

文章编号: 1671-6833(2023)03-0012-08

## 黄河流域水资源利用水平及提升途径

左其亭<sup>1,2,3</sup>, 王鹏抗<sup>1</sup>, 张志卓<sup>1</sup>, 吴青松<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 水利与土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001; 3. 郑州大学 河南省水循环模拟与环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 基于对黄河流域水资源利用现状和问题的梳理分析, 讨论水资源利用率的相关概念, 采用“净水资源利用率”指标表征黄河流域水资源开发利用程度; 采用 Super-SBM 模型度量黄河流域水资源利用效率, 结合 Tapio 脱钩理论构建适配模型探究水资源利用与经济发展间的解耦状态, 分析水资源利用水平与经济发展之间的关系, 探讨黄河流域水资源利用水平的制约因素和提升途径。结果表明: ①2020 年黄河流域水资源利用率为 65%, 净水资源利用率为 58%, 虽然实际水资源利用强度并未有想象得高, 但是流域水资源开发利用依然处于过度状态; ②黄河流域水资源利用整体水平在研究期间呈现上升趋势, 九省区总体呈现出“下游高于中游高于上游”的空间格局, 不同的发展模式和自身特征导致了不同地区水资源利用水平的差异; ③水资源利用水平影响因素主要分为产业结构、科技水平、政策规制、经济发展、水利设施建设。最后针对影响因素提出了对应提升途径。

**关键词:** 水资源利用水平; 净水资源利用率; Super-SBM 模型; 提升途径; 黄河流域

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2023.03.017

水资源是人类社会进步和经济发展的基本支撑资源。人类历史上社会发展阶段的转变必然伴随着资源利用水平的提升, 水资源利用水平是衡量地区可持续发展的重要指标<sup>[1]</sup>。21 世纪以来, 水资源利用水平的提升受到了国际社会的广泛关注。2016 年 1 月,《2030 年可持续发展议程》在全世界范围内正式启动, 发布的 17 项可持续发展目标(SDGs)成为世界各国尤其是发展中国家未来发展的重要指引<sup>[2]</sup>, 其中多项 SDGs 的实现均要求对水资源利用水平和提升途径开展全面、深入的研究。2012 年, 中国政府明确提出实行最严格水资源管理制度, 把用水效率作为三条基本红线之一<sup>[3]</sup>; 2019 年黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略后, 水资源利用水平的提升成为流域未来发展的基本目标任务之一<sup>[4]</sup>; 2021 年,《黄河流域水资源节约集约利用实施方案》正式印发, 明确提出要强化水资源刚性约束, 提升流域水资源节约集约利用水平<sup>[5]</sup>。黄河流域水资源利用水平的全面提升已经成为黄河重大国家战略急需突破的瓶颈。

关于资源利用水平的量化研究由来已久, 由于资源供给和社会发展之间的矛盾愈发突出, 近年来国内外许多学者对资源利用水平(包括水资源<sup>[6]</sup>、化石能源<sup>[7]</sup>、土地资源<sup>[8]</sup>等)进行了广泛而深入的研究, 取得了大量研究成果, 逐渐形成了较为完备的理论和方法体系。目前常见的用于量化表征水资源利用水平的方法大致可分为 2 种: 一种是利用人均 GDP、净水资源利用率等单指标进行表征<sup>[9]</sup>; 另一种是基于多指标评估方法或者目标规划模型对水资源利用水平进行综合测算。应用目标规划模型(比如随机前沿分析<sup>[10]</sup>、数据包络分析<sup>[11]</sup>等)来量化水资源利用水平的研究在近年来成为主流。

本文采用净水资源利用率的概念对黄河水资源利用率进行测算。考虑到单一指标的局限性, 采用数据包络分析模型测算水资源利用效率, 来表征流域水资源利用水平, 并分析流域水资源利用水平和经济发展之间的适配关系, 探讨黄河流域水资源利用水平的制约因素和提升途径, 以期为推进黄河流域水资源节约集约利用、推动流域生态保护和高质量

