

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.012

长江流域水资源利用效率时空演变特征分析

陈 述^{1,2}, 吕文芳², 王建平²

(1. 三峡大学湖北省水电工程施工与管理重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为了对长江流域水资源利用效率进行动态评价, 以长江流域 11 个省级行政区为研究对象, 建立长江流域水资源利用效率 SEDEA 模型; 结合 GIS 空间分析法, 探究长江流域水资源利用效率时空变化; 利用 Malmquist 指数与 WARD 系统聚类方法, 分析影响水资源利用效率变化的内在原因。结果表明: 长江流域 11 省区 2013—2019 年水资源利用效率总体呈上升趋势, 水资源利用水平具有显著的空间差异性, 东西部地区存在较大差距; 11 省区水资源的 Malmquist 指数与技术进步指数的演变趋势基本一致, 说明 Malmquist 指数的提升主要得益于技术进步指数的增长, 而制约水资源利用效率提升的主要因素是综合技术效率指数。因此, 加大科技投入和技术创新, 优化产业结构, 合理配置生产资源是提高水资源利用效率的重要途径。

关键词: 长江流域; 水资源利用效率; SEDEA 模型; DEA 视窗分析; Malmquist 指数

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)04-0080-07

Analysis of spatio-temporal evolution characteristics of water resources utilization efficiency in the Yangtze River Basin // CHEN Shu^{1,2}, LYU Wenfang², WANG Jianping² (1. Hubei Provincial Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. School of Economics and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: With 11 provinces in the Yangtze River Basin used as the research objects, an SEDEA window model for dynamic evaluation of water resources utilization efficiency in the Yangtze River Basin was established. In combination with the GIS spatial analysis method, spatio-temporal changes of the water resources utilization efficiency in the Yangtze River Basin were explored. The Malmquist index and Ward's clustering method were used to investigate factors that affect the water resources utilization efficiency. The results show that the water resources utilization efficiency of 11 provinces in the Yangtze River Basin had an overall upward trend from 2013 to 2019, and the water resources utilization level had significant spatial differences, with a distribution trend being strong in the east and weak in the west. The evolution trend of the Malmquist index of water resources in 11 provinces is basically the same as that of the technological progress index, indicating that the improvement of the Malmquist index is mainly due to the growth of the technological progress index, and the comprehensive technical efficiency index is an important factor restricting the improvement of the water resource utilization efficiency. Increasing scientific and technological investment and technological innovation, optimizing industrial structure, and rationally allocation of production resources are important ways to improve the water resources utilization efficiency.

Key words: the Yangtze River Basin; water resources utilization efficiency; SEDEA model; DEA window analysis; Malmquist index

长江流域横跨中国东中西部, 其经济发展具有举足轻重的战略性作用^[1]。随着人类活动的持续扩张, 长江流域经济发展受水资源约束的问题凸

显^[2], 提高水资源利用效率是解决水资源短缺问题的有效途径^[3-4]。因此, 分析长江流域水资源利用效率的时空演变特征, 对于解决长江流域水资源问

基金项目: 国家自然科学基金(52079073); 湖北省高等学校哲学社会科学研究项目(21Y042)

作者简介: 陈述(1986—), 男, 教授, 博士, 主要从事水资源管理研究。E-mail: chenshu@ctgu.edu.cn.

通信作者: 王建平(1972—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水资源管理研究。E-mail: wjp@ctgu.edu.cn

题和促进经济发展至关重要。

针对水资源利用效率的问题,国内外学者开展了一系列的研究工作。基于评价指标体系的综合评价方法是目前常用的水资源利用效率评估方法。杨丽英等^[5]通过 Delph 方法构建水资源利用效率评价指标体系,阐述水资源利用效率评价内涵及主要内容。管新建等^[6]采用熵权模型计算综合指数,对黄河流域水资源综合利用效率进行评估并分析其差异性。孙才志等^[7]运用地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 模型测度 2000—2016 年中国水资源绿色效率并探究其驱动机理。相较于综合评价方法,基于目标规划模型的效率测算方法,如随机前沿方法 (stochastic frontier approach, SFA)、数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA)、非径向且基于松弛变量测度 (slacks-based measure, SBM) 的 DEA 模型等,具有不受投入产出量纲影响等优势,从而成为主流的水资源利用效率评价方法。董战峰等^[8]运用 DEA 模型对我国 31 个省做行政区 (以下简称省区) 2010 年水资源利用效率进行了分析;高新才等^[9]基于非合意产出的超效率 SBM 模型对西北地区地级城市的水资源利用效率进行了测度;杨骞等^[10]运用 DEA 模型对污染排放约束下中国农业水资源效率进行了测度;钱文婧等^[11]在全要素生产框架下对我国 31 个省区进行水资源利用效率测评。

