

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.006

黄河流域水资源利用效率测度与评价

张永凯¹, 孙雪梅²

(1. 兰州财经大学农林经济管理学院, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州财经大学经济学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:通过采用数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)和 Malmquist 指数,对黄河流域 68 个地级行政单元的水资源利用效率进行测算。结果表明:2017 年黄河流域水资源利用效率达到 DEA 有效的地级行政单元有 26 个、非 DEA 有效的地级行政单元有 42 个;通过对 42 个非 DEA 有效行政单元的投入冗余测算,发现由于规模效率不高造成的有 27 个、技术效率低下造成的有 15 个。2009—2017 年,黄河流域水资源利用效率呈现先上升、后下降、波动大的特点,水资源利用效率整体有所提升,且技术水平是影响其关键因素。从流域来看,2009—2017 年黄河流域水资源全要素生产率(total factor productivity, TFP)指数的综合平均值为 0.957;其中,下游地区的水资源利用效率最高,TFP 指数为 0.977;上游和中游地区次之,TFP 指数分别为 0.958 和 0.948。

关键词:水资源利用效率;数据包络分析;Malmquist 指数;全要素生产率;黄河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0037-07

Measurement and evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin//ZHANG Yongkai¹, SUN Xuemei² (1. College of Agriculture and Forestry and Management, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China; 2. College of Economics, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China)

Abstract: By using data envelopment analysis and Malmquist index, the water resources utilization efficiency of 68 administrative units in the Yellow River Basin was calculated. The results show that in 2017, there were 26 prefecture level administrative units with DEA efficiency and 42 prefecture level administrative units without DEA efficiency in the Yellow River Basin. By calculating the input redundancy of 42 administrative units without DEA efficiency, it is found that there are 27 due to low scale efficiency and 15 due to low technical efficiency. From 2009 to 2017, the utilization efficiency of water resources in the Yellow River Basin presents the characteristics of first rising, then falling, and big fluctuation. The overall utilization efficiency of water resources has been improved, and the technical level is the key factor. From the perspective of basin, the comprehensive average value of TFP index of water resources in the Yellow River Basin from 2009 to 2017 is 0.957. Among them, the downstream has the highest water resources utilization efficiency, with TFP index of 0.977, and the upper and middle reaches are next, with TFP index of 0.958 and 0.948, respectively.

Key words: water resources utilization efficiency; data envelopment analysis; Malmquist index; total factor productivity; Yellow River Basin

黄河流域作为我国生态安全屏障、能源化工基地和重要经济地带,在国家生态环境建设和经济社会发展中具有举足轻重的地位^[1]。随着黄河流域生态保护和高质量发展上升成为国家战略,该流域迎来了千载难逢的历史机遇,国家将在该地区部署一系列重大项目,推动生态环境建设和高质量发展。然而,黄河流域生态环境极其脆弱,水资源严重短

缺,水土流失严重,自然灾害频发,加之贫困人口分布集中,经济社会发展相对滞后,扶贫攻坚任务十分艰巨,给该流域可持续发展提出了严峻挑战。制约黄河流域发展的一个关键性问题就是“水”,水资源合理利用是黄河流域高质量发展的核心。因此,黄河流域经济高质量发展需要水资源作为强有力的保障,并根据区域人口承载力和生态环境容量,合理利

基金项目:国家社会科学基金(15BGL208);兰州财经大学科研创新团队支持计划

作者简介:张永凯(1974—),男,教授,博士,主要从事资源利用与区域发展研究。E-mail: Yongkai197497@163.com.

通信作者:孙雪梅(1997—),硕士研究生,研究方向为资源利用与区域发展。E-mail: 949506143@qq.com

用有限的水资源,坚持“以水而定、量水而行”的基本原则,充分发挥水资源对黄河流域经济社会可持续发展的有效支撑作用。

目前,我国关于水资源利用效率问题的研究较多,其研究尺度却不尽相同。高媛媛等^[2-3] 对全国 31 个省(市、区)的水资源利用效率进行了测算,均认为北京、天津、山西用水效率高,宁夏、广西用水效率低;张坤等^[4] 通过测算长江经济带 11 个省(市、区)的水资源利用效率,认为技术发展是其主要制约因素;郑乐等^[5] 对宁夏 5 市工业用水进行测算后,对其所处现状分别做出解释;任玉芬等^[6] 通过对全国 283 个城市的水资源利用效率进行分析,发现全国 62.2% 的城市水资源利用效率变化趋势不明显。20 世纪 70 年代末,国内学者陆续开始关注黄河流域水资源利用问题。刘善建^[7] 认为,我国的水资源利用水平落后于发达国家,应对水资源的开发利用做好规划;张晓涛等^[8] 利用基尼系数分析黄河流域的经济发展与水资源匹配关系,发现经济发展水平与水资源利用量之间匹配较为合理,但水资源与生产要素之间的匹配状况具有显著差异;王猛飞等^[9] 利用同样方法,发现基尼系数有缓慢减少的趋势,说明黄河流域的水资源在区域间的合理配置起到良好效果;张慧等^[10] 利用熵权法测算黄河流域的农业水资源利用效率,结果发现利用效率低下;周帅等^[11] 运用 Mann-Kendal 与重标极差耦合的方法预测了黄河流域未来的水资源时空变化;左其亭等^[12] 针对黄河流域九省区构建了涵盖水资源、生态环境、经济社会 3 个准则层的评价指标体系,采用层次分析法和熵权法组合赋权的 TOPSIS 模型对九省区 2002 年、2007 年、2012 年、2017 年的水资源承载力进行了综合评价。