收稿日期: 2022-07-15; 修订日期: 2022-08-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200201); 河南省重大公益性科技专项(201300311500); 河南省水利科技攻关计划项目(GG201947)

作者简介: 左其亭(1967—), 男, 河南固始人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源研究, E-mail: zuoqt@zzu.edu.cn。

引用本文: 左其亭, 王鹏抗, 张志卓, 等. 黄河流域水资源利用水平及提升途径[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(3): 12-19. (ZUO Q T, WANG P K, ZHANG Z Z, et al. Utilization level and improvement approach of water resources in the Yellow River Basin[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(3): 12-19.)

量发展提供参考。

## 1 黄河流域水资源利用现状及存在的问题

### 1.1 黄河流域概况

黄河是中国第二长河,发源于巴颜喀拉山脉,沿线经过青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省区<sup>[13]</sup>,最终汇入渤海。黄河全长5464 km,流域总面积 $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。黄河河川径流量仅占全国的2%,却支撑宁夏平原、河套平原、汾渭平原、华北平原等主要粮食产区的耕地灌溉,供给全国15%的人口用水,创造了全国14%的GDP。近年来,流域经济发展规模的高速扩张带来了更严重的水资源供需矛盾,破解水资源对经济社会的制约成为实现流域高质量发展的关键。

### 1.2 黄河流域水资源利用现状

21世纪以来,黄河流域水资源开发利用程度逐步提高,根据历年《黄河水资源公报》,流域总取水量由2000年的 $4.8068 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增加到2020年的 $5.3615 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,提升了11.5%,2019年总取水量高达 $5.5597 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,为历史新高。地表水取水量由2000年的 $3.4610 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增加到2020年的 $4.2617 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,提升了23.1%;地下水取水量有明显缩减,由 $1.3458 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 减少到 $1.0998 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,降低了18.3%。地下水取水占比不断减少,由2000年的28%减少至2020年的20.5%,可以看出近年来黄河流域对地下水的开采利用把控力度非常严格,最严格水资源管理制度的实行也取得了一定成效。从用水结构来看,农业用水占比显著降低,从2000年的78.7%减少到2020年的65.3%,这主要得益于流域农业用水模式的改进;工业用水占比也有所下降,从13.4%减少到10.6%;生活用水占比有较大提高,从4.5%增加到13.9%。

### 1.3 黄河流域水资源利用存在的问题

(1) 水资源本底不足。黄河流域地处干旱、半干旱气候区,水资源并不充沛,多年平均降水量仅为446 mm<sup>[14]</sup>,水资源总量为 $6.47 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,人均水资源量 $473 \text{ m}^3$ 仅占全国平均水平的18%。大气降水是黄河流域地表水和浅层地下水的主要补给来源,但降水具有年内集中、空间分布不均、年际变化大等特点。年内汛期6—9月份的降雨量占全年总量的70%以上,流域下游降水量远超过上中游内陆地区,年降水量的最大值与最小值相差数倍,弱化了流域的水资源本底,也加大了水资源的开发利用难度。

(2) 水资源开发利用强度高。黄河除了要满足流域9个省区的用水需求外,还承担着河北、天津等

流域外地区的供水任务。2020年黄河流域水资源总量为 $8.2429 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,供水区总取水量为 $5.3615 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,开发利用强度远超一般河流的阈值。黄河流域拥有多个重点生态功能区,承担着维护中国北方生态屏障的功能,但过高的开发利用强度削弱了河流的生态流量保障能力,威胁着流域生态安全,汾河、沁河、大黑河等重要支流也经常性地出现断流情况,对沿线河湖湿地生态功能造成了严重损伤。