以上研究为评价水资源利用效率提供了重要的方法,但传统模型只能静态分析各个决策单元在同一时间点的效率,无法对有效决策单元做进一步比较,难以对长时间序列水资源利用效率进行动态评价,且针对长江流域水资源利用效率测算的研究较为缺乏。鉴于此,本文综合运用 GIS 空间分析法、离差平方和系统聚类法和 Malmquist 指数,建立长江流域水资源利用效率的超效率数据包络分析 (super efficiency data envelopment analysis, SEDEA) 模型,探索长江经济带水资源利用效率的时空演变特征,以期对长江流域环境保护和经济发展提供评价依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长江发源于青藏高原唐古拉山脉,干流超过 6300 km,流经青海、西藏、四川、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海共 11 个省区,流域总面积 180 万 km²,横跨我国东中西三大板块,拥有约 4 亿人口,其经济带生产总值占全国的比例超过 40%^[12]。各省区资源环境状况、经济社会发展水平

极度不均衡,加之水资源时空分布不均,导致水资源短缺成为长江流域经济发展的重要瓶颈。

1.2 指标选取

水资源利用效率是衡量经济系统对水资源有效开发利用和管理的重要综合指标,是与各种投入和产出有关的经济变量,影响水资源利用效率的因素主要有经济社会发展水平与环境因素。经济社会发展水平主要包含人口、产业结构和科技水平,经济社会发展水平的提高一方面意味着更多水资源的消耗,可能会对水资源利用效率产生一定的负面影响;另一方面还意味着水污染防治能力和水资源利用效率的提升。环境因素主要包含水资源污染程度,水环境保护一方面会导致地区废污水排放的减少,从而有利于水资源利用效率的提升;另一方面可能会增加企业的生产成本,对经济产生一定的负面影响,进而不利于水资源利用效率的提升。

以 2013—2019 年为研究时段,为保证水资源利用效率测算结果的精度和准确性,同时考虑数据的可获得性,选取从业人员数量、资本存量、地区用水总量作为反映资源消耗的投入指标,选取地区 GDP 作为反映生产价值的产出指标,废水中氨氮的排放量作为非合意产出^[13]。具体来看,从业人员代表了各省区生产规模的大小,在一定程度上影响了水资源利用效率的高低;资本存量则可以更精确地反映水资源利用过程中资本的消耗;地区用水总量能直接反映出长江流域各省区消耗的水资源总量。GDP 作为产出指标,能综合反映水资源有效利用可产生的经济利益;废水中氨氮的排放量属于非期望产出,过多的排放不仅会给生态环境带来污染,也会降低水资源的利用效率。

1.3 数据来源

投入和产出指标中,地区用水总量来自各省区水资源公报,废水中氨氮排放量、从业人员数量来自各省区《水利年鉴》和《统计年鉴》,GDP 数据来自《中国统计年鉴》,GDP 指数来自国家统计局网站,资本存量根据单豪杰^[14]提出的方法计算得出。

为消除价格影响,通过 GDP 指数计算得到各省区 2013—2019 年 GDP。其中西藏由于缺失资本存量数据,取青海和新疆数据的平均值作为西藏的数据。

2 研究方法

2.1 SEDEA 模型

DEA 是一种常用的非参数评估方法^[15],但存在无法评价多个有效决策单元的缺陷^[16]。SEDEA 在 DEA 模型的基础上进行改善,解决了同处于生产

前沿面的决策变量无法进一步排序的问题^[17]。

对于 n 个地区,把地区 j 的从业人员数量、固定资产投资、地区用水总量等 m 项作为投入,表示为 $X_j = \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}$ ($j = 1, 2, \dots, n$), 把地区 j 的 GDP、废水中氮氮的排放量等 s 项作为产出,表示为 $Y_j = \{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj}\}$ ($j = 1, 2, \dots, n$), 其中 x_{aj} ($x_{aj} > 0; a = 1, 2, \dots, m$) 和 y_{bj} ($y_{bj} > 0; b = 1, 2, \dots, s$) 分别为地区 j 的第 a 项投入和 b 项产出。将投入产出数据整理后与生产函数所描述的最优产出状态比较得到各地区相应的效率值 θ , 建立不变规模、报酬下以投入为导向的 SEDEA 模型:

$$\begin{cases} \min \theta \\ \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^n X_j \lambda_j \leq \theta X_k \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n Y_j \lambda_j \geq Y_k \\ \lambda_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中 λ_j 为地区 j 投入和产出项的权重。 $\theta \geq 1$ 代表该地区处于生产前沿面,属于有效决策单元^[18]。

2.2 DEA 视窗分析法

传统的 DEA 模型只能用来分析截面数据,将某一地区与同一时间点上的其他地区进行对比分析,导致效率结果在年际间不具有可比性。针对多地区、长时间序列投入产出指标,本文采用 DEA 视窗分析测算整个面板数据,探索各地区的水资源效率变化趋势^[19-20]。

