域水资源利用较为粗放,农业用水效率不高,水资源开发利用率高,高达 80%,远超一般流域 40%生态警戒线<sup>[1]</sup>.在此背景下,合理评估黄河流域水资源利用效率的时空特征,在加强水资源保护、促进流域高质量发展方面具有重要意义.

关于水资源利用效率的评价,现有文献采用的主要方法包括指标体系评价法<sup>[3]</sup>、随机前沿法<sup>[4]</sup>、水足迹强度法<sup>[5]</sup>、数据包络分析法<sup>[6]</sup>.在这些评价方法中,数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)是一种综合考虑决策单元(Decision Making Unit, DMU)投入产出相对效率的评价方法,由于该方法无须考虑投入与产出之间的函数关系,也不用考虑投入产出量纲上的差异,从而成为广泛用于评价决策单元投入产出效率的一种计算方法<sup>[7]</sup>.利用 DEA 模型研究水资源利用效率已取得丰富的成果<sup>[8-10]</sup>.对于黄河流域内各地区的水资源利用效率问题,众多学者也展开了较多的研究.在流域层面,邢霞等<sup>[11]</sup>通过构建指标体系从综合、农业、工业、生活、生态五方面分别评价黄河流域 64 个地级市水资源利用效率,并探究水资源利用效率与经济发展的耦合关系.巩灿娟等<sup>[12]</sup>采用超效率 DEA 模型、GIS 空间分析方法、系统 GMM 估计方法对 2010—2017 年黄河中下游沿线 25 个城市水资源利用效率时空格局及影响因素进行分析.在省区层面,郑乐等<sup>[13]</sup>利用超效率 DEA-Malmquist 法,从动态和静态两个角度分析了宁夏回族自治区 2006—2016 年的工业水资源利用效率.焦士兴等<sup>[14]</sup>利用非期望 SBM-DEA 测算了河南省 18 个地市水资源利用效率,并分别从时空分异特征和影响因素方面进行了探究.

综上所述,已有文献对黄河流域水资源利用效率进行了大量有益的探索,为黄河流域生态保护与高质量发展提供了强有力的支撑.但是,由于不同部门对水资源的利用效率差异较大,因此将不同部门用水量一起纳

**收稿日期:**2021-09-24;**修回日期:**2022-05-16.

**基金项目:**国家社科基金重大项目(21ZDA066);河南省重大科技专项(201300311700);国家自然科学基金青年基金(42001220).

**作者简介(通信作者):**赵金彩(1989—),女,河南延津人,河南师范大学讲师,博士,研究方向为流域水资源预测与评价, E-mail:zhaojincai1989@163.com.

入模型评估综合水资源利用效率并不能体现水资源利用效率的短板效应.尽管邢霞等<sup>[11]</sup>已初步尝试探索水资源在不同方面的效率差异性,但是基于指标体系的评价方法在指标选取和权重设定方面主观性较强,且缺乏对水资源利用效率时空变化特征的分析 and 探讨.黄河中下游地区具有更多的生产和生活活动,对水资源集约利用的关注度更大<sup>[12]</sup>.因此,本文以黄河中下游地区为研究区,基于 DEA 模型测算该区域各地级单元不同部门(农业、工业、生活、生态)的水资源利用效率,从静态和动态两方面分析水资源利用效率的变化特征,并基于 Gini 系数刻画其空间均衡程度.

## 1 方法与数据

### 1.1 非期望 SBM-DEA

传统 DEA 方法主要包括 CCR, BCC 等模型,采用径向和角度的度量方式,易出现变量松弛等问题.为解决这一缺点, TONE<sup>[15]</sup>在目标函数中加入松弛变量,提出了基于非径向、非角度的 SBM-DEA 模型.在此基础上, TONE<sup>[16]</sup>考虑非期望产出对效率评价的影响,构建非期望产出 SBM-DEA 模型,测算出更加符合实际情况的水资源效率值.

假设  $X$  表示每个决策单元的投入量,设其为  $m$  种;  $Y^g$  和  $Y^b$  分别表示期望和非期望的产出量,设其分别为  $s_1$  和  $s_2$  种,矩阵  $X, Y^g$  和  $Y^b$  的定义为:

$$X = [x_1, \dots, x_n] \in \mathbf{R}^{m \times n}, Y^g = [y_1^g, \dots, y_n^g] \in \mathbf{R}^{r_1 \times n}, Y^b = [y_1^b, \dots, y_n^b] \in \mathbf{R}^{r_2 \times n}.$$

