

基于 DEA 和 Malmquist 指数的汉江干流水资源利用效率变动研究

王朝¹, 张廷龙¹, 李双², 丁小花¹, 郭义军¹, 张青峰¹

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.陕西理工大学 人文学院, 陕西 汉中 723000)

摘要:水资源利用效率的提升对于缓解水资源供需矛盾具有极为重要的意义。选取汉江干流 10 个地市, 运用数据包络法(DEA)计算了 2008—2015 年水资源利用效率, 并利用 Malmquist 全要素生产率指数模型分析了水资源绿色效率全要素生产率和分解指数的动态变化。结果表明:汉江干流不同地市的水资源利用效率具有较大的时空分异特征, 中下游地市的水资源经济效率普遍高于中上游地市;水资源绿色效率较高的城市经济发展较为缓慢且集中分布在下游地区。2008—2015 年水资源经济效率逐渐下降, 而水资源绿色效率先增加后减小;除武汉市和安康市的全要素生产率一直保持积极有利发展趋势外, 其他城市的全要素生产率主要受技术约束和规模效应的影响而未能达到期望值。研究成果可为水资源优化配置提供参考。

关键词:水足迹; 水资源绿色效率; DEA; 全要素生产率; 汉江

中图分类号: F062.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0291-06

Variation of Water Resources Utilization Efficiency in Mainstream of Hanjiang River Based on DEA & Malmquist Index

WANG Zhao¹, ZHANG Tinglong¹, LI Shuang², DING Xiaohua¹, GUO Yijun¹, ZHANG Qingfeng¹

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 School of Humanities, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723000, China)

Abstract: The improvement of water resources utilization efficiency is of great importance to alleviate the conflict between water resources supply and demand. In this paper, 10 municipalities in the main stream of Hanjiang River Basin was selected, the water resources utilization efficiency from the year of 2008 to 2015 was analyzed by using the method of data envelopment method (DEA). Subsequently, the total-factor productivity with its compositional index of water resources green efficiency was illustrated in detail by using Malmquist index model. The results show that the water resources utilization efficiencies of different cities in the main stream of Hanjiang River had the characteristics of temporal and spatial variability, the water resources economic efficiencies of cities in the middle and lower reaches were generally higher than those of the cities in the middle and upper reaches; the economic developments of cities with a higher water resources green efficiencies were relatively slower and concentrated in the downstream areas of Hanjiang River Basin; from 2008 to 2015, the water resources economic efficiency gradually decreased, while the water resources green efficiency increased first and then decreased; except that the total factor productivities of Wuhan and Ankang had maintained a positive and favorable development trend, the total factor productivities of other

收稿日期: 2021-09-28

修回日期: 2021-10-19

资助项目: 陕西省自然科学基金计划“陕北黄土高原侵蚀分形特征”(2021JZ-17)

第一作者: 王朝(1996—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail: wzgis@nwfufu.edu.cn

通信作者: 张青峰(1974—), 男, 山西孝义人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhqf@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

cities were mainly affected by technical constraints and scale effect. These research results can provide a reference for the optimal allocation of water resources.

Keywords: water footprint; green efficiency of water resources; DEA; total factor productivity; Hanjiang River

我国人均水资源占有量严重不足(仅为 2 300 m³/人),约占全球人均水资源量的 1/4^[1],且水资源在时间和空间上的分布极不平衡,而水资源的浪费和污染又加剧了水资源缺乏程度,严重影响了水资源供给和需求之间的平衡。因此,如何提高水资源的利用效率就成为人们关注的焦点。

水资源利用效率是反映水资源投入与产出关系的重要指标^[2],常用水资源经济效率(WREE, Water Resources Economic Efficiency)和水资源绿色效率(WRGE, Water Resources Green Efficiency)来衡量^[3-4];WREE 是指水资源的投入与其经济产出的比率,而 WRGE 是指水资源的投入与其带来的经济和社会方面产出的比率。其中,水资源的投入可用水足迹^[5-6]、劳动力和资本存量等指标来衡量;经济产出和社会产出分别可用 GDP 和社会发展指数(SDI, Social Development Index)来表达。已有许多学者基于不同空间尺度分别利用数据包络分析法(DEA, Data Envelopment Analysis)^[7-9]、指标体系法^[10]和随机前沿法^[11-12]对水资源利用效率进行了研究。如:在省域尺度上,王普查等^[13]在改进节约指数的基础上,利用 DEA 方法研究了我国各省份的水资源绿色效率;赵晨等^[14]基于 DEA 研究了江苏省的水资源利用效率;陈璇璇等^[1]基于超效率 DEA 模型对陕晋两省水资源利用效率进行评价;在流域尺度上,杨高升等^[15]依据可持续发展的理念构建了 SE-SBM 模型,得出了长江区域的水资源效率随着时间的变化规律;张伟等^[16]基于 DEA 方法建立 EBM 模型对长江经济带水资源利用效率进行了分析;在全国尺度上,孙才志等^[17]基于 DEA 模型,测算了我国的水资源绿色效率,并与水资源经济效率和水资源环境效率进行了对比。