根据时间序列长度确定窗宽为 3,运用移动平均法将长江流域的 11 省区 7 年的数据分割为 5 个有重叠的时间窗,分别为视窗 1 (2013—2015 年)、视窗 2 (2014—2016 年)、视窗 3 (2015—2017 年)、视窗 4 (2016—2018 年) 以及视窗 5 (2017—2019 年)。将不同年份同一省区的数据视为多个独立的单元,对各地区在不同时期的效率进行纵向比较。分别对各个视窗下 11 个省区共 33 个决策单元进行 SEDEA 测算,根据计算结果分析各地区水资源利用效率的历史变化趋势。

2.3 标准差椭圆

标准差椭圆 (standard deviation ellipse, SDE) 充分发挥了 ArcGIS 空间可视化的优势,通过长轴、短轴、分布重心以及方位角的变化等形式精确地描述长江流域水资源利用效率空间分布的演化特征^[21]。

通过 SEDEA 视窗分析结果,计算水资源利用效率重心 $(\bar{Q}_w, \bar{P}_w)$, 并与地理重心进行比较,反映长江流域水资源利用效率分布在空间上的相对地理位置:

$$\bar{Q}_w = \frac{\sum_{i=1}^{n'} w_i q_i}{\sum_{i=1}^{n'} w_i} \quad (2)$$

$$\bar{P}_w = \frac{\sum_{i=1}^{n'} w_i p_i}{\sum_{i=1}^{n'} w_i} \quad (3)$$

式中: (q_i, p_i) 为研究对象 i 的空间区位; w_i 为权重; n' 为研究对象的个数。

通过计算 SDE 的长轴 σ_q 、短轴 σ_p 和方位角 β , 比较不同年份间的变化,反映长江流域水资源利用效率分布在空间上的离散程度和主导方向:

$$\sigma_q = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n'} (w_i q'_i \cos \beta - w_i p'_i \sin \beta)^2}}{\sum_{i=1}^{n'} w_i^2} \quad (4)$$

$$\sigma_p = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n'} (w_i q'_i \sin \beta - w_i p'_i \cos \beta)^2}}{\sum_{i=1}^{n'} w_i^2} \quad (5)$$

式中 q'_i 和 p'_i 分别为各研究对象区位相对于区域中心的坐标。

2.4 Malmquist 指数

结合非参数线性规划法与 DEA 模型,构造从 t 时段到 $t+1$ 时段长江流域水资源利用效率的 Malmquist 指数^[22],弥补 SEDEA 模型只能对各决策单元进行静态效率分析,无法挖掘导致效率变动的深层次原因这一缺陷^[23-24]。

利用方向距离函数,计算出各地区水资源利用效率与生产函数所描述的最优产出状态的距离,再运用混合方向距离函数计算得出两个相邻时段内 Malmquist 指数 (I_p):

$$I_p = \left(\frac{D_{t \rightarrow t+1}}{D_t} \cdot \frac{D_{t+1}}{D_{t+1 \rightarrow t}} \right)^{\frac{1}{2}} = E_C E_T \quad (6)$$

式中: D_t 为以 t 时段技术为参考的距离函数; D_{t+1} 为以 $t+1$ 时段技术为参考的距离函数; $D_{t \rightarrow t+1}$ 为以 t 时段技术为参考到 $t+1$ 时段的距离函数; $D_{t+1 \rightarrow t}$ 为以 $t+1$ 时段技术为参考到 t 时段的距离函数; E_C 为综合技术效率指数,反映生产过程中技术水平的有效性; E_T 为技术进步指数,反映了技术的改进与创新水平。Malmquist 指数可分解为综合技术效率指数和技术进步指数,综合技术效率指数又可以分解为纯技术效率指数和规模效率指数:

$$I_p = \frac{D_{t+1}}{D_t} \left(\frac{D_t}{D_{t+1 \rightarrow t}} \cdot \frac{D_{t \rightarrow t+1}}{D_{t+1}} \right)^{\frac{1}{2}} = E_{PC} E_{SC} E_T \quad (7)$$

式中: E_{PC} 为纯技术效率指数,反映了管理和技术等

因素对生产效率的影响; E_{SC} 为规模效率指数,反映了生产资源配置对效率的影响^[25]。

当 E_C 、 E_T 、 E_{PC} 、 E_{SC} 和 I_p 大于 1 时,表示在一定时间内该指标有所改善;当其数值小于 1 时,表示在一定时间内该指标有所变化

3 结果与分析

3.1 基于 SEDEA 视窗模型的效率分析

建立长江流域水资源利用效率 SEDEA 视窗模型,采用 EMS1.3 软件对每个窗口下 33 个决策单元测算水资源利用效率值,得到长江流域 11 省区 SEDEA 视窗分析的结果,如表 1 所示。