(3) 经济社会发展用水需求日益扩张。黄河水资源开发利用强度已经接近上限,但流域经济社会发展规模还在快速扩张,部分核心城市群的发展势头依然迅猛,这将加剧流域水资源供需矛盾。在最严格水资源管理制度的约束下,流域水资源开发利用强度得到有效控制,但部分地区的生产活动受到一定影响,比如农业轮灌制度实行后,部分农田得不到充分灌溉,粮食产量的增幅有所下降。黄河流域经济社会发展和水资源利用之间尚未实现和谐平衡的状态。

(4) 水资源利用水平不高。黄河流域2020年万元GDP用水量高达 $56 \text{ m}^3$ ,农田灌溉水有效利用系数仅为0.56,相较于国内外先进地区仍有很大差距。为应对流域水资源利用水平落后问题,2021年12月多部门联合制定的《黄河流域水资源节约集约利用实施方案》明确指出,到2025年,流域万元GDP用水量要控制在 $47 \text{ m}^3$ 以内,农田灌溉水有效利用系数要提高到0.58,上游地级及以上缺水城市再生水利用率达到25%以上,可以看出目前黄河流域的水资源利用水平仍有较大的提升空间。

## 2 关于水资源利用率相关概念的讨论

### 2.1 相关概念对比分析

用于表征水资源开发利用程度的指标有很多,其概念和计算方法也众说纷纭,各不相同。比如,李东<sup>[15]</sup>分别从“水资源规划利用”和“水资源利用统计分析计算”2个角度对水资源利用率进行表述,认为其是水资源开发利用程度的一项指标,用于表征水资源量被耗用(即消耗利用)的程度。祝晓宇等<sup>[16]</sup>将地表供水量与多年平均地表水资源量的比值作为地表水资源开发利用程度,并且探讨了考虑与不考虑调入调出关系2种情况下的地表水资源开发利用率的计算公式。雷静等<sup>[17]</sup>提出水资源可开发利用率的概念,水资源可开发利用率 $=((\text{水资源可利用量}/\text{用水消耗系数})/\text{水资源总量}) \times 100\%$ 。

### 2.2 净水资源利用率

虽然众多学者对水资源利用率的概念和计算方法进行了深入探讨,但关键问题仍有待进一步讨论。

在用水计算中,用水总量包括部分维持生态系统自身稳定的水量,这些水量并没有用于人类自身,如果将这些用水量同工业、农业及生活用水一起计算到用水总量,显然不合理。针对该问题,左其亭<sup>[9]</sup>在 2011 年提出了净水资源利用率的概念和计算公式<sup>[9]</sup>:

$$W_{\text{净}} = W_{\text{总}} - W_{\text{非}}; \quad (1)$$

$$nr = \frac{W_{\text{净}}}{W_{\text{总}}}. \quad (2)$$

式中:  $W_{\text{净}}$  为净水资源利用量,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $W_{\text{总}}$  为水资源

利用总量,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $W_{\text{非}}$  为非人类直接利用水量,即水资源利用总量中一些非人类生产活动消耗的用水量(划分标准参照文献[9]),  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $nr$  为净水资源利用率。

### 2.3 黄河流域水资源利用率计算及对比分析

选取 2020 年黄河流域区及黄河全行政区(即黄河九省区)水资源数据,对黄河流域区和黄河九省区的一般水资源利用率与净水资源利用率进行对比分析,结果如表 1 所示。

表 1 2020 年黄河流域水资源利用率计算结果

Table 1 Calculation results of water resource utilization in Yellow River Basin in 2020