然而,对黄河流域水资源利用效率的研究相对较少,且侧重于农业水资源利用效率,从微观尺度上考察整个流域水资源利用效率的研究成果不足。鉴于此,在已有研究基础上,本文基于地级行政单元的空间尺度,运用数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)和 Malmquist 指数,测算黄河流域水资源利用效率,旨在为该区域人口、资源与环境经济协调发展提供思路和借鉴。

1 研究区概况

黄河是我国的第二大河,发源于青藏高原的约古宗列盆地,最后注入渤海,干流河道全长 5 464 km,自西向东分别流经我国青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东 9 个省区,整个流域面积约为 752 443 km² (图 1)。本研究以黄河流域 9 省区

中的 68 个地级行政单元(地级市、州、盟)为研究对象。

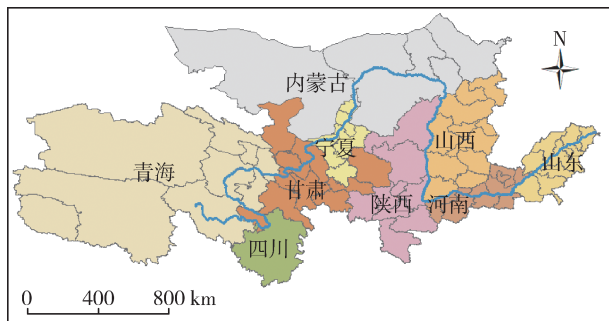


图 1 黄河流域概况

Fig. 1 Overview of the Yellow River Basin

一般而言,黄河以内蒙古呼和浩特河口镇与河南洛阳孟津县为节点划分上、中、下游,由于本研究以地级市为空间尺度进行分析,所以按上述地级行政单元所属节点分别表述上、中、下游地区。黄河流域作为中华文明的重要发祥地,经济发展早期主要以农业为主,上游河套平原、中游汾渭盆地以及下游引黄灌区都是其主要的农业生产基地。工业方面虽然起步较晚,但该流域拥有丰富的自然资源,为工业发展提供了良好的条件,是我国重要的能源化工基地。由于黄河地理位置的特殊性,黄河流域呈现“水少沙多、水沙异源”的特征,水量主要来自兰州以上、秦岭北麓,泥沙主要来自河口镇至龙门区间与泾河、北洛河及渭河上游地区^[13]。随着区域经济的发展,工农业生产对水资源的需求不断增大,加之水资源的时空分布不均,导致水资源短缺成为黄河流域经济发展的重要瓶颈。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

选取 2009—2017 年黄河流域 68 个地级行政单元(市、自治州、盟)的相关统计数据,其中,固定资产投资额、农业用水、工业用水、生活用水、人口为投入指标;GDP、工业生产总产值、农业生产总产值为产出指标。劳动力本应采用就业人数,但鉴于数据缺失,因此用人口数乘以 0.64 (该标准参照 2019 年国家统计局劳动力人口计算)的指标替代。投入、产出指标数据均来自各省、市、自治州和盟的统计年鉴与水资源公报。鉴于数据可得性,各省份的统计口径不一致,部分数据通过间接测算和取中值的方式加以处理。

2.2 研究方法

2.2.1 DEA

DEA 是以相对效率概念为基础,运用线性规划方法度量生产单元相对效率的数学过程。可根据多

指标的投入(输入)与产出(输出)对同一类型的部门或单位(称为决策单元,DMU)进行相对有效性或效益评价^[14]。DEA 包含 C2R、BC2、FG、ST 等多种模型,BC2 在 C2R 的基础上增加了 $\sum_{r=1}^n \lambda_r = 1$ 的限制, λ_r 为整体技术效率,从而能将技术效率分解为纯技术效率和规模效率,因此当分析某个 DMU 整体效率无效时,可以明确这种低效率是由纯技术因素还是规模因素导致的^[15]。本文为明确不同地区水资源利用效率低下的原因,采用了 BC2 模型。根据上述分析,对第 r 个 DMU 进行效率评价,以第 r 个 DMU 的效率指数为目标,以所有的 DMU(也包括第 r 个 DMU)的效率指数为约束,需满足:

$$\begin{aligned} & \min \theta \\ & \text{s. t. } \begin{cases} \sum_{r=1}^n \lambda_r X_{ri} \leq \theta X_{wi} \\ \sum_{r=1}^n u \lambda_r Y_{rj} \geq \theta Y_{wj} \\ \lambda_r \geq 0 \\ \theta \text{ 无约束} \end{cases} \quad (1) \end{aligned}$$