从时间维度分析,在不同窗口下,各省区的水资源利用效率在相对于有更高投入产出的视窗 5 有所下降;随着时间的推移,长江流域各省区的水资源利用效率都有所提高。从各年视窗分析的均值可以看出 11 省区整体水资源利用率均在 0.6 以上,并呈现逐年上升的趋势。2015 年水资源利用效率显著提升,2019 年达到最高值。

从区域维度分析,相比于江苏、上海,其他省区水资源利用效率处于较低水平。其中,上海市水资源利用效率多次超过 1,相较于其他省区有较大的优势。除江苏、上海外,其他省区 2013—2019 年水资源利用效率均未超过 1,且部分省区多年间相对效率值呈现下降趋势,一定程度上说明长江流域水资源利用效率空间差异性明显,水资源利用效率亟待提升。

整理 SEDEA 视窗分析结果,得到长江流域各省区水资源利用效率 2013—2019 年的均值与排名(表 2),绘制水资源利用效率折线图(图 1)。11 省区中,上海市和江苏省水资源利用效率远大于其他省区,水资源利用效率处于中间水平的是湖北、重庆、湖南、四川、云南 5 个省区,而江西、安徽、青海、西藏 4 个省区的效率值相对较低。其中,西藏、四川、重庆 3 个省区水资源利用效率上升态势明显,湖北、安徽、江苏、上海 4 个省区存在一定的波动。

3.2 水资源利用效率的重心迁移与离散趋势

采用 ArcGIS 软件分析 2013—2019 年长江流域水资源利用效率的重心及 SDE 的变化轨迹,如图 2 所示。

从空间上来看,2013—2019 年效率重心始终在地理重心的东面,SDE 以东西方向为主导,表明研究时段内长江流域水资源利用效率在空间上较为稳定,呈现东强西弱的空间分布态势,东部地区水资源利用相对高效,这也与东部地区较为领先的发展水平有关。

表 1 11 省区水资源利用效率 SEDEA 视窗分析结果

Table 1 SEDEA window analysis results of water resources utilization efficiency of 11 provinces

省区	视窗	水资源利用效率						
		2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
青海	1	0.46	0.50	0.55				
	2		0.47	0.51	0.56			
	3			0.51	0.55	0.56		
	4				0.55	0.55	0.57	
	5					0.53	0.54	0.56
西藏	1	0.39	0.43	0.49				
	2		0.40	0.45	0.50			
	3			0.45	0.50	0.53		
	4				0.49	0.52	0.54	
	5					0.50	0.52	0.55
四川	1	0.62	0.67	0.74				
	2		0.63	0.69	0.75			
	3			0.69	0.74	0.75		
	4				0.74	0.74	0.75	
	5					0.71	0.72	0.76
云南	1	0.59	0.63	0.69				
	2		0.58	0.64	0.70			
	3			0.64	0.70	0.73		
	4				0.69	0.72	0.74	
	5					0.69	0.71	0.75
重庆	1	0.58	0.68	0.76				
	2		0.64	0.72	0.81			
	3			0.67	0.76	0.83		
	4				0.71	0.77	0.82	
	5					0.71	0.75	0.81
湖北	1	0.66	0.71	0.78				
	2		0.66	0.73	0.78			
	3			0.72	0.78	0.80		
	4				0.77	0.79	0.80	
	5					0.75	0.76	0.79
湖南	1	0.65	0.70	0.75				
	2		0.65	0.70	0.76			
	3			0.70	0.75	0.77		
	4				0.75	0.76	0.78	
	5					0.73	0.75	0.79
江西	1	0.47	0.52	0.58				
	2		0.48	0.54	0.59			
	3			0.54	0.59	0.60		
	4				0.58	0.60	0.61	
	5					0.57	0.58	0.61
安徽	1	0.46	0.50	0.56				
	2		0.47	0.52	0.57			
	3			0.52	0.57	0.58		
	4				0.57	0.57	0.58	
	5					0.55	0.56	0.59
江苏	1	0.64	0.72	1.07				
	2		0.64	0.91	0.93			
	3			0.82	0.84	0.92		
	4				0.77	0.80	0.84	
	5					0.74	0.74	0.79
上海	1	1.04	0.93	1.12				
	2		0.87	0.94	1.17			
	3			0.93	1.00	1.11		
	4				0.99	0.99	1.14	
	5					0.95	0.96	1.14

表 2 11 省区 2013—2019 年水资源利用效率均值与排名
Table 2 Average values and ranking of water resources utilization efficiency of 11 provinces from 2013 to 2019

省区	均值	排名	省区	均值	排名
青海	0.54	10	湖南	0.86	3
西藏	0.47	11	江西	0.65	8
四川	0.73	6	安徽	0.58	9
云南	0.67	7	江苏	0.87	2
重庆	0.74	5	上海	1.05	1
湖北	0.84	4			