| 计算区域             | 地表水资源量/<br>$10^8 \text{ m}^3$ | 地下水<br>资源量/<br>$10^8 \text{ m}^3$ | 水资源<br>总量/<br>$10^8 \text{ m}^3$ | 地表水<br>供水量/<br>$10^8 \text{ m}^3$ | 地下水<br>供水量/<br>$10^8 \text{ m}^3$ | 供水<br>总量/<br>$10^8 \text{ m}^3$ | 生态用<br>水量/<br>$10^8 \text{ m}^3$ | 地表水<br>资源利<br>用率/% | 地下水<br>资源利<br>用率/% | 水资源<br>利用率/<br>% | 净水资源<br>利用率/% |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|------------------|---------------|
| 黄河流域区            | 717.56                        | 445.72                            | 824.29                           | 426.17                            | 109.98                            | 536.15                          | 54.63                            | 59                 | 25                 | 65               | 58            |
| 黄河九省区            | 5 601.30                      | 2 126.50                          | 6 490.80                         | 849.80                            | 363.40                            | 1 258.70                        | 114.90                           | 15                 | 17                 | 19               | 18            |
| 黄河八省区<br>(不含四川省) | 2 365.10                      | 1 477.40                          | 3 263.50                         | 622.00                            | 355.50                            | 1 021.80                        | 109.00                           | 26                 | 24                 | 31               | 28            |

2020 年黄河流域水资源总量  $8.2429 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 地表水和地下水总供水量  $5.3615 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 水资源利用率为 65%, 净水资源利用率为 58%。由于四川省黄河流域涉及面积远小于行政区面积,但水资源总量却占九省区一半,为减小误差,单独再对黄河八省区(不含四川省)水资源利用率进行分析。可以看出,虽然黄河流域实际水资源利用率并不高,但是水资源开发利用依然处于过度状态。而黄河九省区的水资源利用率相对较低,主要原因是九省区的供水格局更加丰富,存在众多跨流域调水工程,黄河并不是唯一的供水水源,削弱了黄河水资源在九省区水资源总量中的占比。该结果也在一定程度上印证了黄河流域水资源开发利用强度过高的事实。

## 3 黄河流域水资源利用水平与经济发展

### 3.1 问题提出

水资源利用水平是相对宏观的概念,仅用单指标有时难以对地区水资源利用水平进行较为全面、系统的量化表征。此外,水资源利用水平与经济社会发展的关系需要量化分析,如何量化二者关系、探究适配状态,是开展进一步研究的基础。

基于以上分析,本文拟采用数据包络分析模型测算黄河流域水资源利用效率。水资源利用效率是经济产出与资源、资本、人力、环境等生产要素投入的比率,用于表征地区水资源利用水平,采用 Tapio 脱钩模型分析流域水资源利用和经济发展之间的适

配关系。

### 3.2 研究方法 with 数据来源

#### 3.2.1 研究方法

(1) Super-SBM 模型。本文采用数据包络分析方法中的经典模型——Super-SBM 模型测算黄河流域水资源利用效率,对地区水资源利用水平形成更为全面的量化表征。假设共有  $n$  个 DMU,每个 DMU 有  $m$  种投入,记为  $x_i (i=1, 2, \dots, m)$ ,  $q$  种产出,记为  $y_r (r=1, 2, \dots, q)$ , 被评价的决策单元记为  $k$ , 则投入导向的 Super-SBM 模型可以表示为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} \min \rho = 1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{ik}}; \\ \text{s.t.} \sum_{j=1, j \neq k}^{nd} x_{ij} \lambda_j + s_i^- = x_{ik}, \sum_{j=1, j \neq k}^{nd} y_{rj} \lambda_j \geq y_{rk}, \lambda_j \geq 0, \\ i=1, 2, \dots, m; r=1, 2, \dots, q; j=1, 2, \dots, nd (j \neq k). \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为效率值;  $s_i^-$  代表投入指标的松弛变量;  $\lambda$  为 DMU 的线性组合系数。

(2) Tapio 脱钩模型。Tapio 脱钩理论是一种定量判别不同变量在时间序列上关系的理论,常用于分析不同对象间的时间适配程度,判别其脱钩状态。本文采用 Tapio 脱钩模型探究水资源利用与经济发展之间的适配关系。Tapio 脱钩模型表达式<sup>[19]</sup>:

$$TDI = \frac{\Delta b}{\Delta c} = \frac{(b_t - b_{t-1})/b_{t-1}}{(c_t - c_{t-1})/c_{t-1}}. \quad (4)$$