假设数据均为正数,考虑非期望产出的 SBM-DEA 模型为:

$$\theta^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{r_1 + r_2} \left( \sum_{q=1}^{r_1} \frac{s_q^g}{y_{q0}^g} + \sum_{i=1}^{r_2} \frac{s_i^b}{y_{i0}^b} \right)}, \text{ s.t. } \begin{cases} X\gamma + s^- = x_0, \\ Y^g\gamma - s^g = y_0^g, \\ Y^b\gamma + s^b = y_0^b, \\ \gamma \geq 0, s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0, \end{cases}$$

式中,  $\theta^*$  的函数值表示水资源效率值;  $\gamma$  是系数;  $s^-, s^g, s^b$  表示投入、期望产出和非期望产出的松弛量; 当水资源效率利用率高, 即  $\theta^* = 1$  时, 此时  $s^- = s^g = s^b = 0$ ; 当效率利用率不高时, 即  $0 < \theta^* < 1$ , 此时可通过优化投入产出量来提高效率值. 由于效率值范围为  $[0, 1]$ , 存在多个评价单元效率值均为 1, 造成评价单元之间无法有效排序的问题. 因此, 本文采用超效率 SBM-DEA 模型, 表达式为:

$$\rho^* = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\bar{x}_i}{x_{i0}}}{\frac{1}{r_1 + r_2} \left( \sum_{q=1}^{r_1} \frac{\bar{y}_q^g}{y_{q0}^g} + \sum_{i=1}^{r_2} \frac{\bar{y}_r^b}{y_{i0}^b} \right)}, \text{ s.t. } \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, \neq k}^n x_j \gamma_j, \\ \bar{y}^g \leq \sum_{j=1, \neq k}^n y_j^g \gamma_j, \\ \bar{y}^b \geq \sum_{j=1, \neq k}^n y_j^b \gamma_j, \\ \bar{x} \geq x_0, \bar{y}^g \leq y_0^g, \bar{y}^b \geq y_0^b, \bar{y}^g \geq 0, \gamma \geq 0, \end{cases}$$

式中,  $\rho^*$  的目标函数值不再局限于  $[0, 1]$  范围, 能够实现各地区水资源效率的有效排序.

### 1.2 Malmquist-Luenberger 指数

本文研究对象是同时具有时间和空间特征的水资源效率, 即水资源效率面板数据, 而 SBM-DEA 测算的是相对于单一年份前沿面的静态效率, 并不能完整展示水资源效率的跨期变化特征<sup>[17]</sup>. 因此本文借用考虑非期望产出的 Malmquist-Luenberger (ML) 指数测算水资源效率的时间趋势. ML 指数的基本思路是, 根据方向距离函数在两个时期分别计算评价单元与生产前沿面的距离, 进而利用方向性距离函数和混合方向距离函数计算两个时期内效率值的变化情况, 即 ML 指数. ML 指数以 1 为标准评价, 当 ML 指数处于 0 到 1 的开区间时, 表示水资源效率降低; 当 ML 指数大于 1, 则表示水资源效率提高. ML 指数的数学表示方式详见文献<sup>[18]</sup>.

### 1.3 Gini 系数

利用 Gini 系数来测度水资源效率的空间均衡程度, 值越大表明空间差异性越大, 值越小表明空间均衡

程度越大.

Gini 系数常用于衡量一个国家或地区居民收入差距,本研究用来识别水资源效率的地区差距程度,计算公式为: $G_i = \frac{1}{2n^2 \mu p} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_i - y_i|$ ,式中, $G_i$  为 Gini 系数, $\mu$  为水资源效率值的平均值; $x_i$  和  $x_j$  分别为第  $i$  和第  $j$  个空间单元的水资源效率, $n$  为空间单元总个数.

1.4 指标选取和数据来源

本文选取黄河中下游地区的 43 个地级市,计算并分析 2003—2019 年农业、工业、生活和生态 4 类水资源效率.涉及指标包括投入、期望产出和非期望产出 3 类,具体如表 1 所示.其中居民幸福指数的构建参考借鉴相关研究<sup>[19-20]</sup>,从科技、教育、医疗、环境等方面选取与人民生活密切相关的指标,包括科学技术支出、人均公共图书馆藏书量、每十万人在校大学生数、每千人口执业(助理)医师人数、人均公园绿地面积、PM<sub>2.5</sub> 浓度.在对原始正向指标进行正向标准化、负向指标进行负向标准化以后,采用熵值法赋权重,进而计算得出居民幸福指数.净初级生产力是根据 CASA 模型进行模拟<sup>[21]</sup>,参与运算的数据包括气象数据、土地利用数据和植被归一化指数(NDVI),其中气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网站(<http://cdc.cma.gov.cn/>),土地利用数据和 NDVI 来自于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>).本文所涉及的统计数据来自于《中国区域与经济统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》,相应省份和地级市统计年鉴及其水资源公报.