式中: n 为所在子集 DMU 个数; X_{ri} 为第 r 个 DMU 中第 i 种要素的投入量; Y_{rj} 为第 r 个 DMU 中第 j 种要素的产出量; θ 为 DMU 的效率值。当增加限制 $\sum_{r=1}^n \lambda_r = 1$ 时,即为 BC2 模型,则产出可能存在规模报酬递增、不变或递减。若 $\sum_{r=1}^n \lambda_r = 1$,则称这个 DMU 为规模效益不变;若 $\sum_{r=1}^n \lambda_r < 1$,则称这个 DMU 为规模效益递减;若 $\sum_{r=1}^n \lambda_r > 1$,则称这个 DMU 为规模效益递增。 $\theta < 1$ 时,则称这个 DMU 为非 DEA 有效; $\theta = 1$ 时,则称这个 DMU 为 DEA 有效。

2.2.2 Malmquist 指数

在 DEA 的实证研究中,为了反映不同时期生产单元的效率演化,使用最广泛的生产效率指数为 Malmquist 指数。当 $D_t(x_{0t}, y_{0t}) = 1$ 时,表示 (x_{0t}, y_{0t}) 在生产前沿面上,当 $D_t(x_{0t}, y_{0t}) > 1$ 时,表示 (x_{0t}, y_{0t}) 处于技术无效。效率值可以通过 Malmquist 指数来表示: $M_t = \frac{D_t(x_{0t}, y_{0t})}{D_{t+1}(x_{0t+1}, y_{0t+1})}$ 即 t 期的 Malmquist 指数。通过计算 t 期和 $t+1$ 期的 Malmquist 指数的几何平均数 I_M 可得到生产率的变化,即 $I_M = C_E C_T$, C_E 为技术效率, C_T 为技术进步率,技术效率可进一步分解为纯技术效率指数和规模效率指数。

3 结果与分析

3.1 黄河流域水资源利用效率现状分析

采用 DEAP2.1 软件测算 2017 年黄河流域 68 个地级行政单元水资源配置效率(表 1),可见 2017 年黄河流域的水资源利用效率整体水平不高,综合效率平均值仅为 0.834,各区域的水资源综合利用效率依次为上游(0.808)、中游(0.851)、下游(0.856),上游地区低于全国平均水平,青海省海东的水资源综合效率值最低,为 0.408。综合效率值达到 DEA 有效的地区有 26 个,即投入产出都达到了最优状态,主要集中于中部和沿海地区,流经内蒙古境内的地级行政单元均为 DEA 有效。综合效率的高低受技术因素和规模因素共同的影响,为便于了解不同影响因素的空间差异,分别从技术效率与规模效率角度进行分析。

从技术效率角度看,黄河流域平均值为 0.867,高于综合效率,有 13.3% 的提升空间。其中,有 35 个地级行政单元实现技术有效,即水资源之间的组合达到了最优。除去综合效率值达到 DEA 有效的决策单元外,海南州、西安、铜川、晋城、运城、洛阳、济宁、泰安、菏泽也实现了技术有效,这些城市主要位于中、下游地区。通过对黄河流域的上、中、下游进行比较发现,下游地区(0.894)技术效率最高,中游地区(0.888)和上游地区(0.833)次之。从规模效率角度看,除去综合效率值达到 DEA 有效的决策单元外,大同和晋中的规模效率也保持不变,处于最优状态。黄河流域的规模效率整体高于 0.7,平均值为 0.963,其中上游地区的规模效率最高,为 0.968;其次为中游地区,为 0.961;最后为下游地区,为 0.959。在未实现规模有效的 40 个决策单元中,有 18 个决策单元规模效率递减,表示投入过多,有必要减少投入来提高规模效率;有 22 个决策单元规模效率递增,表示它们可以通过扩大生产规模、增加产出来进一步提高规模效率。

由此可见,黄河流域的技术效率与规模效率有明显的空间差异。从表 1 看,上、中、下游的规模效率平均值均大于技术效率。通过纵向比较,上游地区规模效率高,技术效率低;下游地区技术效率高,规模效率低;中游地区的技术效率与规模效率均处于中等水平。这主要是由于下游地区经济发展水平高于上、中游地区,技术设备相对先进,技术效率较高,但随着下游地区生产规模不断扩大,生产的各个方面难以得到有效协调,从而降低了规模效率。

表 1 2017 年黄河流域 68 个地级行政单元水资源配置效率

Table 1 Water resources allocation efficiency of 68 prefecture-level administrative units in the Yellow River Basin in 2017