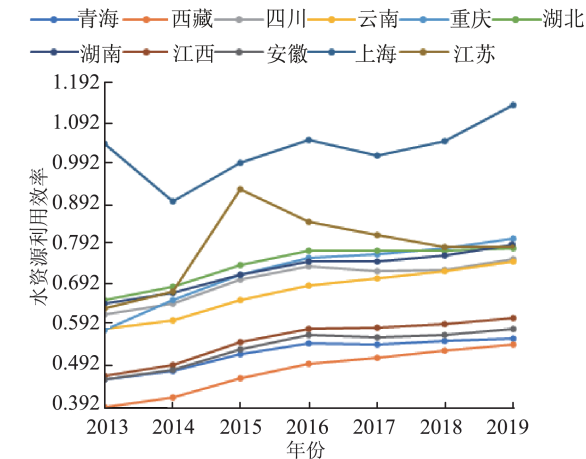


图 1 11 省区 2013—2019 年水资源利用效率

Fig.1 Water resources utilization efficiency of 11 provinces from 2013 to 2019

从时间上来看,2013—2015 年水资源利用效率重心向西北移动,2015—2017 年向西南移动,2017—2019 年向东南移动,重心总体大幅向西部移动;而 SDE 在 2013—2019 年呈现扩大趋势,且向西部有所偏移,说明长江流域水资源利用效率的空间分布趋向分散,西部水资源利用效率有所提高,与东部水资源利用效率的差距逐渐缩小。

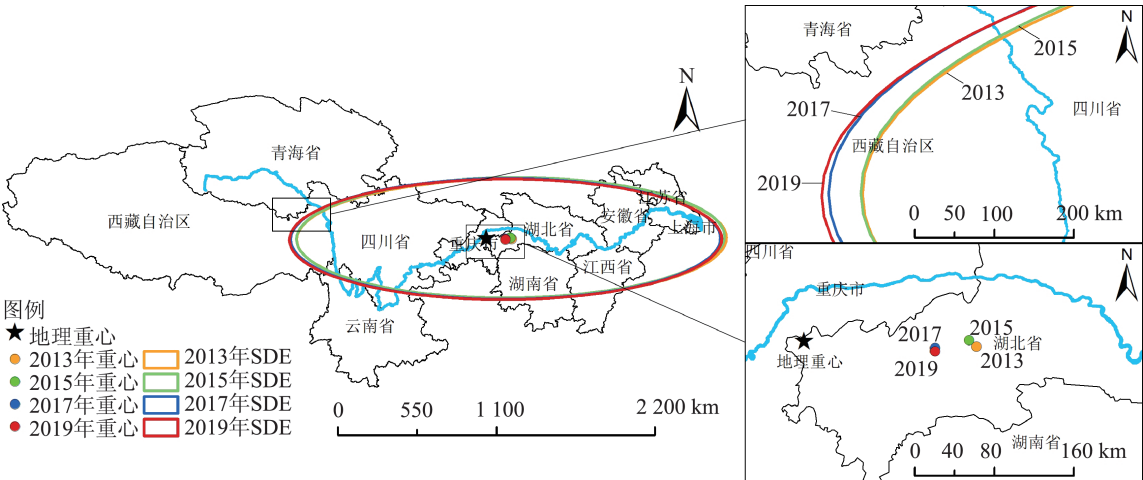


图 2 2013—2019 年长江流域水资源利用效率重心及 SDE 变化

Fig. 2 Changes of gravity center and SDE of water resources utilization efficiency in the Yangtze River Basin from 2013 to 2019

3.3 基于 Malmquist 指数的生产率分析

计算长江流域水资源利用效率的 Malmquist 指数,分析各年份水资源利用效率的时空差异及变化原因,如图 3 所示。Malmquist 指数多年均值为 1.075,2013—2019 年呈现先上升后下降的趋势,拐点出现在 2015 年,表明 2013—2019 年长江流域水资源利用效率总体呈现上升趋势,但上升速度自 2015 年后有所下降。除规模效率指数外,其余效率指数多数均大于 1,且技术进步指数与 Malmquist 指数变化趋势基本相同,表明技术进步指数和综合技术效率指数中的纯技术效率指数都是影响水资源利用效率的关键因素,规模效率指数只在个别年份起着推动作用。

分解长江流域 11 省区 Malmquist 指数,并计算其均值,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出各省区效率值均值均大于 1,说明长江流域综合技术效率指数和技术进步指数均呈上升趋势,且纯技术效率指数均值略高于规模效率指数均值,表明长江流域的用水方式总体上处于由粗放型向节约型转变的阶段。