式中:  $TDI$  为变量  $b$  和  $c$  之间的脱钩指数;  $b$  和  $c$  为任意 2 个不同变量;  $\Delta b$ 、 $\Delta c$  分别为某时段  $b$  和  $c$  的

变化率;  $b_t$ 、 $c_t$  分别为时段末的  $b$  值和  $c$  值;  $b_{t-1}$ 、 $c_{t-1}$  分别为时段初的  $b$  值和  $c$  值。

### 3.2.2 数据来源

数据包络分析方法对投入产出指标选取的基本原则为尽量减少投入产出指标数量并尽可能包含更多的生产要素。基于此原则,本文从资源、资本、人力、生态环境4个维度选取了4个代表性指标作为投入变量。投入产出指标选取方案见表2。

表2 黄河流域水资源利用效率投入产出指标体系

Table 2 Input-output index system of water resources utilization efficiency in Yellow River Basin

| 指标类型 | 指标                            | 选取理由     |
|------|-------------------------------|----------|
| 投入指标 | 地区用水总量/ $10^8 \text{ m}^3$    | 代表自然资源投入 |
|      | 固定资产投资/亿元                     | 代表资本要素投入 |
|      | 地区从业人员数量/万人                   | 代表人力资源投入 |
|      | 废水中 COD 排放量/ $10^4 \text{ t}$ | 代表环境承载投入 |
|      | 废水排放总量/ $10^4 \text{ t}$      |          |
| 产出指标 | 地区 GDP/亿元                     | 反映经济效益产出 |

所有投入产出指标数据来源包括:九省区《水资源公报》、九省区《统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》、《中国城乡建设统计年鉴》以及中国国家统计局网站(<http://www.stats.gov.cn/>)。

### 3.3 计算结果

黄河流域九省区在2008—2020年的水资源利用效率  $WUE$  (water utilization efficiency) 时间变化情况如图1所示。基于测算结果,利用 ArcGIS10.2 软件绘制  $WUE$  的空间分布图,其空间分布特征如图2所示。

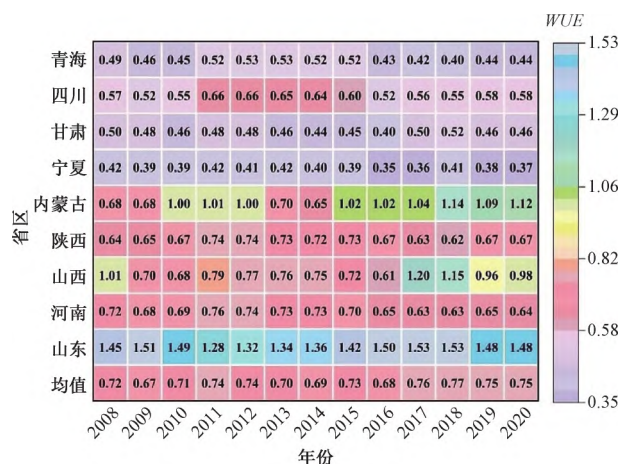
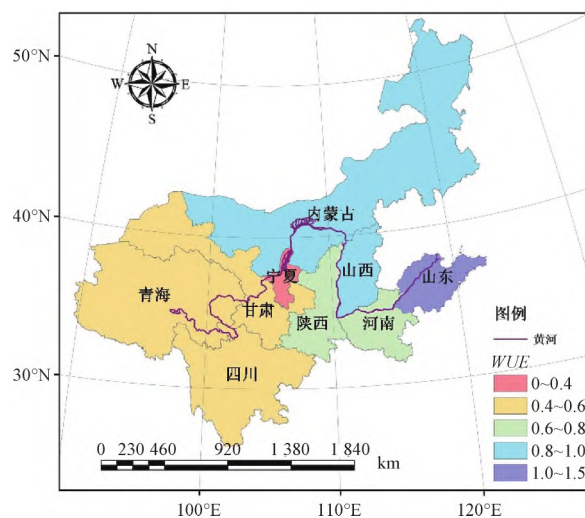


