

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.005

白龙江引水工程受水区水资源利用效率测算与影响因素分析

慕云霄,程玉菲,王军德

(甘肃省水利科学研究院,甘肃 兰州 730000)

摘要:采用考虑非期望产出的超效率 SBM 模型对白龙江引水工程甘肃省受水区 20 个县区 2011—2020 年水资源利用效率进行了测算,并利用 Tobit 模型分析了水资源利用效率的主要影响因素。结果表明:受水区水资源利用经济效率呈下降趋势,水资源利用环境效率和绿色效率呈平稳上升趋势;用水因素、经济发展水平、产业结构和水资源禀赋明显促进了水资源利用经济效率,城镇化水平抑制了水资源利用经济效率;城镇化水平对水资源利用环境效率产生明显的积极影响,产业结构、水资源禀赋对水资源利用环境效率产生明显的负面影响;产业结构、水资源禀赋对水资源利用绿色效率的负面影响较为显著;整体上,水资源利用绿色效率大于环境效率大于经济效率,2011—2020 年受水区水资源利用效率水平不高,受水区需优化产业结构,相邻县区可加强区域合作,缩小差异。

关键词:白龙江引水工程;甘肃省受水区;水资源利用效率;SBM 模型;Tobit 模型

中图分类号:TV213

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2025)04-0038-09

Measurement and influencing factors for water resources utilization efficiency in water receiving area of the Bailong River Diversion Project

MU Yunxiao, CHENG Yufei, WANG Junde

(Gansu Academy for Water Conservancy, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The super-efficiency slack-based measure (SBM) model considering unexpected output was used to measure the water resources utilization efficiency of 20 counties and districts in the water receiving area of the Bailong River Diversion Project in Gansu Province from 2011 to 2020. The Tobit model was used to analyze the main influencing factors of water resources utilization efficiency. The results show that the economic efficiency of water resources in the receiving area shows a downward trend, while the utilization environment and green efficiency of water resources exhibit a steady upward trend. Water use factors, economic level, industrial structure, and water resources endowment promote the economic efficiency of water resources utilization, while urbanization level inhibits the economic efficiency of water resources utilization. Urbanization level has a positive effect on the environmental efficiency of water resources utilization, while industrial structure and water resources endowment have negative effects on the environmental efficiency of water resources utilization. Industrial structure and water resources endowment inhibit the green efficiency of water resources utilization. On the whole, the green efficiency of water resources utilization is greater than the environmental efficiency, and the economic efficiency ranks last; the level of water resources utilization efficiency in the water receiving area is not high from 2011 to 2020. Therefore, the water receiving area needs to optimize the industrial structure, and neighboring counties and districts can strengthen regional cooperation to narrow the differences.

Key words: the Bailong River Diversion Project; water receiving area in Gansu Province; efficiency of water resources utilization; SBM model; Tobit model

水是维持人类和万物生存的关键物质,对推动经济增长、社会发展和环境改善具有不可替代的作用^[1],也是实现可持续发展的基本条件^[2-4]。我国存在水资源严重短缺、时空分布不均等问题,随着社会经济的发

基金项目: 甘肃省水利技术推广项目(23GSLK011);甘肃省重点研发计划项目(23YFFA0017,23YFFA0018)

作者简介: 慕云霄(1993—),女,助理工程师,硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail:muyunxiao@163.com

通信作者: 程玉菲(1980—),女,正高级工程师,硕士,主要从事干旱区水文水资源研究。E-mail:feifei105@163.com

引用本文: 慕云霄,程玉菲,王军德. 白龙江引水工程受水区水资源利用效率测算与影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):38-46.

MU Yunxiao, CHENG Yufei, WANG Junde. Measurement and influencing factors for water resources utilization efficiency in water receiving area of the Bailong River Diversion Project[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 38-46.

展,水资源短缺、水污染严重和水环境恶化等问题日益凸显^[5-10],水资源供需矛盾日趋严重^[11-12]。随着水资源供需矛盾的加剧,水资源利用效率的相关研究越来越被人们所关注^[13-19]。水资源利用效率是水资源及其他生产要素投入与产出的比值^[18]。将水资源、劳动力、资本作为投入,水资源利用经济效率是指实现经济效益的最大化,水资源利用环境效率是指实现经济效益的最大化、废污水排放最少,水资源利用绿色效率是指实现经济效益的最大化、社会发展最和谐化、废污水排放最少^[11,18]。

由于传统的数据包络分析(data envelopment analysis,DEA)模型可操作性强,不需要预先设定生产函数的具体形式,并能够对数据进行无量纲处理,可评价多投入、多产出的效率问题,而被广泛应用^[17,20-23],但是其没有考虑松弛变量,存在径向和角度选择引起的偏差^[24]。Tone^[25]提出了一个非径向、非角度的超效率 SBM(slack-based measure)模型,使得不同时期下各决策单元都具有可比性^[26-27]。由于实际生产过程中不仅有期望产出还有废污水等非期望产出^[11],随后 Tone 进一步提出了一个考虑非期望产出的超效率 SBM(super-efficiency slack-based measure)模型,每个决策单元都包含投入、期望产出和非期望产出,测算结果更加准确^[11,16,25-26]。Liu 等^[28]基于改进的超效率 SBM 模型,从国家和地区层面对 2012—2015 年中国大陆的工业用水效率进行了分析。Huang^[29]基于 SBM 模型对江西省水资源利用效率进行了测度,运用 Malmquist-Luenberger 指数模型对水资源利用效率的技术效率和技术进步或创新指数进行了分解。Huang 等^[30]基于超效率 SBM 模型,首次提出将农业主要污染排放物作为环境约束,采用阈值回归模型评价了农业用水效率对农业用水量的影响。李可柏等^[31]运用 DEA 模型和莫兰指数模型分析了中国 31 个省份水资源利用效率的动态变化和时空分布。张雪纯等^[32]基于超效率 SBM 模型和 Tobit 模型,构建减污降碳指标体系,测算了我国 30 个省份的减污降碳效率,并分析了影响因素。褚家琦等^[33]采用超效率 SBM 模型测算了新疆 14 个行政区农业水资源利用绿色效率,并运用 Malmquist 指数模型计算了解指数值,分析了农业水资源利用绿色效率的空间格局变化和影响因素。