综合来看,以往研究多针对单一研究区域而缺乏不同区域之间的对比。同时,不同年份水资源的投入产出数据因所对应的生产技术而有所不同,若仅使用 DEA 方法只能得到水资源利用效率的综合表征而忽略技术进步对水资源产出的贡献,而以往研究亦鲜有水资源的投入对经济增长贡献的综合比较。因此,本文在 DEA 方法的基础上,结合 Malmquist 全要素生产率指数模型对汉江流域不同地市水资源利用效率进行总体分析和对比研究,以期多维度综合评价提供参考。

1 研究区概况

汉江干流(30°8′—34°11′N,106°12′—114°14′E)是长江最大的支流,发源于汉中市宁强县蟠冢山,流经安康市、十堰市、襄阳市、荆门市、天门市、潜江市、仙桃市、孝感市,最终在武汉市汇入长江。汉江流域内水资源量丰富,气候比较温和;地形复杂多变,西北部多山地,河谷狭长,水流湍急,东南部地势平缓,水流量大。研究区概况见图 1。

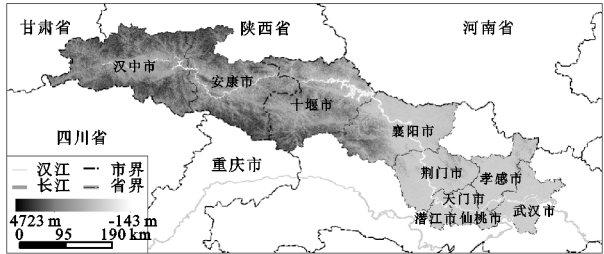


图 1 汉江流域概况

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

2008—2015 年汉江干流的水资源投入与产出数据(主要包括三大产业从业人数、农畜产品产量、国内生产总值、工业用水、人口自然增长率、非农业人口占比、科教事业支出费用、城镇居民人均收入、每万人医生数、固定资产投资额、以及常规的水资源评价环境数据等)分别来自 2008—2015 年各市统计年鉴、《陕西省水资源公报》、《湖北省水资源公报》、城市统计年鉴以及政府的环保、林业、水利等网站。缺失的部分数据根据相邻年份插值予以补充。本文使用的软件有 DEA 2.1, ArcGIS 10.6。

为了能够更加真实地反映社会经济发展状况,在遵循客观规律的基础上,选取对社会发展能够进行计算和容易获得的因子(表 1)作为衡量 SDI 的指标,将其作为期望产出。其中, x_2, x_3, x_4, x_5 指标增长对社会的成长有促进作用,本文将其列为高优指标; x_1 指标值越合理,社会生长能力越强,将其定为低优指标。

计算公式如下:

$$SDI = \frac{1}{n} \sum X_{ij} \tag{1}$$

式中:SDI 值越低表明社会成长能力越弱; n 为指标的数量; X'_{ij} 为第 i 项指标在第 j 年份的初始值, X_{ij}

为其归一化值,计算方法如下:

表 1 SDI 社会维度的指标体系

目标层	一级指标	衡量指标	效应
社会发展指数 SDI	人口控制(x_1)	人口自然增长率	—
	城市化水平(x_2)	非农业人口比例	+
	政府对科教的重视程度(x_3)	科教事业费占财务支付比重	+
	生活水平(x_4)	城镇居民人均可支配收入	+
	医疗资源占有情况(x_5)	每万人口医生数	+

高优指标:

$$X_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\max(X_i)} \times 100\% \quad (2)$$