图1 2008—2020年黄河流域九省区水资源利用效率测算结果

Figure 1 Calculation results of water resources utilization efficiency of nine provinces and autonomous regions in the Yellow River Basin from 2008 to 2020

九省区的水资源利用效率在13年间得到小幅



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站的GS(2016)1600审图号标准地图制作, 底图无修改。

图2 黄河流域九省区多年平均水资源利用效率空间分布情况

Figure 2 Spatial distribution of perennial average water resources utilization efficiency in nine provinces of the Yellow River Basin

度提升,从2008年的0.72提升至2020年的0.75。总体呈现上升—下降—再上升的趋势,峰值出现在2018年(0.77),谷值出现在2009年(0.67),说明2018年黄河九省区整体水资源利用效率与生产前沿面较为接近,各地市水资源利用效率整体差距较小,2009年黄河九省区整体水资源利用效率与生产前沿面出现最大程度偏离;2016年之后偏离程度逐步缩小, $WUE$ 在2017—2020年4年间均在0.75及以上,达到较高水平。可以看出,近年来黄河流域对水资源利用效率的重视程度越来越高,水资源管理也取得了一定成效。

以  $WUE$  表征水资源利用效率,以人均GDP指标表征地区经济发展水平,利用Tapio脱钩模型识别九省区水资源利用和经济发展的适配关系,分别计算不同时段以及整个研究期的脱钩指数,结果如表3所示。

2009—2011年,除内蒙古和山东外,其余7个省区的水资源利用水平提升落后于经济发展水平的提升,表现为弱脱钩状态,内蒙古的扩张性连接是该时段九省区中最好的适配关系。2012—2014年,只有山东省的  $WUE$  处于生产前沿,在人均GDP稳步增长的情况下,其余省区的适配关系均呈现出强脱钩状态。2015—2017年,山东省的适配指数  $TDI$  已经有了很大提升,虽然仍处于弱脱钩状态,但水资源利用和经济发展之间的动态协同性不断提高;除山西和甘肃外,其余6个省区的适配关系有所弱化。

表 3 九省区水资源利用与经济发展水平适配状态(分时段)  
Table 3 Suitability of water resources utilization and economic development level in nine provinces and autonomous regions ( in different periods)

| 省区  | 2009—2011 年 |       | 2012—2014 年 |      | 2015—2017 年 |        | 2018—2020 年 |        |
|-----|-------------|-------|-------------|------|-------------|--------|-------------|--------|
|     | <i>TDI</i>  | 适配状态  | <i>TDI</i>  | 适配状态 | <i>TDI</i>  | 适配状态   | <i>TDI</i>  | 适配状态   |
| 青海  | 0.25        | 弱脱钩   | -0.08       | 强脱钩  | -2.92       | 强脱钩    | 0.99        | 扩张性连接  |
| 四川  | 0.55        | 弱脱钩   | -0.22       | 强脱钩  | -0.30       | 强脱钩    | 1.47        | 扩张性负脱钩 |
| 甘肃  | 0.02        | 弱脱钩   | -0.33       | 强脱钩  | 1.49        | 扩张性负脱钩 | -1.92       | 强脱钩    |
| 宁夏  | 0.15        | 弱脱钩   | -0.20       | 强脱钩  | -0.48       | 强脱钩    | -3.02       | 强脱钩    |
| 内蒙古 | 1.05        | 扩张性连接 | -3.11       | 强脱钩  | -0.18       | 强负脱钩   | -0.42       | 强脱钩    |
| 陕西  | 0.23        | 弱脱钩   | -0.12       | 强脱钩  | -0.65       | 强脱钩    | 1.29        | 扩张性负脱钩 |
| 山西  | 0.31        | 弱脱钩   | -0.83       | 强脱钩  | 3.26        | 扩张性负脱钩 | -3.34       | 强脱钩    |
| 河南  | 0.30        | 弱脱钩   | -0.14       | 强脱钩  | -0.52       | 强脱钩    | 0.27        | 弱脱钩    |
| 山东  | -0.48       | 强脱钩   | 0.18        | 弱脱钩  | 0.60        | 弱脱钩    | -0.62       | 强脱钩    |