为进一步挖掘长江流域各省区水资源利用效率提升速度的差异及原因,基于 WARD 系统聚类法,采用 SPSS 软件对各省区的 Malmquist 指数、综合技术效率指数、纯技术效率指数、规模效率指数及技术进步指数进行聚类,如图 5 所示。系谱图横轴表示各类别的相对距离,是按比例重新设定的结果,可以表示不同类别之间距离的变化,而纵轴的数值表示对应于相对距离的类别个数。3 类地区 2013—2019 年平均 Malmquist 指数及分解如图 6 所示。

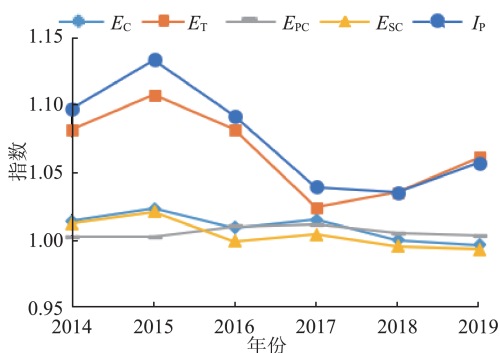


图3 水资源利用效率 Malmquist 指数及分解

Fig.3 Malmquist index of water resources utilization efficiency and its decomposition

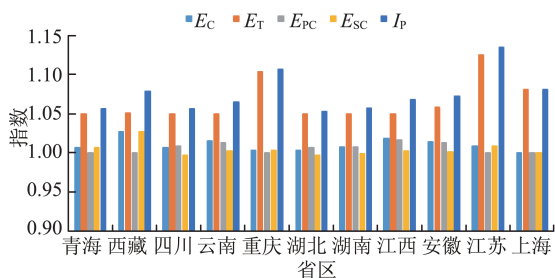


图4 11 省区多年平均 Malmquist 指数及其分解

Fig.4 Annual average Malmquist index and its decomposition in 11 provinces

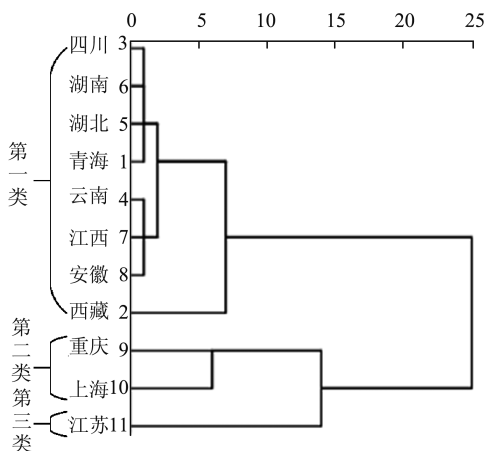


图5 水资源利用效率系谱

Fig.5 Genealogy of water resources utilization efficiency

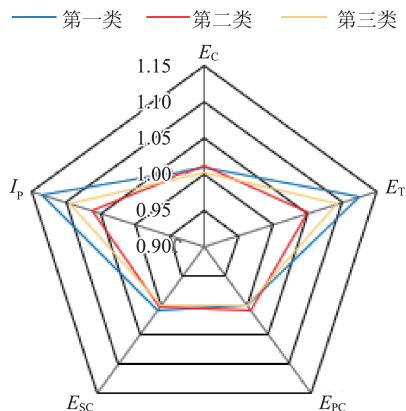


图6 3 类地区 2013—2019 年平均 Malmquist 指数及分解

Fig.6 Average Malmquist index and its decomposition for three types of regions from 2013 to 2019

a. 第一类地区受综合技术效率指数和技术进步指数的共同作用,第二类地区主要依靠综合技术效率指数的提高来提升水资源利用效率,第三类地区水资源利用效率则完全来自技术进步指数的推动。3 类地区技术进步指数差距较大,这也是导致 Malmquist 指数存在差距的主要原因。

b. 综合技术效率指数是提升水资源利用效率的关键因素,3 类地区的 E_C 、 E_{PC} 、 E_{SC} 差距不大,表明长江流域地区在产业布局 and 资源配置上比较相似。但 3 类地区的 E_C 、 E_{PC} 、 E_{SC} 指数值普遍较低,反映出需要通过提高资源配置合理性、优化产业规模,从而提高水资源利用效率。

c. 长江流域各省区要坚持以发展技术为主线,加强先进技术与管理水平有机结合。各省区要加强对自身薄弱环节的建设,对于第一、三类 E_T 相对较高的地区,可以优化产业规模、提升管理水平,同时制定水资源保护目标,通过提高污水处理和水资源再利用能力来研究节水潜力,并增加环保宣传,促进节水社会的发展。对于第二类地区,可以在加强知识积累、学习先进的管理技术和方法的同时,建立水资源评估体系,高效利用水资源。