区域	决策单元	综合效率	技术效率	规模效率	规模效率变化	结果	区域	决策单元	综合效率	技术效率	规模效率	规模效率变化	结果
上游	西宁	0.523	0.550	0.951	递增	非 DEA 有效	中游	延安	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	海东	0.408	0.428	0.954	递增	非 DEA 有效		商洛	0.814	0.827	0.984	递减	非 DEA 有效
	海北	0.844	0.988	0.855	递增	非 DEA 有效		杨凌	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	黄南	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		大同	0.628	0.628	1.000	不变	非 DEA 有效
	海南	0.962	1.000	0.962	递减	非 DEA 有效		长治	0.851	0.856	0.994	递减	非 DEA 有效
	果洛	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		太原	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	海西	0.652	0.901	0.723	递增	非 DEA 有效		阳泉	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	玉树	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		晋中	0.676	0.676	1.000	不变	非 DEA 有效
	阿坝	0.753	0.820	0.919	递增	非 DEA 有效		晋城	0.991	1.000	0.991	递减	非 DEA 有效
	兰州	0.747	0.756	0.988	递增	非 DEA 有效		朔州	0.822	0.839	0.981	递增	非 DEA 有效
	白银	0.703	0.714	0.984	递增	非 DEA 有效		运城	0.753	1.000	0.753	递减	非 DEA 有效
	天水	0.698	0.720	0.969	递减	非 DEA 有效		忻州	0.603	0.610	0.988	递增	非 DEA 有效
	武威	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		临汾	0.641	0.664	0.966	递减	非 DEA 有效
	平凉	0.832	0.840	0.990	递减	非 DEA 有效		吕梁	0.831	0.856	0.971	递增	非 DEA 有效
	庆阳	0.807	0.808	0.999	递增	非 DEA 有效		洛阳	0.784	1.000	0.784	递减	非 DEA 有效
	定西	0.579	0.581	0.996	递减	非 DEA 有效		三门峡	0.959	0.961	0.998	递增	非 DEA 有效
	临夏	0.459	0.465	0.987	递增	非 DEA 有效	平均值			0.851	0.888	0.961	
	甘南	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效	下游	郑州	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	银川	0.485	0.494	0.983	递增	非 DEA 有效		安阳	0.631	0.650	0.971	递减	非 DEA 有效
中游	石嘴山	0.495	0.561	0.882	递增	非 DEA 有效		开封	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	吴忠	0.673	0.698	0.964	递增	非 DEA 有效		新乡	0.570	0.594	0.959	递减	非 DEA 有效
	固原	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		焦作	0.586	0.588	0.996	递增	非 DEA 有效
	呼和浩特	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		濮阳	0.682	0.686	0.994	递增	非 DEA 有效
	包头	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		济源	0.757	0.856	0.884	递增	非 DEA 有效
	鄂尔多斯	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		济南	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	巴彦淖尔	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		淄博	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	乌海	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		东营	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	阿拉善	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		济宁	0.976	1.000	0.976	递减	非 DEA 有效
	平均值	0.808	0.833	0.968				泰安	0.904	1.000	0.904	递减	非 DEA 有效
	乌兰察布	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		莱芜	0.908	0.963	0.943	递增	非 DEA 有效
	西安	0.979	1.000	0.979	递减	非 DEA 有效		德州	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	铜川	0.828	1.000	0.828	递增	非 DEA 有效		聊城	0.835	0.855	0.976	递减	非 DEA 有效
	宝鸡	0.777	0.869	0.894	递减	非 DEA 有效		滨州	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效
	榆林	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效		菏泽	0.708	1.000	0.708	递减	非 DEA 有效
	安康	0.631	0.638	0.989	递增	非 DEA 有效	平均值			0.856	0.894	0.959	
	咸阳	1.000	1.000	1.000	不变	DEA 有效	综合平均值			0.834	0.867	0.963	

根据上述 DEA 有效性分析,对 42 个非 DEA 有效地区采取生产前沿面投影分析方法,从投入角度剖析非 DEA 有效地区未能达到 DEA 有效的原因。从投入角度看(表 2),西宁、海东、阿坝、天水、定西、临夏、吴忠、安康、大同、晋中、忻州、临汾、安阳、新乡、濮阳、晋中存在投入冗余,主要集中在上、中游地区。要素的投入冗余率反映资源利用程度,投入冗余率为 0,表示资源配置有效,资源得到充分利用;投入冗余率越大,表明资源利用效率越低,浪费越多。

在农业用水方面,共有 14 个地区的农业水资源利用效率低,其中吴忠的投入冗余率为 443.48%,说明这个地区在农业用水的过程中存在非常严重的浪费现象,需要加强对资源的整合来优化水资源利

用效率;在工业用水方面,共有 15 个地区的利用效率低,濮阳的投入冗余率最高,为 113.39%;在生活用水方面,共有 15 个地区的生活水资源利用效率低,其中阿坝(198.32%)、吴忠(97.80%)、安阳(244.76%)、新乡(157.61%)的冗余率均超过了 90%。由此可见,要素投入冗余大都集中在上述地区,提高水资源要素的利用效率,降低水资源浪费是解决问题的主要手段。42 个非 DEA 有效地区中有 27 个地区投入冗余率为 0,说明决策单元未达到 DEA 有效的原因是规模效率小于 1,因此,提高规模效率是实现 DEA 有效的关键。