低优指标:

$$X_{ij} = \frac{\min(X_i)}{X'_{ij}} \times 100\% \quad (3)$$

2.2 DEA 方法

DEA 又称为投入产出法,它通过对特定单元的效率(投入的指标)与提供相同服务的一组相似单元的效率(产出的指标)做线性规划并进行变换,然后根据其线性规划的对偶问题,求解这个对偶问题的最值 θ 。 $\theta=1$ 表明 DEA 有效,表示投入与产出比达到最优,为相对高效。 $\theta<1$ 则表明非 DEA 有效,即投入与产出比没有达到最优,为相对低效。一般来说, θ 越接近 1 说明效果越好。该方法多用于系统评估和规划具有多输入多输出的复杂系统等领域^[18-21],如生产率指数和规模回报分析。具体计算方法见参考文献^[22]。

2.3 Malmquist 全要素生产率指数模型

由于 DEA 方法的数据分析只能局限在某一个特定年份,缺乏动态性。为此,本文引入了 Malmquist 全要素生产率指数模型,用以测量长时间序列数据的动态效率^[23-25],同时也说明社会技术进步对水资源产出的贡献。Fare 等^[26-28]将其与 DEA 模型结合,构建了 Malmquist 全要素生产率变化指数模型 TFP_t^{t+1} 来对比 3 个分解指数(纯技术效率指数 PEC、技术进步指数 TC 和规模效率指数 SEC)之间的关联及其变动分析。如果 TFP 及其分解指数大于 1,则意味着对应的效率正在上升;如果小于 1,则意味着对应的效率正在下降。计算公式如下:

$$TFP_t^{t+1} = PEC \times SEC \times TC = \frac{D_v^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_v^t(x^t, y^t)} \times \frac{D_v^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_v^{t+1}(x^t, y^t)} \times \frac{D_c^t(x^t, y^t)}{D_c^t(x^t, y^t)} \times \left[\frac{D_c^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \times \frac{D_c^t(x^t, y^t)}{D_c^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: TFP_t^{t+1} 是决策单元的 Malmquist 全要素生产率指数,代表了从 t 到 $t+1$ 这一段时期内水资源绿色效率的实时更新; x 和 y 分别表示投入、期望产出的向量; c 和 v 分别表示规模报酬不变和规模报酬可变; $D^t(x^t, y^t), D^t(x^{t+1}, y^{t+1})$ 分别指以 t 时期的数据为参照时, t 和 $t+1$ 时期的决策单元的距离函数。

3 结果与分析

3.1 水资源效率分析

汉江流域 WREE 和 WRGE 的计算结果见图 2。汉江流域 WREE 和 WRGE 的平均值分别为 0.871, 0.859,均小于 1,说明水资源的投入与产出比没有达到最优,相对低效。同时,WRGE 的变异系数都大于 WREE 的变异系数,表明汉江流域各地市 WRGE 较 WREE 分配更加不均衡。

为了更加直观地对水资源效率进行区域分析,选择 2008—2015 年各地市的平均值,在 ArcGIS 中运用了自然断点法进行空间分布制图并将 WREE 和 WRGE 分别分为低级、中级、高级 3 类(图 3)。

从图 3 可知,WREE 为高级的地市主要分布在汉江流域的中游襄阳市和下游的仙桃市、潜江市和武汉市,而低级和中级基本处在中上游地区,这说明汉江中下游的 WREE 普遍高于中上游地区;从 GDP 占比来看,在 2008—2015 年安康市和孝感市经济相对发展缓慢,GDP 分别仅占汉江干流总量的 3.23%和 6.93%,这是安康市和孝感市 WREE 为低级的一个主要原因;从地域分布来看,汉水依次从潜江市、天门市、仙桃市、孝感市、流入武汉市汇入长江,而在流过程中,经过孝感市的水资源总量较少,导致孝感市 WREE 处于低级。

WRGE 为高级的地市有潜江市、天门市、仙桃市,均属于经济发展缓慢的地区(GDP 占比均小于 2.7%),但对 WRGE 影响很小,表明 WRGE 和经济发展两者没有较强的相关性,此类城市应当持续保护生态环境,加大宣传力度,对三大产业配比进行合理分配;WRGE 为低级的地市有安康市、十堰市、荆门市、孝感市,其 SDI 分别为 0.68,0.66,0.34,0.67,在整个汉江地市中排名均靠后,是影响 WRGE 的主要因素,此类城市应该加大基础设施建设,加强医疗服务,增加教育投入,大力发展第三产业,加快社会发展,使得水资源利用效率能够得以提升。