4 结 论

a. 长江流域 11 省区水资源利用效率总体呈增加趋势,2014—2015 年涨幅较大,但除上海、江苏外其他省区水资源利用效率还处于较低水平,各省区存在明显的地域差异。

b. 长江流域水资源利用效率的空间格局基本稳定,呈现以东西方向为主导的空间分布态势,东部地区水资源利用效率相对较高。2013—2019 年水资源利用效率重心和 SDE 均向西部有所偏移,表明东西部地区水资源利用效率的差距在逐渐缩小。

c. Malmquist 指数与技术进步指数的变化趋势基本一致,技术进步指数是推动长江流域 11 省区水资源利用效率提升的主导因素,也是导致各省区水资源效率差异的主要原因,综合技术效率指数则是制约水资源利用效率提升的关键因素。

d. 3 类地区技术进步指数和 Malmquist 指数差距较大,综合技术效率指数普遍变化不大。长江流域水资源利用效率差距较大的原因主要是各省区在经济发展和先进技术上的差异。

参考文献:

- [1] 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. (YANG Gaosheng, XIE

- Qiu hao. Research on the spatial and temporal differentiation of green water resources efficiency in the Yangtze River economic zone based on SE-SBM and ML index method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2): 349-358. (in Chinese))
- [2] PAN Z, WANG Y, ZHOU Y, et al. Analysis of the water use efficiency using super-efficiency data envelopment analysis [J]. Applied Water Science, 2020, 10(6): 1223-1224.
- [3] 任玉芬, 方文颖, 王雅晴, 等. 我国城市水资源利用效率分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1507-1516. (REN Yufen, FANG Wenying, WANG Yaqing, et al. Analysis on the utilization efficiency of urban water resources in my country [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(4): 1507-1516. (in Chinese))
- [4] CHEBIL A, OULMANE A, FRIJA A. The water use efficiency and its determinants in small horticultural farms in Algeria [J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(10): 1236-1237.
- [5] 杨丽英, 许新宜, 贾香香. 水资源效率评价指标体系探讨[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(增刊1): 642-646. (YANG Liying, XU Xinyi, JIA Xiangxiang. Discussion on the evaluation index system of water resources efficiency [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition), 2009, 45(Sup1): 642-646. (in Chinese))
- [6] 管新建, 梁胜行. 基于熵权模型的黄河流域水资源利用效率综合评价[J]. 中国农村水利水电, 2016, 409(11): 82-85. (GUAN Xinjian, LIANG Shengxing. Comprehensive evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin based on entropy weight model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016, 409(11): 82-85. (in Chinese))
- [7] 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 Caizhi, MA Qifei, ZHAO Liangshi. The driving mechanism of China's water resources green efficiency based on GWR model [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1022-1035. (in Chinese))
- [8] 董战峰, 喻恩源, 裘浪, 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, 258(10): 43-47. (DONG Zhanfeng, YU Enyuan, QIU Lang, et al. Evaluation of water resources efficiency in China's provincial regions based on DEA model [J]. Ecological Economy, 2012, 258(10): 43-47. (in Chinese))
- [9] 高新才, 殷颂葵. 西北地区城市水资源利用效率时空演变及俱乐部趋同分析[J]. 经济经纬, 2021, 38(2): 1-11. (GAO Xincan, YIN Songkui. Analysis on the spatio-temporal evolution and club convergence of urban water resources utilization efficiency in Northwest China [J]. Economic Survey, 2021, 38(2): 1-11. (in Chinese))
- [10] 杨骞, 刘华军. 污染排放约束下中国农业水资源效率的区域差异与影响因素[J]. 数量经济技术经济研究, 2015(1): 114-128. (YANG Qian, LIU Huajun. Regional disparity and influencing factors of agricultural water resources efficiency with the constraint of pollution [J]. Quantitative & Technical Economics, 2015(1): 114-128. (in Chinese))
- [11] 钱文婧, 贺灿飞. 中国水资源利用效率区域差异及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(2): 54-60. (QIAN Wenjing, HE Canfei. China's regional difference of water re-source use efficiency and influencing factors [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(2): 54-60. (in Chinese))
- [12] 任俊霖, 李浩, 伍新木, 等. 长江经济带省会城市用水效率分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 101-107. (REN Junlin, LI Hao, WU Xinmu, et al. Water efficiency analysis of capital cities in the Yangtze River Economic Belt [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(5): 101-107. (in Chinese))
- [13] 左其亭, 张志卓, 姜龙, 等. 全面建设小康社会进程中黄河流域水资源利用效率时空演变分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 16-25. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, JIANG Long, et al. Analysis on the spatio-temporal evolution of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin in the process of building a well-off society in an all-round way [J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2020, 51(12): 16-25. (in Chinese))
- [14] 单豪杰. 中国资本存量 K 的再估算: 1952—2006 年 [J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(10): 17-31. (SHAN Haojie. Re-estimation of China's capital stock K: 1952-2006 [J]. Quantitative Economics and Technical Economics, 2008, 25(10): 17-31. (in Chinese))
- [15] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [16] ANDERSEN P, PETERSEN N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis [J]. Management Science, 1993, 39(10): 1261-1264.
- [17] 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 Le, YANG Faxuan, QIAN Hui, et al. Research on the utilization efficiency of industrial water resources in Ningxia based on the super-efficiency DEA model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(2): 81-86. (in Chinese))