表 1 DEA 模型中投入和产出指标  
Tab. 1 Indicators for input and output in DEA model

| 用水类型 | 投入指标                     | 期望产出指标      | 非期望产出指标                    |
|------|--------------------------|-------------|----------------------------|
| 农业   | 农业用水量/亿 m <sup>3</sup>   | 粮食产量/万 t    | 农业化肥污染<br>(采用化肥使用量/万 t 代替) |
|      | 第一产业就业人数/万人              |             |                            |
|      | 粮食播种面积/千 hm <sup>2</sup> |             |                            |
| 工业   | 工业用水量/亿 m <sup>3</sup>   | 第二产业 GDP/亿元 | 工业废水/万 t                   |
|      | 第二产业就业人数/万人              |             |                            |
|      | 固定资产投资/亿元                |             |                            |
| 生活   | 生活用水量/亿 m <sup>3</sup>   | 居民幸福指数(无量纲) | 生活垃圾清运量/万 t                |
| 生态   | 年降水量/亿 m <sup>3</sup>    | 净初级生产力/tC   | 污水排放量/万 t                  |

2 结果分析

2.1 黄河中下游地区水资源利用效率静态分析

整体而言,黄河中下游地区农业、工业、生活和生态的用水效率平均值分别为 0.66、0.49、0.28、0.22,均小于 1,未达到 DEA 有效.这说明目前黄河中下游地区水资源效率在经济发展和生态保护方面都具有较大压力,需要改变投入产出配比来改善水资源效率,使之达到有效状态.对比而言,农业和工业用水效率高于生活和生态用水效率,表明生活和生态用水效率的提升更为迫切.

从省级层面来看,黄河中下游地区五省份的水资源效率存在较大差异,表明各个省份的水资源利用方式和利用水平差别较大.内蒙古的水资源效率最高,其次为山东省,其水资源效率整体高于其他 3 个省份,而河南省的水资源效率最低.就农业用水效率而言,内蒙古和山西的水资源利用效率最高,分别为 0.75 和 0.70;其次为山东和陕西,分别为 0.67 和 0.62;而河南省的农业用水效率为 0.59.对于工业用水效率,内蒙古的水资源效率为 0.73,而其他省份的水资源效率均低于 0.6.生活和生态用水效率均比较低,除了内蒙古的生活用水效率达 0.44 以外,其他水资源效率均在 0.2 左右.

从地级市层面来看,黄河中下游地区水资源效率空间异质性特征显著,4 类水资源利用效率差异也较大(图 1).就农业用水效率而言,共有 7 个地级市的水资源效率超过 1,分别为内蒙古的鄂尔多斯市和乌海市、陕西的铜川市和延安市、山西的长治市和晋城市、山东的德州市,其中鄂尔多斯市和晋城市的农业用水效率超过 1.1.而太原、吕梁、运城、渭南、咸阳等地市的农业用水效率较低.对于工业用水效率而言,鄂尔多斯市和

山东的东营市的水资源效率超过 1.1,高于其他地级市,乌海市、延安市和榆林市的水资源效率也较高,超过 1.研究区中部地区的水资源效率较低.对于生活用水效率来说,仅鄂尔多斯市的水资源效率超过 1,达到高效利用.其次,济南市和淄博市的生活用水效率分别为 0.75 和 0.54,而其余地级市的生活用水效率均不足 0.5.生态用水效率是 4 种水资源效率中最低的一类,几乎一半地区为超低效率,这表明,仅依靠自然降水较难保障高标准的生态环境,因此,为实现黄河流域的高质量发展,要从生态和经济两方面进行考量.