现有的水资源利用效率评价大多以全国、各省份、各大流域作为研究对象^[11,26,31,34-38],针对引水工程受水区水资源利用效率评价的研究还很少。因此,本文将地区生产总值、社会发展指数作为期望产出,废污水排放量作为非期望产出,综合考虑经济、社会、环境 3 个维度,构建水资源利用效率测度指标体系,以白龙江引水工程甘肃省受水区 20 个县区为研究对象,运用考虑非期望产出的超效率 SBM 模型,对 2011—2020 年受水区水资源利用效率进行测算,运用 Tobit 模型对影响受水区水资源利用效率的主要因素进行回归分析,以期为提升受水区水资源利用效率以及解决水资源短缺问题提供理论支持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

白龙江引水工程甘肃省受水区位于甘肃省东部,东与陕西延安、铜川相望,西连白银、定西,南接陇南、宝鸡,北靠固原。地理位置介于 34°06'N~37°09'N,104°34'E~108°42'E 之间,总面积 4.61 万 km²。受水区包括秦州区和麦积区(黄河流域)、武山县和甘谷县(渭河以南)、清水县、张家川回族自治县、崆峒区、庄浪县、华亭市、崇信县、泾川县、灵台县、西峰区、镇原县、环县、华池县、庆城县、合水县、宁县和正宁县共 20 个县区,如图 1 所示。

1.2 数据来源

研究时段为 2011—2020 年,原始数据主要来自中国气象局国家气象科学数据中心、《甘肃省水资源公报》《甘肃水利统计年鉴》《甘肃省发展年鉴》《天水市统计年鉴》《平凉市统计年鉴》《庆阳市统计年鉴》,天水市、平凉市和庆阳市国民经济和社会发展公报等。

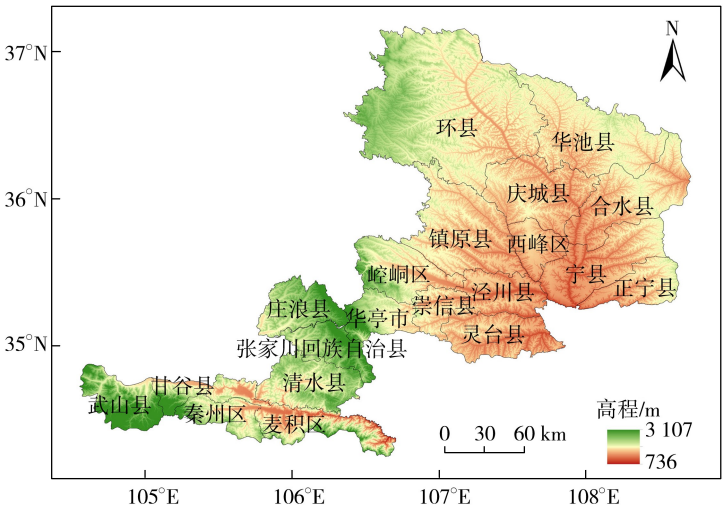


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 考虑非期望产出的超效率 SBM 模型

Tone 提出的考虑非期望产出的超效率 SBM 模型,充分考虑了投入和产出松弛变量,可以更准确地测算决策单元的投入产出效率,并对多个有效决策单元进行对比^[25,32,39-40]。本文采用超效率 SBM 模型,基于固定规模报酬条件评价受水区水资源利用效率,具体公式为

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{s_n}{x_{k_n t'}}}{1 + \frac{1}{M+I} \left(\sum_{m=1}^M \frac{s_m}{y_{k'_m t'}} + \sum_{i=1}^I \frac{s_i}{z_{k'_i t'}} \right)}$$
$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_{kt} x_{k_n t} + s_n = x_{k'_n t'} & (n = 1, 2, \dots, N) \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_{kt} y_{k_m t} - s_m = y_{k'_m t'} & (m = 1, 2, \dots, M) \\ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K z_{kt} z_{k_i t} + s_i = z_{k'_i t'} & (i = 1, 2, \dots, I) \\ z_{kt} \geq 0, s_n \geq 0, s_m \geq 0, s_i \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为水资源利用效率计算值, $0 < \rho \leq 1$,当 $\rho = 1$ 时,生产单元有效,当 $\rho < 1$ 时,生产单元存在效率损失; N 、 M 、 I 分别为投入、期望产出、非期望产出要素的数量; K 为生产单元数; T 为时期总数; s_n 、 s_m 、 s_i 分别为投入、期望产出非期望产出的松弛值; z_{kt} 为生产单元 k 在 t 时期的权重; $x_{k'_n t'}$ 、 $y_{k'_m t'}$ 、 $z_{k'_i t'}$ 分别为生产单元 k' 在 t' 时期的第 n 、 m 、 i 个投入产出值; $x_{k_n t}$ 、 $y_{k_m t}$ 、 $z_{k_i t}$ 分别为生产单元 k 在 t 时期的第 n 、 m 、 i 个投入产出值。

2.2 Tobit 模型

采用 Tobit 模型对影响白龙江引水工程甘肃省受水区的水资源利用效率的主要因素进行回归分析^[36]:

$$q_v^* = p_v \beta + \varepsilon_v \quad (2)$$
$$q_v = \begin{cases} q_v^* = p_v \beta + \delta^2 & q_v^* > 0 \\ 0 & q_v^* \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: q_v^* 为模型中假设存在的未观测到的潜在因变量值; p_v 为自变量; β 为回归参数; ε_v 为误差,服从均值为 0、方差为 δ^2 的正态分布; δ 为误差 ε_v 的标准差; q_v 为实际观测到的因变量值; v 为区域编号。