(下转第 94 页)

- Biogeosciences,2018,123(1):207-225.
- [53] CHEN J M, LIU J. Evolution of evapotranspiration models using thermal and shortwave remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment,2020,237:111594.
- [54] MIERNECKI M, WIGNERON J P, LOPEZ-BAEZA E, et al. Comparison of SMOS and SMAP soil moisture retrieval approaches using tower-based radiometer data over a vineyard field[J]. Remote Sensing of Environment,2014,154:89-101.
- [55] 刘堃,何祺胜,荆琛琳,等. 基于机器学习的蒸散量插补方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):109-115. (LIU Kun, HE Qisheng, JING Chenlin, et al. Gap filling method for evapotranspiration based on machine learning [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (2): 109-115. (in Chinese))
- [56] CHEN H, HUANG J J, MCBEAN E. Partitioning of daily evapotranspiration using a modified Shuttleworth-Wallace model, random forest and support vector regression, for a cabbage farmland [J]. Agricultural Water Management, 2019,228:105923.
- [57] MAZROOEI A, REITZ M, WANG D B, et al. Urbanization impacts on evapotranspiration across various spatio-temporal scales [J]. Earth's Future,2021,9(8):1-15.
- [58] SV A, FM B, ADRA, et al. Modeling urban evapotranspiration using remote sensing, flux footprints, and artificial intelligence [J]. Science of the Total Environment,2021,786:147293.
- [59] CHEN H, HUANG J J, SONAM S D, et al. Development of a three-source remote sensing model for estimation of urban evapotranspiration [J]. Advances in Water Resources,2022,161:104126.
- [60] CHEN H, HUANG J J, SONAM S D, et al. Assessing the impact of urbanization on urban evapotranspiration and its components using a novel four-source energy balance model [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 316:108853.

(收稿日期:2021-01-04 编辑:施业)

(上接第 86 页)

- [18] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020,36(2):1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in the Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection,2020,36(2):1-7. (in Chinese))
- [19] 余华茂. 基于 Windows DEA 模型的我国自然灾害应急公共投入绩效研究[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(7):39-45. (YU Huamao. Research on my country's natural disaster emergency public investment performance based on Windows DEA model [J]. China Work Safety Science and Technology, 2019, 15 (7): 39-45. (in Chinese))
- [20] 马赛,封学军,蒋柳鹏,等. 基于 DEA-Malmquist 的沿海港口转型升级测度及趋势研究[J]. 水利经济,2021,39(1):20-24. (MA Sai, FENG Xuejun, JIANG Liupeng, et al. Measurement and trend of transformation and upgradation of coastal ports based on DEA-Malmquist productivity index [J]. Journal of Economics of Water Resources,2021,39(1):20-24. (in Chinese))
- [21] 戢晓峰,王然,陈方,等. 中国城市物流蔓延的时空演化特征:基于 329 个城市的物流用地面板数据[J]. 地理科学,2021,41(2):215-222. (JI Xiaofeng, WANG Ran, CHEN Fang, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of urban logistics spread based on the logistics land of panel data of 329 cities in China [J]. Geographical Science, 2021, 41 (2): 215-222. (in Chinese))
- [22] FARE R, GROSSKOPF S. A nonparametric cost approach to scale efficiency [J]. Scandinavian Journal of Economics,1994,87(4):594-604.
- [23] 胡妍,李巍. 区域用水环境经济综合效率及其影响因素:基于 DEA 和 Malmquist 指数模型[J]. 中国环境科学,2016,36(4):1275-1280. (HU Yan, LI Wei. Comprehensive economic efficiency of regional water environment and its influencing factors based on DEA and Malmquist index model [J]. China Environmental Science,2016,36(4):1275-1280. (in Chinese))
- [24] 田泽,潘晶晶,任芳容. 基于 DEA 的长江经济带省际水电能源效率评价及提升方向[J]. 水利经济,2020,38(4):1-7. (TIAN Ze, PAN Jingjing, REN Fangrong. Evaluation and improvement direction of inter-provincial hydropower energy efficiency in Yangtze River Economic Belt based on DEA [J]. Journal of Economics of Water Resources,2020,38(4):1-7. (in Chinese))
- [25] 陈威,杜娟,常建军. 武汉城市群水资源利用效率测度研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(6):1251-1258. (CHEN Wei, DU Juan, CHANG Jianjun. Research on water resources utilization efficiency measurement of Wuhan urban agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27 (6): 1251-1258. (in Chinese))

(收稿日期:2021-05-25 编辑:施业)