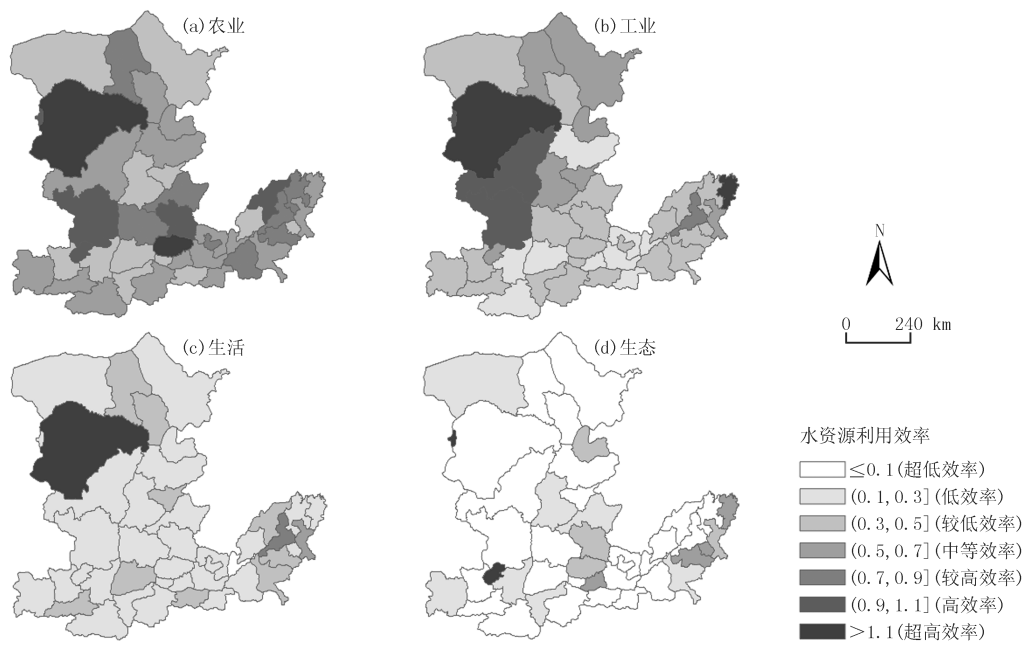


图1 黄河中下游地区地级市层面4类用水效率空间分布

Fig.1 Spatial distribution of water resources utilization efficiency in the middle and lower Reaches of the Yellow River

2.2 黄河中下游地区水资源利用效率动态趋势特征

就整个研究区而言,黄河中下游地区在不同时期的水资源效率变动幅度较大,尤其是农业用水效率,在整个研究期间的波动均比较大,相对而言,随着时间推移,变动幅度趋于平缓,整个研究期农业用水效率上升了 14.78%.工业用水效率随着时间推移波动起伏增大,整体下降了 1.99%.生活用水效率在研究初期和后期均表现为效率下降,在研究中期呈现效率上升和下降的波动变化,整体而言,生活用水效率下降了 5.28%.生态用水效率在整个研究期均呈现一定幅度的波动变化,整体上效率值上升了 4.20%.分阶段来看,自中国 2001 年加入世界贸易组织以来,经济发展速度加快,但此时的经济增长往往伴随着生态环境的破坏以及人民幸福感的下降,因此 2003—2006 年间的生态及生活用水效率虽有小幅上升但整体呈下降趋势.面对日益严重的生态环境问题,在“十一五”(2006—2010 年)规划纲要中我国首次提出了“建设资源节约型、环境友好型社会”的要求,并制定了一系列环境保护指标,该时期内,生态用水效率趋于稳定.在“十二五”(2011—2015 年)规划纲要中再次强调生态环境绿色发展,并将“改善民生,提升人民幸福感”写入其中,在教育、医疗、文化等方面采取了一系列惠民措施,工业领域提出“转型升级,提高产业核心竞争力”的政策主张,因此生态、生活用水效率在该时期均十分稳定且总体呈上升态势,表明政策的实施力度着实加强.

在省级层面上,各省份的水资源效率变动情况亦不相同,整体来说,农业用水效率的波动性更大,特别是内蒙古;工业、生活和生态用水效率稍微平稳.在研究期内,生活和生态用水效率变化不大,而农业和工业用水效率的变化幅度具有明显的差异性.山东的农业用水效率最高,陕西、山西和内蒙古次之,作为农业大省的河南省,其农业用水效率较低,与其他省区的差距较大.究其原因,可能是为保证较高的粮食产量,河南省对农用地的化肥、农药等投入较多,造成的农业污染较大,因此用水效率较低.在工业用水效率方面,内蒙古和山东的效率最高,而山西、河南、陕西的工业用水效率均较低,因此,这些地区在工业投入产出配比优化、非期望产出降低等方面有待加强.对于内蒙古来说,其在农业、工业、生态方面均具有较高的水资源利用效率,然而在生活用水方面,其效率较低,为达到内蒙古 4 类用水效率的均衡发展,应重点关注居民生活方面的水资

源利用情况。

从地级市层面来看,内蒙古的乌海市和山西的晋城市、长治市具有显著增加的农业用水效率,增长幅度达 2.0 以上,其他地级市的农业用水效率波动较小.内蒙古的鄂尔多斯市、山东的淄博市具有较大增长幅度的工业用水效率,而乌海市、临汾市、榆林市的工业用水效率下降幅度较大,未来这些地区亟待提高工业用水效率.相比农业和工业用水效率而言,生活和生态用水效率较为稳定。

综合农业、工业、生活、生态 4 类水资源效率(综合效率)可知,水资源综合效率增幅最高的为鄂尔多斯市,表明鄂尔多斯市作为一个资源型城市,其水资源的投入和产出配比逐渐合理,效益优化速度快.其次,长治市和晋城市的综合效率增幅也较大,达 30% 以上.济南市、淄博市、铜川市、乌海市、延安市、菏泽市水资源综合效率增幅较大.德州市、滨州市和郑州市的综合水资源效率也呈现增长趋势.作为省会城市的郑州市和济南市,资源汇集,在经济建设过程中人力、财力、资源等投入较大,水利设施以及废水处理设备逐步趋于完善,水资源循环利用机制走向成熟,因此水资源利用效率逐步提高.位于河南省的其他地级市的综合效率在研究期内有所下降,其中鹤壁市的综合用水效率下降幅度最大,尤以农业和工业用水效率的下降最为明显。