2.3 指标体系的构建

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^[23],水资源的开发利用需要水资源、劳动力、资本等生产要素协同合作才能带来经济产出和社会效益^[18]。参考已有研究和相关成果^[17,26,36],考虑数据的完整性和可获得性,本文选取受水区各县区年末常住人口(代表劳动力投入)、固定资产投资(代表资本投入)、总用水量(代表水资源投入)作为投入指标,地区生产总值(GDP)和社会发展指数作为期望产出指标,废污水排放量作为非期望产出,构建受水区水资源利用效率测度指标体系。

期望产出指标主要为 GDP 和社会发展指数。①GDP:选取各县区地区生产总值 GDP 作为期望产出指标,基期为 2010 年。②社会发展指数:从人口、城市化、政府重视科教程度、教育、医疗等方面衡量受水区社会发展水平,构建社会发展水平评价指标体系^[11,16,34,41](表 1)。某年区域社会发展指数 M 为

$$M = \frac{1}{\alpha} \sum_{g=1}^{\alpha} W_{gh} \quad (4)$$

式中: W_{gh} 为第 h 年指标 g 原始数据的归一化值,正向、负向指标归一化公式见文献[11]; α 为指标数量。基于投入指标、期望产出指标、非期望产出指标构建的受水区水资源利用效率测度指标体系见表 2。

表 1 社会发展水平评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of social development level

目标层	一级指标	二级指标	指标类型
社会发展指数	人口控制	人口自然增长率	负向指标
	城市化水平	城镇人口比例	正向指标
	政府对科教的高度重视程度	科教事业费占财政支出比例	正向指标
	高素质人口比例	大专以上文化程度占总人口比例	正向指标
	医疗资源占有情况	每万人口卫生技术人员数	正向指标

表 2 白龙江引水工程受水区水资源利用效率测度指标体系

Table 2 Evaluation index system of water resources utilization efficiency in water receiving area of the Bailong River Diversion Project

投入指标	产出指标	水资源利用效率
水资源、劳动力、固定资产投资	GDP	经济效率
水资源、劳动力、固定资产投资	GDP、废污水排放量	环境效率
水资源、劳动力、固定资产投资	GDP、废污水排放量、社会发展指数	绿色效率

3 水资源利用效率分析

运用 Matlab R2020a 软件计算白龙江引水工程甘肃省受水区 20 个县区水资源利用效率,结果见表 3 和图 2。2011—2013 年受水区水资源利用经济、环境、绿色效率均呈下降趋势,是因为受水区经济产出、社会发展增速低于固定资产投资、劳动力、水资源的增速,且废污水排放量逐年增加。由于供给侧结构性改革、产业结构调整、固定资产投资增幅陡降,再加上新冠疫情造成停工停产,受水区水资源经济效率总体呈现下降趋势。部分县区水资源利用经济效率降低,与用水量较大、固定资产投资增长速率高于 GDP 增速有关。由于水资源利用环境效率和绿色效率均将废污水排放量作为非期望产出,变化趋势具有较大的一致性。水资源利用绿色效率优于环境效率,是因为在产出指标中加入了社会发展指数。受水区的水资源利用环境效率和

表 3 不同年份受水区各县区水资源利用效率

县 区	2011 年			2016 年			2020 年			平均值		
	经济效率	环境效率	绿色效率	经济效率	环境效率	绿色效率	经济效率	环境效率	绿色效率	经济效率	环境效率	绿色效率
秦州区	0.943	0.750	0.796	1.046	1.062	1.041	0.412	0.488	0.482	0.637	0.585	0.594
麦积区	1.091	1.125	1.136	1.169	1.160	1.166	0.309	0.282	0.270	0.835	0.826	0.824
甘谷县	0.274	0.184	1.010	0.557	1.064	1.057	0.260	0.496	0.687	0.309	0.536	0.798
武山县	0.276	0.186	0.351	0.450	0.692	0.642	0.210	0.423	0.543	0.269	0.440	0.540
清水县	0.281	0.189	0.330	0.528	1.013	1.009	0.254	0.336	0.662	0.326	0.536	0.660
张家川回族自治县	0.242	0.162	0.438	0.394	0.654	0.691	0.207	0.490	0.762	0.252	0.507	0.750
崆峒区	0.358	0.239	0.265	0.560	0.438	0.419	0.329	0.266	0.259	0.375	0.278	0.287
灵台县	0.361	0.241	1.022	0.516	1.045	1.196	0.239	0.402	1.161	0.333	0.521	1.103
泾川县	0.396	0.264	0.468	0.522	0.698	0.716	0.268	1.019	1.272	0.341	0.405	0.683
崇信县	0.435	0.291	1.117	0.480	0.426	1.128	0.429	0.390	1.130	0.415	0.343	1.126
庄浪县	0.296	0.198	0.429	0.467	0.453	0.565	0.337	1.155	1.098	0.323	0.368	0.546
华亭市	0.445	0.297	0.396	0.368	0.278	0.495	0.387	0.295	0.487	0.352	0.254	0.424
西峰区	0.649	0.437	0.442	0.759	1.038	1.025	0.695	1.079	1.051	0.718	0.903	0.874
庆城县	1.006	1.006	1.005	0.761	0.713	0.672	0.381	0.338	0.348	0.629	0.573	0.578
镇原县	0.287	0.192	0.269	0.405	0.498	0.469	0.334	0.314	0.291	0.326	0.291	0.311
宁 县	0.180	0.121	0.153	0.330	0.364	0.334	0.217	0.191	0.205	0.239	0.234	0.256
正宁县	0.172	0.115	0.253	0.335	0.463	0.712	0.243	0.248	1.032	0.238	0.233	0.775
合水县	0.387	0.260	0.422	0.570	0.519	0.645	0.515	0.463	0.671	0.496	0.410	0.590
华池县	1.801	1.927	2.723	1.329	1.186	1.178	1.478	1.251	1.429	1.567	1.422	1.754
环 县	0.281	0.188	0.242	0.589	0.584	0.509	0.496	0.640	0.611	0.497	0.490	0.475
平均值	0.508	0.419	0.663	0.607	0.717	0.783	0.400	0.528	0.723	0.474	0.508	0.697