3.2 基于 Malmquist 指数的黄河流域水资源利用效率变化分析

为了从更长时间序列考察黄河流域水资源利用

表2 非 DEA 有效地区投入角度的投影分析

Table 2 Projection analysis of input angle in areas without DEA efficiency

区域	地区	投入冗余率/%		
		农业用水	工业用水	生活用水
上游	西宁	12.34	12.34	12.33
	海南	0.00	0.00	0.00
	海东	58.71	58.93	58.87
	海西	0.00	0.00	0.00
	海北	0.00	0.00	0.00
	阿坝	1.14	1.32	198.32
	兰州	0.00	0.00	0.00
	白银	0.00	0.00	0.00
	天水	15.24	14.24	43.14
	平凉	0.00	0.00	0.00
	庆阳	0.00	0.00	0.00
	定西	22.97	69.52	40.17
	临夏	40.33	15.30	53.59
	银川	0.00	0.00	0.00
	石嘴山	0.00	0.00	0.00
中游	吴忠	433.48	58.08	97.80
	西安	0.00	0.00	0.00
	铜川	0.00	0.00	0.00
	安康	35.31	35.44	76.65
	大同	21.05	21.05	40.81
	晋中	8.25	16.97	26.45
	宝鸡	0.00	0.00	0.00
	商洛	0.00	0.00	0.00
	忻州	24.46	24.55	24.54
	长治	0.00	0.00	0.00
	晋城	0.00	0.00	0.00
	临汾	3.71	3.75	36.51
	朔州	0.00	0.00	0.00
	运城	0.00	0.00	0.00
	安阳	38.54	35.64	244.76
下游	吕梁	0.00	0.00	0.00
	洛阳	0.00	0.00	0.00
	三门峡	0.00	0.00	0.00
	新乡	74.61	58.25	157.61
	焦作	0.00	0.00	0.00
	濮阳	0.00	113.39	84.26
	济源	0.00	0.00	0.00
	济宁	0.00	0.00	0.00
	泰安	0.00	0.00	0.00
	莱芜	0.00	0.00	0.00
	聊城	0.00	0.00	0.00
	菏泽	0.00	0.00	0.00

效率的变化情况,在水资源利用现状的基础上,运用 DEAP2.1 软件,对 2009—2017 年黄河流域 68 个地级行政单元的面板数据进行 Malmquist 指数分析,测算出 68 个地级行政单元分年和分地区的全要素生产率(total factor productivity, TFP)指数,从而分析黄河流域水资源利用的年际变化情况。由表 3 可知,在 2009—2017 年,黄河流域水资源利用效率的总体平均水平为 0.957,整个过程呈波动式变化,仅在 2011—2013 年出现上升,2012—2013 年利用效

率达到最高,TFP 为 1.146。从技术进步率的角度看,2009—2017 年平均每年进步 2.225%,波动趋势与 TFP 相似。其中,2009—2010 年水资源利用效率最低,TFP 为 0.831,只有技术进步率是负增长,小于 1;2012—2013 年技术进步率最高,为 1.133,同期水资源利用效率也达到最高。由此可知,技术进步率的高低对 TFP 的影响较大。从技术效率的角度看,总体呈下降趋势:先是在 2010—2012 年呈现递减趋势后呈小幅上升趋势,又在 2014—2016 年呈现递减趋势,最后在 2016—2017 年达到 1.011,较低于 2009—2010 年。由于技术效率可进一步分解为纯技术效率指数和规模效率指数,所以其增减情况与技术效率类似。技术效率的高低决定了各生产要素能否被充分利用,技术效率的提高并未明显带动 TFP 的增长,其对 TFP 的影响较小,可见 TFP 的提高主要依赖于技术进步,技术进步是提高黄河流域水资源利用效率的关键因素。

表3 2009—2017 年黄河流域 TFP 指数及分解

Table 3 TFP index and its decomposition in the Yellow River Basin from 2009 to 2017

时间段	技术效率	技术进步率	纯技术效率	规模效率	TFP
2009—2010 年	1.062	0.783	1.055	1.007	0.831
2010—2011 年	0.995	0.997	1.003	0.992	0.992
2011—2012 年	0.979	1.033	0.974	1.005	1.012
2012—2013 年	1.012	1.133	1.002	1.010	1.146
2013—2014 年	1.013	0.896	1.011	1.002	0.908
2014—2015 年	1.001	0.974	1.002	0.999	0.976
2015—2016 年	0.974	0.879	0.974	1.000	0.856
2016—2017 年	1.011	0.961	1.021	0.990	0.971
平均值	1.006	0.952	1.005	1.001	0.957

表 4 为 2009—2017 年黄河流域 68 个地级行政单元水资源 TFP 指数及分解结果,可见,在 2009—2017 年,我国黄河流域流经的 68 个地级行政单元中有 50 个地区水资源利用效率为负增长率。因此,受大部分地区的影响,黄河流域水资源的 TFP 为 0.957,增长率为负。黄河流域水资源在上、中、下游的 TFP 均小于 1,呈衰退趋势,主要是因为我国水资源本身存在利用率低、浪费严重等问题。通过对比上、中、下游 TFP 可知,下游地区的水资源利用效率高于上、中游地区,也高于黄河流域的平均水平,中游地区水资源利用效率最低,存在较大提升空间。上游地区的水资源利用效率平均每年降低 0.47%,上游地区地处我国中西部,经济发展水平不高,技术进步率较低,再加之规模效率为负增长,水资源利用与配置之间的协调度还需进一步提高^[16]。中游地区地处汾渭平原,水土流失严重,汾河、渭河、涑水河、清涧河存在持续重度污染,提高技术水平,改善水质是解决水资源利用效率低下的关键。其中,阿

表4 黄河流域 68 个地级行政单元水资源 TFP 指数及分解

Table 4 TFP index and its decomposition of 68 prefecture-level administrative units in the Yellow River Basin