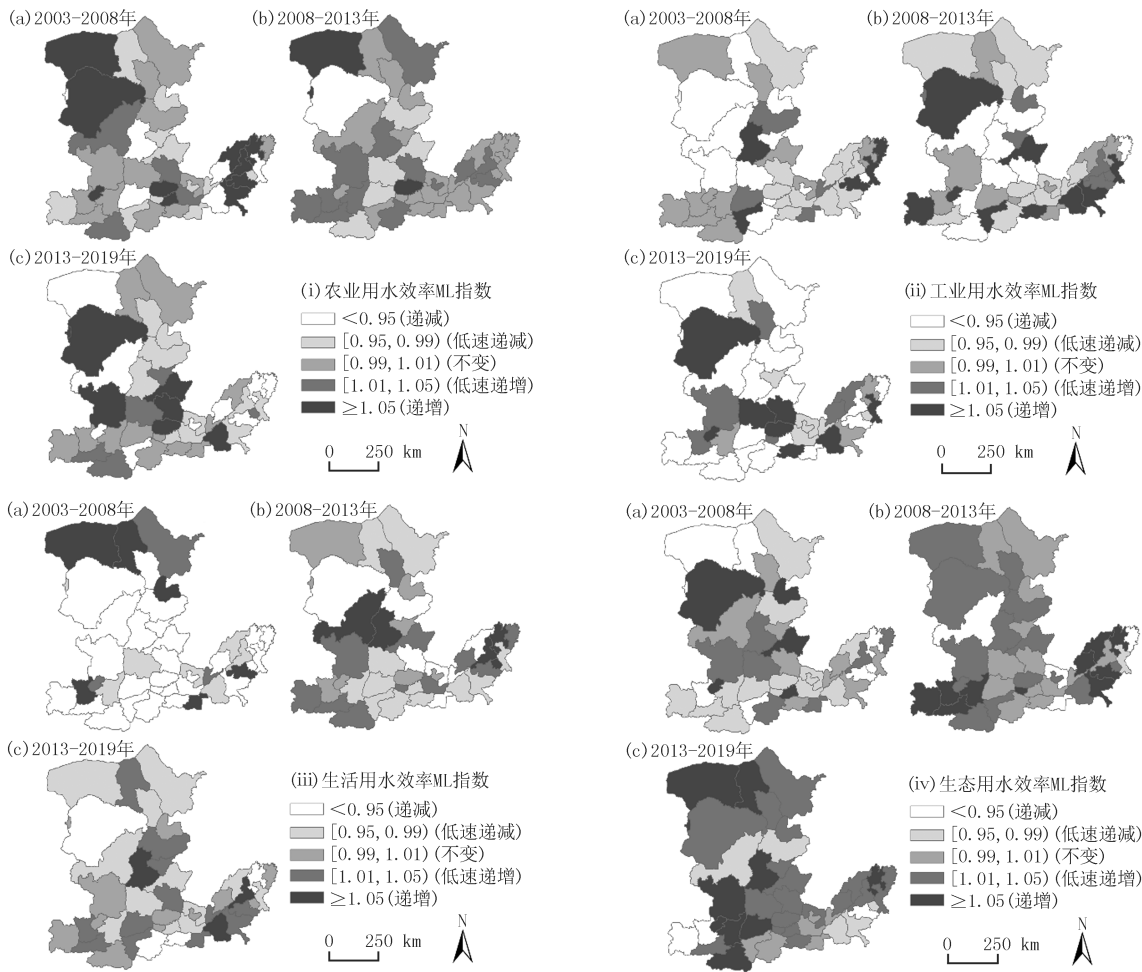


图2 水资源效率分阶段ML指数

Fig.2 ML index of water resources utilization efficiency for different periods

水资源效率分阶段 ML 指数刻画了不同类型水资源利用效率在不同阶段的增加或下降变化(图 2)。位于黄河下游的山东各地市农业用水效率增幅逐渐减小,直至第三阶段(2013—2019 年),主要呈现下降趋势;其他地区则表现为波动变化.效率值整体呈上升和下降的空间单元数量较为稳定.工业用水效率呈下降趋势的地级单元较多,而效率呈上升趋势的地级市有逐渐增多趋势,在第二阶段(2008—2013 年),效率值快速增加的城市呈分散状态分布在研究区,至第三阶段(2013—2019 年),快速递增的城市有集聚趋势.山西省的晋城、临汾和长治市的工业用水效率在 2013—2019 年间均有明显的上升现象.2015 年十八届五中全会提出创