3.2 WRGE 全要素生产率及其分解指数的动态演变分析

汉江干流 WRGE 全要素生产率及其分解指数的分年变化趋势见图 4,分地区堆积图见图 5。

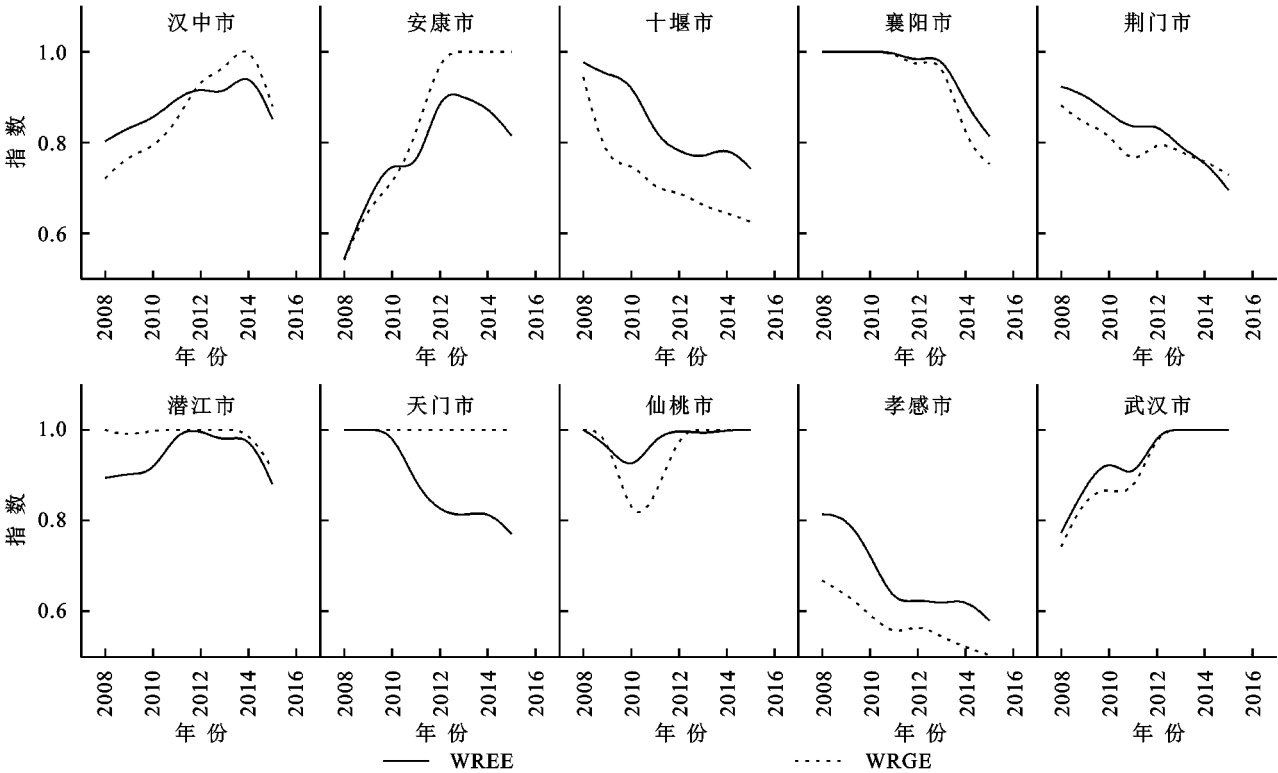


图 2 各地市 WREE 和 WRGE 年际变化

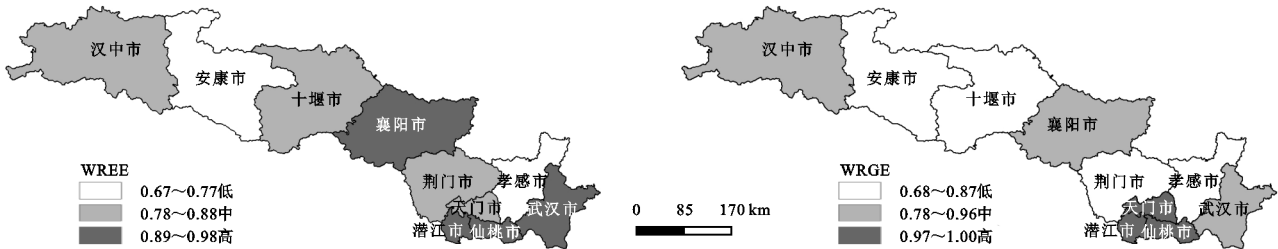


图 3 汉江流域各地市水资源利用效率空间分布

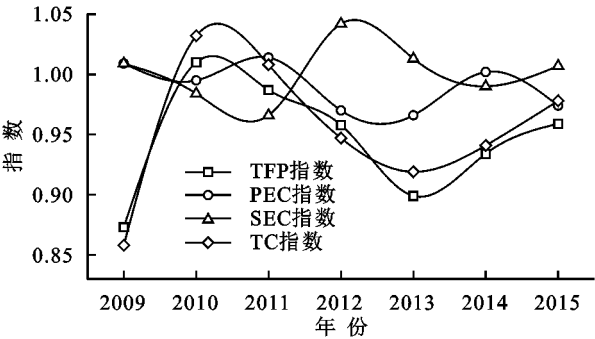


图 4 水资源绿色效率 TFP 及分解指数分年变化趋势

(1) 2008—2015 年 TFP 指数平均值为 0.946, 表明汉江干流地区 WRGE 全要素生产率整体呈下降趋势, 尽管各年也出现波动变化; 2008—2010 年一直保持快速增长趋势, 平均增长幅度为 15.69%, 2010 年后情形反转, 一直持续下降到 2013 年, 随后又开始增长。安康市和武汉市的 TFP 指数分别为 1.01, 1.05, 表明其全要素生产率一直呈上升趋势。由此可知, 各地市 WRGE 全要素生产率在 2008—2015 的 8 a 间并未保持稳定状态, 还需进一步研究它的分解指标。

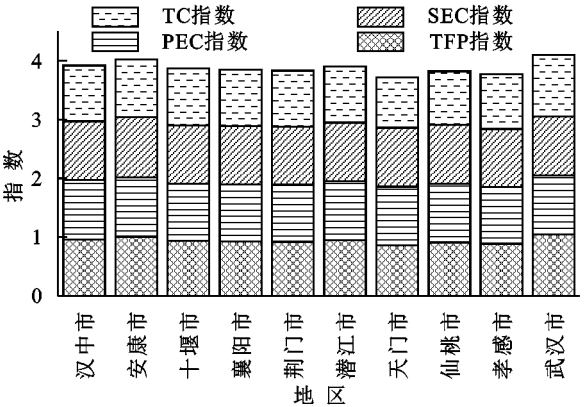