区域	决策单元	技术效率	技术进步率	纯技术效率	规模效率	TFP	区域	决策单元	技术效率	技术进步率	纯技术效率	规模效率	TFP
上游	西宁	1.060	0.981	1.055	1.005	1.040	中游	延安	1.000	0.967	1.000	1.000	0.967
	海东	1.101	0.995	1.097	1.004	1.096		商洛	0.986	0.963	1.024	0.963	0.950
	海北	0.996	0.968	0.993	1.003	0.965		杨凌	1.000	0.899	1.000	1.000	0.899
	黄南	1.000	0.985	1.000	1.000	0.985		大同	0.990	0.984	0.990	1.000	0.975
	海南	0.984	0.981	0.977	1.007	0.966		太原	1.000	0.926	1.000	1.000	0.926
	果洛	0.950	1.003	1.000	0.950	0.952		长治	1.001	0.975	1.003	0.998	0.977
	海西	1.055	0.996	1.012	1.042	1.051		阳泉	1.000	0.932	1.000	1.000	0.932
	玉树	1.000	0.989	1.000	1.000	0.989		晋中	1.006	0.929	1.006	1.000	0.935
	阿坝	0.992	0.928	0.985	1.007	0.921		晋城	1.001	0.964	1.000	1.001	0.965
	兰州	1.001	0.990	1.000	1.001	0.991		朔州	1.016	0.930	1.015	1.001	0.945
	白银	1.045	1.107	1.044	1.001	1.157		运城	1.002	0.893	0.978	1.024	0.894
	天水	0.997	1.011	1.000	0.997	1.008		忻州	0.997	0.944	1.002	0.995	0.941
	武威	0.969	0.975	0.979	0.990	0.945		临汾	1.026	0.978	1.021	1.005	1.003
	平凉	0.961	0.995	0.977	0.983	0.956		吕梁	0.986	1.009	0.982	1.004	0.994
	庆阳	1.010	0.948	1.020	0.990	0.958		洛阳	1.030	0.975	1.000	1.030	1.004
	定西	0.997	1.017	0.996	1.001	1.014		三门峡	1.002	0.975	1.003	0.999	0.977
	临夏	1.033	0.977	1.033	1.000	1.009		平均值	1.001	0.947	1.001	1.000	0.948
	甘南	1.000	0.944	1.000	1.000	0.944	下游	郑州	1.000	0.928	1.000	1.000	0.928
	银川	1.033	0.938	1.032	1.001	0.968		安阳	1.024	0.977	1.028	0.996	1.000
	石嘴山	1.055	0.958	1.043	1.011	1.010		开封	1.000	0.989	1.000	1.000	0.989
	吴忠	1.004	0.976	1.000	1.004	0.980		新乡	1.015	0.949	1.012	1.003	0.963
	固原	1.000	1.009	1.000	1.000	1.009		焦作	1.017	0.976	1.016	1.000	0.992
	呼和浩特	1.000	0.893	1.000	1.000	0.893		濮阳	1.010	1.009	1.011	1.000	1.019
	包头	1.000	0.876	1.000	1.000	0.876		济源	0.998	1.004	0.990	1.008	1.002
	鄂尔多斯	1.000	0.838	1.000	1.000	0.838		济南	1.000	0.943	1.000	1.000	0.943
	巴彦淖尔	1.000	0.762	1.000	1.000	0.762		淄博	1.000	0.972	1.000	1.000	0.972
	乌海	0.980	0.849	1.000	0.980	0.832		东营	1.000	0.960	1.000	1.000	0.960
	阿拉善	1.000	0.717	1.000	1.000	0.717		济宁	1.003	0.977	1.000	1.003	0.980
	平均值	1.008	0.950	1.009	0.999	0.958		泰安	1.010	0.946	1.000	1.010	0.955
中游	乌兰察布	1.000	0.785	1.000	1.000	0.785		莱芜	0.999	0.963	0.993	1.005	0.961
	西安	0.970	0.922	0.986	0.984	0.894		德州	1.000	0.973	1.000	1.000	0.973
	铜川	1.024	1.013	1.000	1.024	1.038		聊城	1.021	0.988	1.020	1.002	1.009
	咸阳	0.989	0.934	1.000	0.989	0.924		滨州	1.000	0.966	1.000	1.000	0.966
	宝鸡	0.989	0.938	0.989	1.000	0.928		菏泽	1.045	0.960	1.000	1.045	1.003
	榆林	0.998	0.947	0.999	0.999	0.944		平均值	1.008	0.969	1.004	1.004	0.977
	安康	1.016	0.995	1.028	0.989	1.011		综合平均值	1.006	0.952	1.005	1.001	0.957

拉善地域广阔,水资源分布不均,虽有较多湖泊河流流经阿拉善,但用水浪费严重,且用水结构不合理,对水资源未能实现优质优用^[17-18],所以阿拉善的水资源利用效率最低。下游地区的技术进步率在黄河流域最高,为 0.969,技术效率为 1.008,水资源利用效率平均每年降低 0.26%,技术水平对其影响较大。然而,下游地区人口数量大体上是上游地区的两倍,其人均水资源的拥有量和使用量远小于上游地区,人多水少的矛盾相对突出,仅通过增强技术水平并不能有效提升水资源利用效率,需同时提高节水意识,促进水资源的重复利用。虽然西宁、海东、海西、临夏、石嘴山、安康、临汾、安阳、聊城、菏泽等地区技术进步率低,技术效率较高,致使 TFP 大于 1,但是整体而言,黄河流域 TFP 为负增长,主要受