新、协调、绿色、开放、共享五大发展理念后,各地区都开始注重经济绿色发展<sup>[12]</sup>,因此 2015 年以后作为矿产资源型丰富的城市,由于发展理念的改变,工业用水效率呈现明显上升趋势.生活用水效率在第一阶段(2003—2008 年)主要表现为效率的高速下降,第二阶段(2008—2013 年)效率下降速度有所缓慢,而在第三阶段(2013—2019 年)效率高速递增单元减少,主要表现为低速变化.相比以上 3 类水资源效率,生态用水效率呈现递增的单元较多,分阶段来看,2008 年以来的生态用水效率增加较快,空间单位较广,表明我国生态环境治理效果明显.

2.3 水资源利用效率空间均衡程度

4 类用水效率的 Gini 系数显示,生活和生态用水效率的空间均衡程度较低,且时间变化平缓,表明该时段内水资源效率空间差异性并未发生太大变化;而农业和工业用水效率 Gini 系数较小,说明这两类水资源效率空间分布上更为均衡.但是随着时间推移,农业和工业用水效率的空间均衡程度波动下降,空间差异性凸显.

水资源效率均衡程度在各省区间差异显著(图 3).对于农业用水效率而言,空间差异特征呈现明显的时间变异性.山东省的农业用水效率在研究初期空间差异性增大,在研究中期和后期保持平稳,整体上是差异性最大、均衡程度最低的省区.山西省水资源效率的空间差异性在研究前期和中期保持缓慢的增加态势,直至 2015 年,增长速度提升,空间差异性明显超过山东省.表明山西省的农业用水效率在研究后期呈现出聚类效应增强的趋势.河南省的农业用水效率空间均衡程度处于中等水平,且随时间推移较为稳定.对于内蒙古来说,其水资源效率空间差异性在研究前期较为稳定,2014—2016 年间呈现较为明显的均衡化趋势,整体上 Gini 系数下降.陕西省的农业用水效率空间差异性在 5 省份中处于最低水平,Gini 系数整体上呈现上升趋势,空间均衡程度呈现下降趋势.