图 5 汉江干流 WRGE 的 Malmquist 指数分地区堆积

(2) 2008—2015 年 PEC 指数平均值为 0.99, 增长幅度为 -3.47%, 对 TFP 起着负面影响。从各地市 PEC 的平均值来看, 在 2008—2015 年汉中市呈现上升趋势, 安康市、潜江市、天门市、仙桃市和武汉市保持稳定, 其他地区呈现出下降趋势。

(3) 2008—2015 年 SEC 指数的平均值为 1.001, 增长幅度为 0.1%, 这表明近 8 a WRGE 的 TFP 的不断增长, 规模效率在绿色效率中起着至关重要的推动作用,

加大规模建设有利于提升汉江流域的 WRGE。各地市 SEC 的平均值来看,仅安康市(1.023)呈现上升趋势,十堰市、襄阳市、荆门市、孝感市呈下降趋势,其他地区保持不变。对比来看,2008—2015 年汉江干流各地市的 PEC 指数和 SEC 指数基本保持一致的变化。

(4) 2008—2015 年 TC 指数平均值为 0.955,仅 2009—2011 年的 TC 值大于 1,这说明技术进步对 WRGE 的全要素生产效率起着负面效果且逐渐呈现下降趋势,是约束 WRGE 全要素生产率的主要原因。从各地市 TC 的平均值来看,仅武汉市(1.058)呈现上升趋势,其他地区呈现出下降趋势,说明汉江流域除武汉市外的其他城市在技术进步方面发展既不平衡,且有较大的提升空间。