注:表中仅列出了 2011 年、2016 年、2020 年的当期效率计算结果;平均值为 2011—2020 年的平均值。

绿色效率整体上呈现缓慢平稳上升的趋势,2013—2016 年的增长速度明显加快,与固定资产投资增加、部分县区大力发展第二产业有关,2017—2020 年水资源利用环境效率和绿色效率呈减少趋势,主要是由于固定资产投资减少。个别县区存在水资源利用环境效率和绿色效率降低的现象,主要是受到废污水排放量较高、社会发展指数较低的影响。随着疫情后经济复苏、产业结构调整、节水技术的提升以及节水型社会建设的推进,水资源利用效率将进一步提高。

根据孙才志等^[11,18,36,42]的研究结果,基于受水区 2011 年、2016 年、2020 年水资源利用效率测算值,以及 2011—2020 年受水区水资源利用效率的算术平均值,运用 ArcGIS10.8 软件的自然断点法,将 2011 年、2016 年、2020 年、2011—2020 年受水区水资源利用经济效率、环境效率和绿色效率分为 5 个等级:低级(0.00~0.40)、中低级(>0.40~0.60)、中级(>0.60~0.80)、中高级(>0.80~1.00)和高级(>1.00)。3 种水资源利用效率的空间分布如图 3~5 所示。

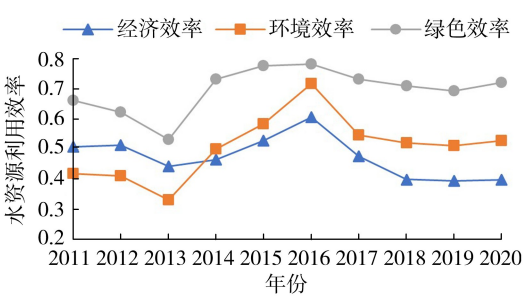


图 2 受水区水资源利用效率变化
Fig. 2 Changes in water resources utilization efficiency in water receiving area

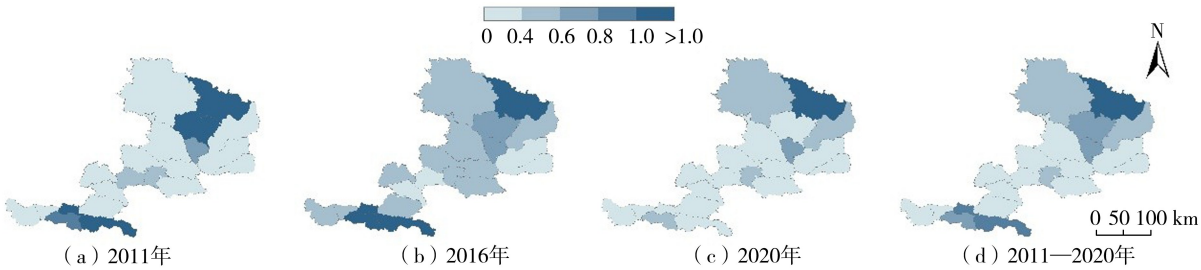


图 3 受水区水资源利用经济效率时空格局变化
Fig. 3 Spatial and temporal change of economic efficiency of water resources utilization in water receiving area

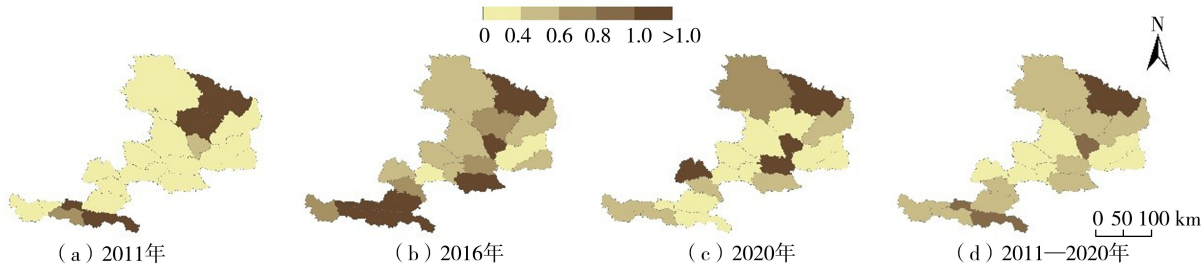


图 4 受水区水资源利用环境效率时空格局变化
Fig. 4 Spatial and temporal change of environmental efficiency of water resources utilization in water receiving area

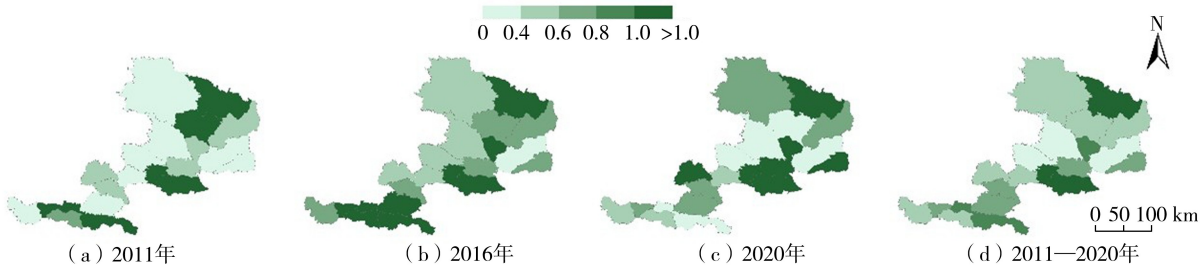


图 5 受水区水资源利用绿色效率时空格局变化
Fig. 5 Spatial and temporal change of green efficiency of water resources utilization in water receiving area