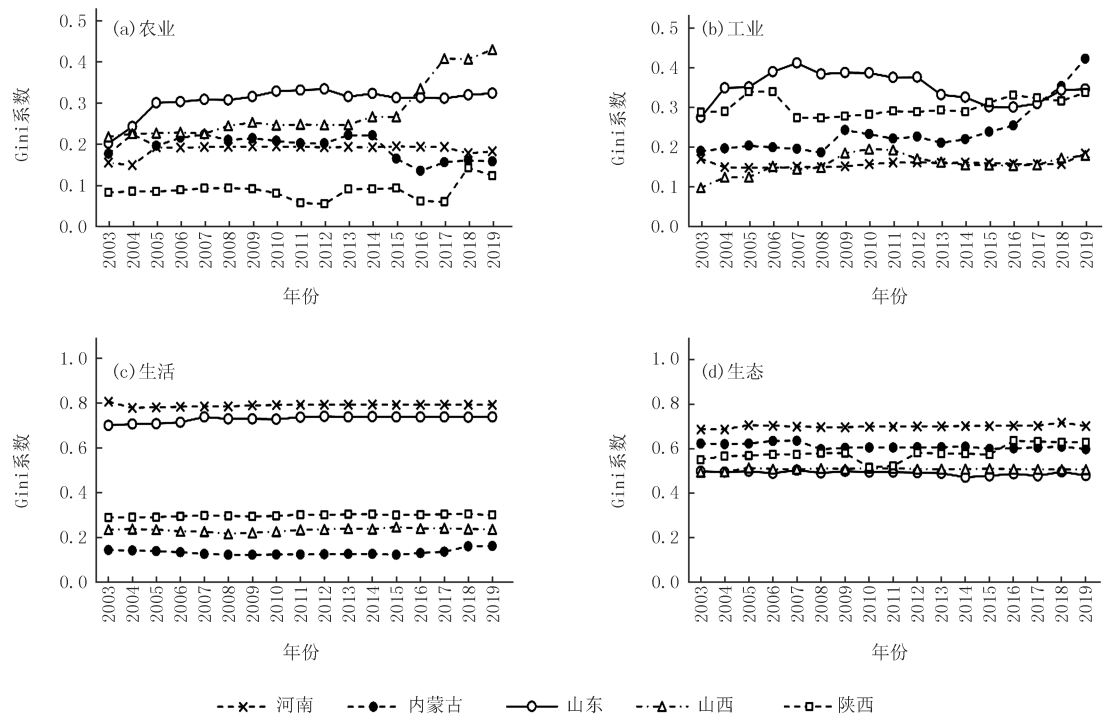


图3 省区水资源效率Gini系数时间变化特征

Fig.3 Temporal variations of Gini coefficients among provinces

工业用水效率的空间差异性随时间推移波动性明显.与农业用水效率类似,山东省依然为空间差异性最大的省区,陕西省的工业用水效率仅次于山东省,河南和山西的空间差异性最小.就时间趋势而言,内蒙古 Gini 系数上升趋势明显,特别是 2014 年以后;山东省表现为“倒 U”型的变化趋势,即空间差异性在研究前期呈现增大趋势,随后又逐渐减小.生活用水效率的空间均衡程度并未表现出明显的时间变化特征;在空间上,5 省份的均衡程度排序依次为:内蒙古,山西,陕西,山东,河南.生态用水效率均衡程度的空间差异性较小,

时间变化上,仅陕西省呈现一定的波动性,其他省份均比较稳定.

### 3 结 论

本文以黄河中下游的 43 个地级单元为研究区,利用农业、工业、生活、生态 4 方面用水量和社会经济指标,基于非期望 SBM-DEA 模型测算水资源利用效率,揭示了水资源利用效率的静态和动态特征、空间格局和空间均衡程度,主要得出如下结论:

(1)黄河中下游地区农业、工业、生活和生态 4 类用水效率差异较大,其中农业和工业用水效率较高,生活和生态用水效率较低.从空间视角来看,内蒙古的用水效率较高,特别是鄂尔多斯市和乌海市;而河南的用水效率较低,空间差异明显.

(2)从水资源利用效率的动态趋势特征而言,农业、工业、生活和生态 4 类用水效率呈波动变化;整体上,农业和生态用水效率呈上升趋势,而工业和生活用水效率呈下降趋势.农业和工业用水效率 ML 指数的空间差异性更大,生活和生态用水效率 ML 指数相对较为均衡.

(3)Gini 系数所刻画的空间均衡程度显示,生活和生态用水效率的空间均衡程度较低,且时间变化平缓;农业和工业用水效率具有较高的空间均衡性,但是随着时间推移,空间均衡程度波动下降,空间差异性凸显.

### 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] 杨立彬,贾新平,李清杰,等.黄河流域水资源利用与保护现状评价[J].人民黄河,2011,33(11):55-57.  
YANG L B,JIA X P,LI Q J,et al.Assessment of water resources utilization and protection of the Yellow River Basin[J].Yellow River,2011,33(11):55-57.

[3] 操信春,崔思梦,吴梦洋,等.水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价[J].水利学报,2020,51(10):1189-1198.  
CAO X C,CUI S M,WU M Y,et al.Water use efficiency assessment of paddy rice based on the water footprint theory[J].Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(10):1189-1198.

[4] 张凯,吴凤平,成长春.三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析[J].环境科学,2021,42(12):5757-5767.  
ZHANG K,WU F P,CHENG C C.Dynamic evolution characteristics of water resources utilization efficiency in China under the constraint of triple attribute carrying capacity[J].Environmental Science,2021,42(12):5757-5767.

[5] CAO X C,ZENG W,WU M Y,et al.Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint[J].Journal of Cleaner Production,2021,309:127371.

[6] 孙才志,马奇飞,赵良仕.中国东、中、西三大地区水资源绿色效率时空演变特征与收敛性分析[J].地理科学进展,2018,37(7):901-911.  
SUN C Z,MA Q F,ZHAO L S.Temporal and spatial evolution of green efficiency of water resources in China and its convergence analysis [J].Progress in Geography,2018,37(7):901-911.

[7] 陈述,吕文芳,王建平.长江流域水资源利用效率时空演变特征分析[J].水资源保护,2022,38(4):80-86.  
CHEN S,LYU W F,WANG J P.Analysis of spatio-temporal evolution characteristics of water resources utilization efficiency in the Yangtze River Basin[J].Water Resources Protection,2022,38(4):80-86.

[8] TUPPER H C,RESENDE M.Efficiency and regulatory issues in the Brazilian water and sewage sector:an empirical study[J].Utilities Policy,2004,12(1):29-40.

[9] 董战峰,喻恩源,裴浪,等.基于 DEA 模型的中国省级地区水资源效率评价[J].生态经济,2012,28(10):43-47.  
DONG Z F,YU E Y,QU L,et al.Water efficiency evaluation of the provincial regions in China based on DEA model[J].Ecological Economy,2012,28(10):43-47.

[10] 孙才志,马奇飞,赵良仕.基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J].地理学报,2020,75(5):1022-1035.  
SUN C Z,MA Q F,ZHAO L S.Analysis of driving mechanism based on a GWR model of green efficiency of water resources in China[J].Acta Geographica Sinica,2020,75(5):1022-1035.