技术进步率影响,因此提高技术水平是解决水资源利用效率低下问题的关键。

4 结 论

a. 2017 年黄河流域水资源利用效率达到 DEA 有效的地级行政单元有 26 个、非 DEA 有效的地级行政单元有 42 个;通过对 42 个非 DEA 有效行政单元的投入冗余测算,发现由于规模效率不高造成的有 27 个、技术效率低下造成的有 15 个。

b. 通过对黄河流域进行分年份与分地区的 TFP 分解,发现在 2009—2017 年黄河流域的水资源利用效率呈“先上升、后下降、且波动大”的特点,且受技术进步率影响较大,水资源利用效率整体有所提升。

c. 从流域来看,2009—2017 年黄河流域水资源 TFP 指数的综合平均值为 0.957,其中,下游地区的水资源利用效率最高,TFP 指数为 0.977;上游和中游地区次之,TFP 指数分别为 0.958 和 0.948。

参考文献:

[1] 王慧亮,申言霞,李卓成,等. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. 水资源保护, 2020,36(6):12-17. (WANG Huiliang, SHEN Yanxia, LI Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on energy theory [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 12-17. (in Chinese))

[2] 高媛媛,许新宜,王红瑞,等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(3): 776-784. (GAO Yuanyuan, XU Xinyi, WANG Hongrui, et al. Construction and application of water resources utilization efficiency evaluation model in China [J]. System Engineering Theory and Practice, 2013, 33(3): 776-784. (in Chinese))

[3] 高雄,王红瑞,高媛媛,等. 基于迭代修正的水资源利用效率评价模型及其应用[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 478-488. (GAO Xiong, WANG Hongrui, GAO Yuanyuan, et al. A water resources utilization efficiency evaluation model based on iterative correction and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 478-488. (in Chinese))

[4] 张昆,马静洲,吴泽斌,等. 长江经济带 11 省市水资源利用效率评价[J]. 人民长江, 2015, 46(18): 48-51. (ZHANG Kun, MA Jingzhou, WU Zebin, et al. Evaluation of water resources utilization efficiency in 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Zone [J]. Yangtze River, 2015, 46(18): 48-51. (in Chinese))

[5] 郑乐,杨法喧,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 Ningxia industrial water resources utilization efficiency based on super-efficient DEA model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(2): 81-86. (in Chinese))

[6] 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 of the utilization efficiency of urban water resources in my country [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(4): 1507-1516. (in Chinese))

[7] 刘善建. 关于黄河流域水资源利用规划的几个问题[J]. 人民黄河, 1979(3): 43-45. (LIU Shanjian. Several issues on water resources utilization planning of the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 1979(3): 43-45. (in

Chinese))

[8] 张晓涛,于法稳. 黄河流域经济发展与水资源匹配状况分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(10): 1-6. (ZHANG Xiaotao, YU Fawen. Analysis of the matching status of economic development and water resources in the Yellow River Basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(10): 1-6. (in Chinese))

[9] 王猛飞,高传昌,张晋华,等. 黄河流域水资源与经济发展要素时空匹配度分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(6): 38-42. (WANG Mengfei, GAO Chuanchang, ZHANG Jinhua, et al. Analysis on the temporal and spatial matching degree of water resources and economic development factors in the Yellow River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(6): 38-42. (in Chinese))

[10] 张慧,刘秋菊,史淑娟. 黄河流域农业水资源利用效率综合评估研究[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(2): 72-76. (ZHANG Hui, LIU Qiuju, SHI Shujuan. Study on comprehensive evaluation of agricultural water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2015, 38(2): 72-76. (in Chinese))

[11] 周帅,王义民,郭爱军,等. 黄河流域未来水资源时空变化[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 28-39. (ZHOU Shuai, WANG Yimin, GUO Aijun, et al. Future temporal and spatial changes of water resources in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 28-39. (in Chinese))

[12] 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 Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7. (in Chinese))

[13] 张勇. 试论水土保持在推进黄河流域生态保护和高质量发展的作用[J]. 陕西水利, 2020(6): 142-144. (ZHANG Yong. On the role of soil and water conservation in promoting ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin [J]. Shaanxi Water Resources, 2020(6): 142-144. (in Chinese))

[14] 陈凯,王新欣. 中国水资源利用秩序评价[J]. 水利经济, 2020, 38(5): 12-16. (CHEN Kai, WANG Xinxin. Order evaluation of utilization of water resources in China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(5): 12-16. (in Chinese))

[15] 王莹. 基于 DEA 的江苏省工业水资源利用效率研究[J]. 水利经济, 2014, 32(5): 19-22. (WANG Ying. Study on industrial water resources utilization efficiency in Jiangsu Province based on DEA [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014, 32(5): 19-22. (in Chinese))

(下转第 50 页)