受水区水资源利用经济效率均值为 0.474,其中中华池县、麦积区水资源利用经济效率达到中高水平以上,90%县区水资源利用经济效率处于中级及以下水平。水资源利用环境效率均值为 0.508,其中中华池县、西峰区、麦积区水资源利用环境效率达到中高水平以上,85%县区水资源利用环境效率处于中级及以下水

平。水资源利用绿色效率均值为 0.697,其中华池县、崇信县、灵台县、西峰区、麦积区水资源利用绿色效率达到中高水平以上,75%县区水资源利用绿色效率处于中级及以下水平;在水资源利用绿色效率中高级水平以上的 5 个县区中,人均 GDP 并不是受水区 20 个县区中最高值,说明各县区水资源利用绿色效率水平与其经济发展水平之间并未呈现明显的相关性。华池县的水资源利用经济效率、环境效率和绿色效率均大于 1,说明该地区水资源利用效率处于领先水平,投入与产出之间实现了最佳匹配。

4 水资源利用效率影响因素分析

4.1 影响因素选取

白龙江引水工程受水区水资源利用效率和当地的水因素、经济发展水平、产业结构、城镇化水平、水资源禀赋等密切相关,因此从这几个方面选取指标进行水资源利用效率影响因素分析,为实现水资源的可持续利用提供必要条件^[2,27,36,42-43](表 4)。

4.2 回归结果分析

运用 Stata 17.0 软件对影响 2011—2020 年白龙江引水工程甘肃省受水区 20 个县区的指标进行 Tobit 回归分析^[38],结果见表 5。

表 4 受水区水资源利用效率影响因素

Table 4 Influencing factors of water resources utilization efficiency in water receiving area

影响因素	指标	单位
用水因素	万元 GDP 用水量	m ³ /万元
	农业用水占比	%
	工业用水占比	%
	人均用水量	m ³
经济发展水平	人均 GDP	元
产业结构	第一产业生产总值占比	%
	第二产业生产总值占比	%
	第三产业生产总值占比	%
城镇化水平	城镇化率	%
水资源禀赋	人均水资源量	m ³

表 5 Tobit 回归结果

Table 5 Tobit regression results

指标	水资源利用经济效率		水资源利用环境效率		水资源利用绿色效率	
	回归系数	<i>T</i> 统计量	回归系数	<i>T</i> 统计量	回归系数	<i>T</i> 统计量
万元 GDP 用水量	0.0679	0.68	0.2393	1.21	0.0242	0.10
农业用水占比	0.2285*	1.68	-0.4501	-1.60	-0.2318	-0.65
工业用水占比	-0.1421	-0.78	-0.4396	-1.26	-0.1241	-0.28
人均用水量	0.0192	0.32	-0.0325	-0.27	0.0723	0.48
人均 GDP	0.1231***	6.68	-0.0003	-0.01	0.0246	0.61
第一产业生产总值占比	0.2283	0.83	-1.3737**	-2.39	-1.1205	-1.54
第二产业生产总值占比	1.1762***	3.54	-2.0749***	-2.96	-1.7277*	-1.95
第三产业生产总值占比	1.1509***	3.00	-2.9909***	-3.71	-1.9120*	-1.88
城镇化率	-0.5743***	-2.89	0.8117**	1.97	0.6988	1.35
人均水资源量	0.0075*	1.77	-0.0194**	-2.24	-0.0309***	-2.80
常数项	-0.8209	-2.65	2.8821	4.42	2.3361	2.85

注:***表示在 1%水平上显著,**表示在 5%水平上显著,*表示在 10%水平上显著。

4.2.1 水资源利用经济效率

用水因素方面:农业用水占比对水资源利用经济效率产生明显的积极影响。经济发展水平方面:人均 GDP 与水资源经济效率呈显著正相关关系,说明经济发展对水资源经济效率有促进作用。经济发展水平越高,技术水平越高,基础设施建设越完善,在人力、财力、物力等方面更具优势,可以为水资源的合理利用提供良好的经济基础,并能优化水资源配置和管理,有效促进水资源经济效率提升。产业结构方面:第二、三产业生产总值占比对水资源利用经济效率产生积极作用,说明受水区第二、三产业生产模式已经相对成熟,资源投入和产出之间的匹配达到了最佳状态。城镇化水平方面:城镇化率对水资源利用经济效率有显著的负面作用,城镇化在为城市经济发展提供丰富人力资源的同时,也加剧了资源需求量,随着城镇人口的增多,人均水资源量减少,水资源利用经济效率也随之降低。水资源禀赋方面:人均水资源量对水资源利用经济效率产生较为显著的正向效应。

4.2.2 水资源利用环境效率

产业结构方面:第一、二、三产业生产总值占比对水资源利用环境效率有负面影响。受水区第一、二产业用水量大、废污水排放量大、用水效率低,亟须对第一、二产业用水总量进行约束控制。受水区第三产业占比逐年上升,而 2017 年后水资源利用环境效率呈下降趋势,说明当前受水区第三产业发展程度尚有所局限,第三产业生产总值占比的提升并未显著提高用水效率。城镇化水平方面:城镇化率对水资源利用环境效率促

进作用较为明显。城镇化的推进对于产业结构的优化、水资源回用率的提升、科技进步速度和规模的提高等方面都有着不可忽视的积极影响,从而可以促进水资源利用环境效率的提升。水资源禀赋方面:人均水资源量对水资源利用环境效率呈显著负影响,水资源丰富但利用效率较低的地区,应加强最严格水资源管理制度等政策的实施。