总体来看,汉江干流 WRGE 的全要素生产率表现出减弱的趋势,其分解指标中技术效率和技术进步指数的负面影响程度大于规模效率的正面影响,表明规模效率是促进汉江流域 WRGE 提升的有利因素,而纯技术效率和技术进步是影响 WRGE 提升的不利因素。汉江干流地区水资源全要素生产率呈增长的城市只有武汉市和安康市,说明安康市和武汉市的水资源利用效率较高,这与其城市区位、水资源量和经济发展有着密不可分的关系;十堰市、襄阳市、荆门市和孝感市的水资源全要素生产率及其分解指数均呈现下降趋势,说明在发展过程中仍然存在对水资源利用程度不高、水资源分配不均等原因,在今后的生产生活中还需要持续改善三大产业的协调发展来提升水资源全要素生产率。

4 讨论

DEA 具有不需要提前确定函数关系、效率评价结果不会受到不同要素比例的影响、可以分析决策单元的影响因素以及非主观赋权等优点,得到了广泛使用。在评价投入指标、产出指标效率方面十分有效,在评价水资源效率中有全方面的应用,且其效率评价结果不会受到不同比例的影响。以往的研究模式主要集中在省域层面,对流域研究较少。本文选用了汉江流域十个地市 2008—2015 年的面板数据,以 WRGE 和 WREE 为研究对象,计算了水资源的利用效率和 Malmquist 指数并进行了深入分析,在计算指标选取中,能够较全面的收集到相关数据,研究结果与实际情况基本一致。

为保证研究结果的准确性,查阅水资源利用效率评价相关的文献^[29-33],目前还没有特定的分级标准,本文将水资源利用效率以自然段点分级法按照低、

中、高三级进行了分级表达,具有一定的不确定性,因此仍应加强分级标准制定的研究工作。

汉江干流水资源利用效率有较大幅度的差距,评价结果大致反映出汉江干流水资源利用效率的情况,可为相关部门水资源的管理与优化配置提供参考依据。WREE 处于高级的地区较少而处于中级和低级的地区较多,且多数位于汉江中上游。这说明其自然资源投入、资本投入、劳动力投入和 GDP 产出并未达到最优,此类地区需要协调配置,加大对 WREE 的重视;WRGE 处于高级的地区较少且其分布较为集中,这和地区自身对水资源的利用情况息息相关。

在时间序列上,本文仅选用了 8 a 的数据进行计算,研究结果存在一定的局限性。此外,文中部分数据缺失也会对结果有一定的影响。对于水资源利用效率变动,今后应开展各项指标的相关性分析,以及采用不同处理模型并对其稳定性及模型参数的敏感性做进一步研究。

5 结论

(1) 在同一流域的不同地市,随着各地区产出要素值的不同,会导致水资源利用效率(WREE 和 WRGE)存在空间差异。通过对比各地市水资源利用效率,结合各地区发展状况,可以为合理利用水资源提供参考依据。

(2) 通过对水资源利用效率时空变动研究,水资源利用效率较高的地区有明显集中分布,且均分布于汉江下游区域,水资源利用效率的高低与区位和其自身对水资源的利用情况息息相关。

(3) DEA 在计算水资源利用效率时具有较高的可靠性,将 Malmquist 全要素生产率指数模型与 DEA 结合,更能多维度地分析水资源利用效率。

参考文献:

- [1] 陈璇璇,张旖旎,刘莉,等.基于超效率 DEA 模型的陕晋两省水资源利用效率评价[J].灌溉排水学报,2020,39(10):138-144.
- [2] 沈满洪.水资源经济学[M].北京:中国环境科学出版社,2008.
- [3] 任玉芬,苏小婉,贺玉晓,等.中国生态地理区城市水资源利用效率及影响因素[J].生态学报,2020,40(18):6459-6471.
- [4] 耿献辉,张晓恒,宋玉兰.农业灌溉用水效率及其影响因素实证分析:基于随机前沿生产函数和新疆棉农调研数据[J].自然资源学报,2014,29(6):934-943.
- [5] 惠婷,陈晓楠,宋健峰.基于水足迹的作物生产生态效率评