- [18] 王欢欢,白洁,刘世存,等. 白洋淀近 30 年水质时空变化特征[J]. 农业环境科学学报,2020,39(5):1051-1059. (WANG Huanhuan, BAI Jie, LIU Shicun, et al. Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 years[J]. Journal of Agro-Environment Science,2020,39(5):1051-1059. (in Chinese))
- [19] 郭丽峰,孟宪智,周绪申,等. 滦河干流水质时空变化分析[J]. 安徽农业科学,2015,43(1):196-199. (GUO Lifeng, MENG Xianzhi, ZHOU Xushen, et al. Analysis on temporal-spatial variation of water quality in mainstream of Luanhe River[J]. Journal of Anhui Agricultural,2015,43(1):196-199. (in Chinese))
- [20] 刘秀花,杨军,胡秀锦. 黄河宁夏段水质现状及变化趋势分析[J]. 人民黄河,2006(3):57-58. (LIU Xiuhua, YANG Jun, HU Xiujin. Analysis on the current situation and change trend of water quality in Ningxia section of the Yellow River[J]. Yellow River,2006(3):57-58. (in Chinese))
- [21] 梁涛,王浩,丁士明,等. 官厅水库近三十年的水质演变时序特征[J]. 地理科学进展,2003,22(1):38-44. (LIANG Tao, WANG Hao, DING Shiming, et al. An evolution of water quality in Guanting Reservoir during the past three decades[J]. Progress in Geography,2003,22(1):38-44. (in Chinese))
- [22] 甘肃省生态环境厅. 甘肃省环境状况公报[R]. 兰州: 甘肃省生态环境厅,2018.
- [23] 王华光,刘碧波,李小平,等. 滇池新运粮河水水质季节变化及河岸带生态修复的影响[J]. 湖泊科学,2012,24(3):334-340. (WANG Guanghua, LIU Bibo, LI Xiaoping, et al. Seasonal variation of water quality of Xinyunliang River, Dianchi Basin and the impact of the riparian ecological restoration[J]. Journal of Lake Sciences,2012,24(3):334-340. (in Chinese))
- [24] 庞博,王铁宇,吕永龙,等. 洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析[J]. 环境科学,2013,34(1):379-384. (PANG Bo, WANG Tiewu, LYU Yonglong, et al. Temporal variation of water quality and driving factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou[J]. Environmental Science,2013,34(1):379-384. (in Chinese))
- [25] 赵雷,廖晓斌,周真明,等. 泉州某水库水质季节变化原因及对策探究[J]. 中国给水排水,2020,36(1):36-42. (ZHAO Lei, LIAO Xiaobin, ZHOU Zhenming, et al. Seasonal changes of water quality of a reservoir in Quanzhou City and countermeasures[J]. China Water and Wastewater,2020,36(1):36-42. (in Chinese))
- [26] 者萌,张雪芹,孙瑞,等. 西藏羊卓雍错流域水体水质评价及主要污染因子[J]. 湖泊科学,2016,28(2):287-294. (ZHE Meng, ZHANG Xueqin, SUN Rui, et al. Assessment of water quality and the pollution factors of waters in Yamzhog Yumco Basin, Tibet[J]. Journal of Lake Sciences,2016,28(2):287-294. (in Chinese))
- [27] 冉桂花,葛继稳,苗文杰,等. 三峡库区古夫河水质时空分异特征[J]. 生态学报,2013,33(17):5385-5396. (RAN Guihua, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al. Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(17):5385-5396. (in Chinese))
- [28] 胡玉,帅钰,杜永,等. 丹江口库区神定河水质污染成因分析[J]. 人民长江,2019,50(11):44-48. (HU Yu, SHUAI Yu, DU Yong, et al. Causal analysis of water pollution of Shending River in Danjiangkou Reservoir[J]. Yangtze River,2019,50(11):44-48. (in Chinese))
- [29] 冯书涛,马和梅,俞发荣. 黄河兰州段水污染现状分析[J]. 人民黄河,2005(6):28-29. (FENG Shutao, MA Hemei, YU Rongfa. Analysis of water pollution in Lanzhou section of the Yellow River[J]. Yellow River,2005(6):28-29. (in Chinese))
- [30] 杨苏才,南忠仁,牛亚萍,等. 因子分析在水质评价与成因分析中的应用[J]. 人民黄河,2006(5):37-39. (YANG Sucui, NAN Zhongren, NIU Yaping, et al. Application of factor analysis in water quality evaluation and cause analysis[J]. Yellow River,2006(5):37-39. (in Chinese))

(收稿日期:2020-09-03 编辑:熊水斌)

(上接第 43 页)

- [16] 刘建华,黄亮朝. 黄河下游水资源利用与高质量发展关联评估[J]. 水资源保护,2020,36(5):24-30 (LIU Jianhua, HUANG Liangchao. Evaluation of correlation between water resources utilization and high-quality development in the lower reaches of the Yellow River[J]. Water Resources Protection,2020,36(5):24-30. (in Chinese))
- [17] 张淑霞,史洪森,陈全才. 阿拉善地区水资源利用现状及对策[J]. 内蒙古水利,2012(6):55-56. (ZHANG Shuxia, SHI Hongsen, CHEN Quancai. Current situation and countermeasures of water resources utilization in Alashan area[J]. Inner Mongolia Water Resources,2012(6):55-56. (in Chinese))
- [18] 王帅,饶文波,金可,等. 阿拉善地区降水同位素特征与水汽来源[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):411-419. (WANG Shuai, RAO Wenbo, JIN Ke, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristic and moisture source of precipitation of Alxa Desert Plateau[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(5):411-419. (in Chinese))

(收稿日期:2020-08-14 编辑:王芳)