4.2.3 水资源利用绿色效率

产业结构方面:第二、三产业生产总值占比对水资源利用绿色效率有一定的抑制作用。受水区制造业、建筑业等第二产业消耗水资源较大、废污水排放较多,导致水资源利用效率不高。尽管服务业等第三产业占比逐年上升,但 2017 年以来,水资源绿色效率却呈下降趋势,反映出受水区第三产业发展程度相对较低。同时,尽管第三产业在整体产业结构中的占比日益增加,但其对用水效率的改善并不明显。因此,在产业结构调整优化的过程中,应当强化第二产业与第三产业之间的协同发展。水资源禀赋方面:人均水资源量对水资源利用绿色效率具有明显的抑制作用,水资源利用效率偏低但水量丰富的县区,应加强实施最严格水资源管理制度等政策。

为保证受水区水资源利用效率持续稳步提升,实现经济、环境、社会同步发展,本文提出以下几点建议:①在实现经济增长的同时应该兼顾环境、社会的可持续发展,所以应该强化对受水区水资源利用绿色效率的提升;②针对水资源利用绿色效率高的地区,应继续维持一个较为平稳的社会发展状态,减少废污水的排放,确保水资源的高效利用;③针对水资源利用绿色效率中高、中、中低的地区,应调整产业结构,促进第二产业节水技术创新,加强第二、三产业之间的协同合作;④针对水资源利用绿色效率低的地区,应采取措施发展经济,提升水资源回用率,重视科教,培养高素质人才,推进医疗卫生事业发展,促进城市化发展在水资源绿色效率方面的积极作用。

5 结 论

a. 由于供给侧结构性改革、产业结构调整、固定资产投资增幅陡降及新冠疫情影响,受水区水资源经济效率呈下降趋势。水资源利用经济效率受到水资源禀赋、用水因素、产业结构和经济发展水平明显的正面效应,而城镇化水平明显对水资源利用经济效率产生了抑制作用。

b. 水资源利用环境效率呈平稳上升趋势,2013—2016 年增速明显增加,是由于固定资产投资增加、部分县区大力发展第二产业;2017—2020 年呈减少趋势,主要是由于固定资产投资减少。城镇化水平对水资源利用环境效率产生明显的积极作用,而产业结构、水资源禀赋对环境效率产生明显的负面作用。

c. 水资源利用绿色效率呈平稳上升趋势,2013—2016 年增速明显增加,是由于固定资产投资增加、部分县区大力发展第二产业;2017—2020 年呈下降趋势,主要是由于固定资产投资减少。产业结构、水资源禀赋对水资源利用绿色效率产生的负面影响较为显著。

d. 整体上,水资源利用绿色效率大于环境效率大于经济效率,表明社会发展效应对于提升水资源利用效率的积极影响较为明显。2011—2020 年受水区 20 个县区水资源利用效率整体水平不高。部分县区水资源量丰富,但水资源利用效率处于低级水平,说明一些水资源总量丰富的县区用水效率还有很大提升空间。

参考文献:

[1] 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. (ZHAO Chen,WANG Yuan, GU Xueming, et al. Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(5):1636-1644. (in Chinese))

[2] 石天戈,时卉. 基于网络 DEA 的中国省域水资源效率特征与影响因素分析[J]. 生态经济,2022,38(7):176-183. (SHI Tiange,SHI Hui. Water resources efficiency and its influencing factors in China based on network-DEA model[J]. Ecological Economy,2022,38(7):176-183. (in Chinese))

[3] 黄进,王伟,田野,等. 南水北调中线工程水源区环境规制对经济高质量发展的影响[J]. 水资源保护,2024,40(4):148-156. (HUANG Jin,WANG Wei,TIAN Ye,et al. Impact of environmental regulations on high-quality economic development in water source area of middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection,2024,40(4):148-156. (in Chinese))

[4] 朱兆珍,梁中. 我国省域水资源利用效率评价研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2015,17(3):72-78. (ZHU

Zhaozhen,LIANG Zhong. Research into evaluation of efficiency of provincial water resource use in China[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences),2015,17(3):72-78. (in Chinese))

[5]刘秀丽,张标. 我国水资源利用效率和节水潜力[J]. 水利水电科技进展,2015,35(3):5-10. (LIU Xiuli,ZHANG Biao. Water use efficiency and water conservation potential in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(3):5-10. (in Chinese))

[6]高玉琴,吴迪,刘海瑞,等. 城市化影响下区域水资源承载力评价[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):1-8. (GAO Yuqin, WU Di,LIU Hairui,et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under urbanization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):1-8. (in Chinese))

[7]方隽敏,黄德春,贺正齐. 绿色发展对水资源-能源-粮食系统的影响[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2024,26(1):132-142. (FANG Junmin,HUANG Dechun,HE Zhengqi. Research on the influence of green development on water-energy-food system[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences),2024,26(1):132-142. (in Chinese))

[8]高玉琴,李媛媛,高见,等. 虚拟水影响下区域水资源承载力评价[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):22-27. (GAO Yuqin,LI Yuanyuan,GAO Jian,et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under influence of virtual water [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(5):22-27. (in Chinese))

[9]许晶荣,黄德春,方隽敏. 中国区域全要素水资源利用效率及其影响[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2021,23(6):77-84. (XU Jingrong, HUANG Dechun, FANG Junmin. Regional total factor water resources utilization efficiency and its influencing factors in China [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2021, 23(6):77-84. (in Chinese))

[10]孙才志,张佳亮. 中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易的水资源压力效应[J]. 水利水电科技进展,2023,43(4):1-8. (SUN Caizhi,ZHANG Jialiang. Effects of water resources stress on agricultural trade between China and countries along Belt and Road[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(4):1-8. (in Chinese))

[11]陶洁,王沛霖,王辉,等. 基于 A-NSGA-Ⅲ 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):111-119. (TAO Jie,WANG Peilin,WANG Hui,et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-Ⅲ algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):111-119. (in Chinese))