- 价:以陕西省为例[J].生态学报,2021,41(8):3078-3091.
- [6] 李双,杜建括,邢海虹,等.基于水足迹理论和灰靶模型的汉江干流水资源可持续利用评价[J].节水灌溉,2019(9):74-80.
- [7] Selvakumar S, Chandrasekar N, Kumar G. Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India[J]. Water Resources & Industry, 2017,17:26-33.
- [8] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001,130(3):498-509.
- [9] 吴义根,冯开文,曾珍.我国省际区域生态效率的空间收敛性研究[J].中国农业大学学报,2019,24(2):202-214.
- [10] 谭娟,王卿,沙晨燕,等.基于指标体系法的生态系统健康评价[J].中国人口·资源与环境,2012,22(S1):352-355.
- [11] Yao X, Feng W, Zhang X, et al. Measurement and decomposition of industrial green total factor water efficiency in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,198:1144-1156.
- [12] 李俊霖.基于随机前沿模型的生产率研究述评[J].兰州财经大学学报,2019,35(5):7-14.
- [13] 王普查,孙冰雪.能源禀赋、贸易开放对资源绿色利用效率的影响[J].大连理工大学学报(社会科学版),2019,40(2):9-16.
- [14] 赵晨,王远,谷学明,等.基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率[J].生态学报,2013,33(5):1636-1644.
- [15] 杨高升,谢秋皓.长江经济带绿色水资源效率时空分异研究:基于 SE-SBM 与 ML 指数法[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):349-358.
- [16] 张玮,刘宇.长江经济带绿色水资源利用效率评价:基于 EBM 模型[J].华东经济管理,2018,32(3):67-73.
- [17] 孙才志,姜坤,赵良仕.中国水资源绿色效率测度及空间格局研究[J].自然资源学报,2017,32(12):1999-2011.
- [18] Moutinho V, Madaleno M, Macedo P, et al. Efficiency in the European agricultural sector: Environment and resources [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,25(18):17927-17941.
- [19] 贺玉晓,苏小婉,任玉芬,等.中国生态地理区城市水资源利用效率时空分异特征[J].生态学报,2020,40(20):7464-7478.
- [20] 马晓龙,保继刚.基于数据包络分析的中国主要城市旅游效率评价[J].资源科学,2010,32(1):88-97.
- [21] 王雅晴,冼超凡,欧阳志云.基于灰水足迹的中国城市水资源可持续利用综合评价[J].生态学报,2021,41(8):2983-2995.
- [22] 魏权龄.评价相对有效性的 DEA 方法—运筹学的新领域[M].北京:中国人民大学出版社,1988.
- [23] 洪铮,王林,章成.绿色发展背景下区域旅游生态效率的影响因素研究:以西部地区为例[J].生态学报,2021,41(9):3512-3524.
- [24] 海霞,李伟峰,王朝,等.京津冀城市群用水效率及其与城市化水平的关系[J].生态学报,2018,38(12):4245-4256.
- [25] 廖虎昌,董毅明.基于 DEA 和 Malmquist 指数的西部 12 省水资源利用效率研究[J].资源科学,2011,33(2):273-279.
- [26] 刘佳,陆菊,刘宁.基于 DEA-Malmquist 模型的中国沿海地区旅游产业效率时空演化、影响因素与形成机理[J].资源科学,2015,37(12):2381-2393.
- [27] 陈雪婷,宋涛,蔡建明,等.基于 DEA 和 Malmquist 的中国城市代谢效率研究[J].地理科学,2015,35(4):419-426.
- [28] Fre R, Grosskopf S, Lindgren B, et al. Productivity changes in Swedish pharmacies 1980—1989: A non-parametric Malmquist approach[J]. Journal of Productivity Analysis, 1992,3(1):81-97.
- [29] 薛静静,沈镭,彭保发,等.区域能源消费与经济和环境绩效:基于 14 个能源输出和输入大省的实证研究[J].地理学报,2014,69(10):1414-1424.
- [30] 马海良,丁元卿,王蕾.绿色水资源利用效率的测度和收敛性分析[J].自然资源学报,2017,32(3):406-417.
- [31] 韩文艳,陈兴鹏,张子龙,等.中国地级及以上城市水资源利用效率的时空格局分析[J].水土保持研究,2018,25(2):354-360.
- [32] 宫菲,杜灵通,孟晨,等.宁夏陆地生态系统水分利用效率特征及其影响因子[J].生态学报,2019,39(24):9068-9078.
- [33] 陈磊,吴继贵,王应明.基于空间视角的水资源经济环境效率评价[J].地理科学,2015,35(12):1568-1574.