[11] 邢霞,修长百,刘玉春.黄河流域水资源利用效率与经济发展的耦合协调关系研究[J].软科学,2020,34(8):44-50.  
XING X,XIU C B,LIU Y C.Research on coupling and coordination relationship between water resources utilization efficiency and economic development[J].Soft Science,2020,34(8):44-50.

[12] 巩灿灿,徐成龙,张晓青.黄河中下游沿线城市水资源利用效率的时空演变及影响因素[J].地理科学,2020,40(11):1930-1939.  
GONG C J,XU C L,ZHANG X Q.Spatio-temporal evolution and influencing factors of water resources utilization efficiency of cities along the middle and lower reaches of the Yellow River[J].Scientia Geographica Sinica,2020,40(11):1930-1939.

[13] 郑乐,杨法暄,钱会,等.基于超效率 DEA 模型的宁夏工业水资源利用效率研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(2):81-86.  
ZHENG L,YANG F X,QIAN H,et al.Study on the utilization efficiency of industrial water resources in Ningxia based on super-efficiency DEA model[J].Journal of Water Resources and Water Engineering,2020,31(2):81-86.

[14] 焦士兴,王安周,张崇崇,等.河南省水资源效率综合测度及时空分异[J].水资源保护,2022,38(2):48-55.  
JIAO S X,WANG A Z,ZHANG C C,et al.Comprehensive measurement and temporal-spatial differentiation of water resources efficiency in Henan Province[J].Water Resources Protection,2022,38(2):48-55.

[15] TONE K.A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J].European Journal of Operational Research,2002,143(1):32-41.

[16] TONE K.Dealing with undesirable outputs in DEA: A Slacks—based measure (SBM) approach[C].Tokyo:The Operations Research Society of Japan,2004:44-45.

[17] 邵海琴,王兆峰.长江经济带旅游业碳排放效率的综合测度与时空分异[J].长江流域资源与环境,2020,29(8):1685-1693.  
SHAO H Q,WANG Z F.Comprehensive measurement of carbon emissions efficiency of tourism and its spatio-temporal differentiation in the Yangtze River economic belt[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(8):1685-1693.

[18] 崔兴华,林明裕.FDI 如何影响企业的绿色全要素生产率:基于 Malmquist-Luenberger 指数和 PSM-DID 的实证分析[J].经济管理,2019,41(3):38-55.  
CUI X H,LIN M Y.How does foreign direct investment affect the green total factor productivity of enterprises:empirical analysis based on malmquist-luenberger index and PSM-DID model[J].Business Management Journal,2019,41(3):38-55.

[19] 代金辉,马树才,刘宏岩.社会发展水平统计指标体系的构建与评价[J].统计与决策,2018,34(1):30-33.  
DAI J H,MA S C,LIU H Y.Construction and evaluation of statistical index system for social development level[J].Statistics & Decision,2018,34(1):30-33.

[20] 赵良仕,冷明祥,孙才志.基于多维产出 ZSG-DEA 模型的中国水资源污染综合分配效率测算[J].水资源保护,2021,37(6):94-102.  
ZHAO L S,LENG M X,SUN C Z.Calculation of comprehensive allocation efficiency of water resources pollution in China based on ZSG-DEA model considering multi-dimensional outputs[J].Water Resources Protection,2021,37(6):94-102.

[21] 侯丽丽,银山,都瓦拉,等.基于 CASA 模型的浑善达克沙地植被 NPP 模拟及时空分析[J].水土保持研究,2020,27(2):165-171.  
HOU L L,YIN S,DU W L,et al.Simulation and spatial-temporal analysis of vegetation NPP in hunshandake sandy land based on CASA model[J].Research of Soil and Water Conservation,2020,27(2):165-171.

Temporal and spatial variations of water resources utilization efficiency  
in the middle and lower Reaches of the Yellow River

Zhao Jincai, Fan Siying, Feng Jingyan, Shi Yaqi

(School of Business, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** Water shortage is one of the main problems hindering the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. In this paper, water resources utilization efficiencies, covering agricultural, industrial, domestic and ecological water, are depicted based on the SBM-DEA model with undesirable output and Malmquist Luenberger(ML) index. The spatial and temporal characteristics of water resources utilization efficiency from 2003 to 2019 were revealed by using the standard deviation ellipse and Gini coefficient. Results show that agricultural and industrial water use are more efficient than domestic and ecological water use. In terms of dynamic change characteristics, agricultural and ecological water use efficiency are on the rise, and the efficiencies of industrial and domestic water use are on the decline overall. There is a high spatial difference among regions in domestic and ecological water use efficiencies. Agricultural and industrial water use efficiencies show a relatively high degree of spatial equilibrium. While the degree of spatial equilibrium decreases with time, and the spatial differences become prominent.

**Keywords:** water use efficiency; SBM-DEA; ML index; spatio-temporal characteristics

[责任编辑 陈留院 赵晓华]