[12]牛玉国,张金鹏. 构建黄河大水网促进黄河流域生态保护和高质量发展[J]. 水利经济,2023,41(2):1-4. (NIU Yuguo, ZHANG Jinpeng. Research on building the Yellow River's large water network and promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(2):1-4. (in Chinese))

[13]张兆方,沈菊琴,何伟军,等. “一带一路”中国区域水资源利用效率评价:基于超效率 DEA-Malmquist-Tobit 方法[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2018,20(4):60-66. (ZHANG Zhaofang, SHEN Juqin, HE Weijun, et al. An analysis of water utilization efficiency of the belt and road initiative's provinces and municipalities in China based on DEA-malmquist-tobit model [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences),2018,20(4):60-66. (in Chinese))

[14]刘波,汪紫薇,王文鹏,等. 我国城市用水效率关键指标时空格局分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):534-541. (LIU Bo, WANG Ziwei, WANG Wenpeng, et al. Spatiotemporal characteristics analysis of major indicators of urban water use efficiencies over China's mainland[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):534-541. (in Chinese))

[15]赵良仕,冷明祥,孙才志. 中国省际全要素水资源绿色效率及节水减排潜力分析[J]. 地域研究与开发,2021,40(4):123-128. (ZHAO Liangshi,LENG Mingxiang,SUN Caizhi. Analysis of total factor water green efficiency and potential of the water-saving and emission-abating in provinces of China[J]. Areal Research and Development,2021,40(4):123-128. (in Chinese))

[16]姜坤. 水资源绿色效率测度与溢出效应研究[D]. 大连:辽宁师范大学,2018.

[17]朱晓梅,魏加华,杨海娇,等. 黄河流域城市群水资源利用效率评估及驱动因子分析[J]. 水资源保护,2022,38(1):153-159. (ZHU Xiaomei, WEI Jiahua, YANG Haijiao, et al. Evaluation and driving factor analysis of water resources utilization efficiency of urban agglomerations in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):153-159. (in Chinese))

[18]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 Shixing,WANG Anzhou,ZHANG Chongchong,et al. Comprehensive measurement and temporal-spatial differentiation of water resources efficiency in Henan Province[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):48-55. (in Chinese))

[19]崔东文. 文山州近 10 年水资源利用效率评价 SLC-PP 模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(2):129-136. (CUI Dongwen. SLC-PP model and its application to evaluation of water use efficiency in Wenshan Prefecture in last ten

years[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(2):129-136. (in Chinese))

[20] 苗峻瑜,张春英. 黄河流域工业水资源效率与经济协调发展特征及时空演变[J]. 环境科学研究,2024,37(1):114-121. (MIAO Junyu,ZHANG Chunying. Characteristics and spatial-temporal evolution of industrial water resources efficiency and coordinated economic development in the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences,2024,37(1):114-121. (in Chinese))

[21] 邓光耀. 基于污水排放量分配的中国水资源利用效率测算[J]. 水资源保护,2019,35(5):28-34. (DENG Guangyao. Estimation of water use efficiency in China based on sewage discharge distribution[J]. Water Resources Protection,2019,35(5):28-34. (in Chinese))

[22] 张永凯,孙雪梅. 黄河流域水资源利用效率测度与评价[J]. 水资源保护,2021,37(4):37-43. (ZHANG Yongkai,SUN Xuemei. Measurement and evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2021,37(4):37-43. (in Chinese))

[23] 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 Shu,LYU Wenfang,WANG Jianping. 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. (in Chinese))

[24] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research,2001,130(3):498-509.

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

[26] 刘晓君,闫俐臻. 基于数据包络模型的西部水资源利用效率及影响因素研究[J]. 水资源保护,2016,32(6):32-38. (LIU Xiaojun,YAN Lizhen. Research on water resources utilization efficiency and factors in western China based on data envelopment model[J]. Water Resources Protection,2016,32(6):32-38. (in Chinese))

[27] 丁绪辉,贺菊花,王柳元. 考虑非合意产出的省际水资源利用效率及驱动因素研究:基于 SE-SBM 与 Tobit 模型的考察[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(1):157-164. (DING Xuhui,HE Juhua,WANG Liuyuan. Inter-provincial water resources utilization efficiency and its driving factors considering undesirable outputs:based on SE-SBM and Tobit model[J]. China Population,Resources and Environment,2018,28(1):157-164. (in Chinese))

[28] LIU Kaidi,YANG Guoliang,YANG Duogui. Investigating industrial water-use efficiency in mainland China:an improved SBM-DEA model[J]. Journal of Environmental Management,2020,270:110859.

[29] HUANG Wen. Research on water use efficiency & environment based on SBM and Malmquist-Luenberger index model:taking Jiangxi Province as an example[J]. Fresenius Environmental Bulletin,2020,29(8):7014-7022.

[30] HUANG Yujie,HUANG Xianke,XIE Munan,et al. A study on the effects of regional differences on agricultural water resource utilization efficiency using super-efficiency SBM model[J]. Scientific Reports,2021,11(1):9953.

[31] 李可柏,陶军,卢慧. 中国水资源利用效率评价及空间集聚分析[J]. 人民黄河,2023,45(9):96-103. (LI Kebai,TAO Jun,LU Hui. Spatial agglomeration analysis of inter-provincial water resources utilization efficiency in China[J]. Yellow River,2023,45(9):96-103. (in Chinese))

[32] 张雪纯,曹霞,宋林壕. 中国减污降碳效率测度及影响因素研究:基于超效率 SBM-Tobit 模型[J]. 生态经济,2023,39(10):174-183. (ZHANG Xuechun,CAO Xia,SONG Linhao. Study on measurement and influencing factors of air pollution and carbon reduction efficiency in China based on super SBM and Tobit models[J]. Ecological Economy,2023,39(10):174-183. (in Chinese))

[33] 褚家琦,蒋志辉. 新疆农业水资源绿色效率时空演变及影响因素研究[J]. 干旱区地理,2024,47(7):1231-1241. (CHU Jiaqi,JIANG Zhihui. Spatiotemporal evolution and influencing factors of green efficiency of agricultural water resources in Xinjiang[J]. Arid Land Geography,2024,47(7):1231-1241. (in Chinese))

[34] 刘渝,宋阳. 基于超效率 SBM 的中国农业水资源环境效率评价及影响因素分析[J]. 中国农村水利水电,2019(1):102-107. (LIU Yu,SONG Yang. Evaluation and influencing factor analysis of agricultural water resource efficiency in China based on super-efficiency SBM model[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(1):102-107. (in Chinese))

[35] 王敏,谢雨涵,邓梦华,等. 黄河流域九省(区)水资源利用效率测度及演化分析[J]. 人民黄河,2022,44(8):87-91. (WANG Min,XIE Yuhua,DENG Menghua,et al. Measurement and evolution analysis of water resources utilization efficiency in nine provinces of the Yellow River Basin[J]. Yellow River,2022,44(8):87-91. (in Chinese))

Xinzhou, CHEN Xing, DOU Xiping, et al. Study on formation mechanism of turbidity maximum zone and numerical simulations in the macro tidal estuaries[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 84-92. (in Chinese))

[17] 陈甫源, 胡金春, 白咸勇, 等. 江道采砂对椒江河口的影响分析[J]. *泥沙研究*, 2008(3): 46-53. (CHEN Fuyuan, HU Jinchun, BAI Xianyong, et al. Effect of evacuating sand on Jiaojiang River Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2008(3): 46-53. (in Chinese))

[18] 张琴, 陶建峰, 张长宽, 等. 台州湾浅海滩涂大规模围垦下水动力变化分析[J]. *海洋通报*, 2015, 34(4): 392-398. (ZHANG Qin, TAO Jianfeng, ZHANG Changkuan, et al. Effect of the large-scale reclamation of tidal flats on the hydrodynamic characteristics in the Taizhou Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(4): 392-398. (in Chinese))

[19] YAO Yanming, CHEN Xueqian, YUAN Jinxiang, et al. Impacts of channel dredging on hydrodynamics and sediment dynamics in the main channels of the Jiaojiang River Estuary in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2023, 42(9): 132-144.

[20] 刘伟, 范代读, 涂俊彪, 等. 椒江河口春季悬沙输运特征及通量机制研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(1): 41-51. (LIU Wei, FAN Daidu, TU Junbiao, et al. Suspended transportation and flux mechanism of sediment in the Jiaojiang Estuary in spring[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 41-51. (in Chinese))

[21] DELTARES. Delft3D-hydro-morphodynamics user manual[M]. Delft: Deltares, 2024.

[22] PARTHENIADES E. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1965, 91(1): 105-139.

[23] EDMONDS D A, SLINGERLAND R L. Significant effect of sediment cohesion on delta morphology[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(2): 105-109.

[24] EGBERT G D, BENNETT A F, FOREMAN M G G. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1994, 99(C12): 24821-24852.

[25] DYER K R. Estuaries: a physical introduction[M]. 2nd. Hoboken: John Wiley & Sons, 1997.

[26] 李伯根, 王才洪, 周鸿权, 等. 近 70 a 来椒江河口河床冲淤调整机理[J]. *海洋学报*, 2009, 31(5): 89-100. (LI Bogen, WANG Caihong, ZHOU Hongquan, et al. Adjustment mechanism on the erosion and accretion of riverbed in the Jiaojiang Estuary in Zhejiang Province, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(5): 89-100. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-08-06 编辑: 熊水斌)

(上接第 46 页)

[36] 肖宜, 慈晓虎, 杨冰, 等. 长江中游城市群水资源绿色效率测度与影响因素分析[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(9): 8-16. (XIAO Yi, CI Xiaohu, YANG Bing, et al. Measurement and influencing factors of green efficiency of water resources in urban agglomerations in middle Yangtze River[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(9): 8-16. (in Chinese))

[37] 俞雅乖, 刘玲燕. 中国水资源效率的区域差异及影响因素分析[J]. *经济地理*, 2017, 37(7): 12-19. (YU Yaguai, LIU Lingyan. Regional differences and influence factors of water resource efficiency in China: based on super efficiency DEA-Tobit [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(7): 12-19. (in Chinese))

[38] 王语苓, 何伟. 南水北调工程受水影响区城市水资源利用效率测算与影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(1): 438-450. (WANG Yuling, HE Wei. Calculation of urban water resources utilization efficiency and analysis of its influencing fators in water affected areas of the South-to-North Water Diversion Project[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(1): 438-450. (in Chinese))

[39] 傅琴. 长江经济带新型城镇化对农业绿色全要素生产率影响研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2021.

[40] 张玉琴. 国家级大数据综合试验区试点政策对绿色全要素生产率的影响研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2023.

[41] 孙才志, 马奇飞, 李素娟. 中国水资源绿色效率 TFP 变化趋势预测[J]. *人民黄河*, 2018, 40(2): 42-48. (SUN Caizhi, MA Qifei, LI Sujuan. Prediction of water resources green efficiency TFP in China [J]. *Yellow River*, 2018, 40(2): 42-48. (in Chinese))

[42] 袁菊红, 陈拉, 胡绵好. “中四角”绿色水资源利用效率时空分异及其影响因素: 基于非期望产出 SBM-DEA 和地理探测器模型[J]. *生态经济*, 2023, 39(9): 138-147. (YUAN Juhong, CHEN La, HU Mianhao. Spatial-temporal differentiation of green water utilization efficiency and its influencing factors in “Four-City area in middle China”: based on SBM-DEA model with undesired outputs and geographical detector model[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(9): 138-147. (in Chinese))

[43] 曾晨. 沱江流域水资源绿色效率测度及影响因素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.

(收稿日期: 2024-05-27 编辑: 刘晓艳)