2018—2020 年 ,甘肃、宁夏、内蒙古、山西、山东呈现强脱钩状态 ,四川、陕西呈现扩张性负脱钩状态 ,青海呈现扩张性连接状态 ,水资源利用与经济发展动态协同性整体有所改善。整个研究时段内 ,河南、陕西、宁夏、四川、青海 5 个省区的水资源利用和经济发展适配关系处于强脱钩状态 ,其中青海省适配程度最差 ,急需优化水资源利用模式;山东、山西、内蒙古、甘肃为弱脱钩状态 ,水资源利用与经济发展仍保持一定正向关联。

4 黄河流域水资源利用水平提升途径

4.1 水资源利用水平受经济发展影响分析

黄河流域水资源利用效率整体水平在研究期间呈上升趋势 ,其中内蒙古自治区增幅最大 ,由 2008 年的 0.680 提升至 2020 年的 1.124;青海省降幅最为显著 ,由 2008 年的 0.490 降低到 2020 年的 0.436 ,中上游宁夏回族自治区、甘肃省、青海省有所降低。九省区水资源利用水平提升的整体协调性较差 ,原因可能是内蒙古近些年开展基础水利设施更新改造 ,水资源投入有所减少 ,而青海省的经济产出增幅低于人力资源投入。另外 ,黄河流域水资源利用效率在空间上有着明显差异 ,上游内蒙古自治区、中游山西省、下游山东省的水资源利用效率较高;青海、四川、甘肃、宁夏等省区水资源利用效率较低;山东省一直占据九省区首位;宁夏回族自治区处于九省区末尾 ,总体呈现出“下游高于中游高于上游” ,其原因主要归结于地区自身特征不同 ,需要优化流域水资源配置 ,调整产业结构。

为了深层次剖析黄河流域水资源利用水平提升途径 ,结合以上分析并参考已有研究<sup>[12 20-21]</sup> ,对水资源利用水平影响因素进一步挖掘 ,主要分为产业结构、科技水平、政策规制、经济发展、水利设施建

设。不同的产业结构会对水资源利用水平有显著的影响 ,若产业结构中农业用水占比较大 ,由于其“高耗水量低经济效益”的特点 ,会导致水资源利用水平降低。科技水平对水资源利用水平起正向促进作用 ,通过研发高效节水用水及污水回收利用等设施和技术能够提高水资源利用水平。政策导向决定了地区对水资源方面的资金与精力投入 ,对水资源利用水平有强烈的方向性影响。经济发展意味着区域对水资源利用处理有更多的可投入资本 ,一般来说 ,区域经济发展越发达 ,其水资源利用水平越高。水利建设目的是为了提升对水资源的开发利用 ,在一定程度上具有促进作用 ,但是大量的工程建设会增加水资源的负担 ,不利于水资源利用水平的提升。

4.2 水资源利用水平提升途径

(1) 实施水资源消耗总量和强度双控。流域内县级及以上地区水行政主管部门应负责行政区内年度用水计划管理 ,全面覆盖年用水量过 50 000 m<sup>3</sup> 的企业、面积万亩以上的灌区 ,完善省、市、县(区)用水总量管理指标体系总体控制 ,实行用水总量控制指标分解措施 ,落实到具体河流和水源。分解落实并考核县级以上地方各级行政区供水总量、地表地下取水量、万元 GDP 用水量、各产业耗水量、万元工业增加值用水量、外调水可用水量、流域水量分配、农田灌溉水有效利用系数等指标。2025、2030 年应分别实现黄河流域“农田灌溉水有效利用系数为 0.58、0.61 以上 ,万元 GDP 用水量降幅为 15%、20% 以上 ,万元工业增加值用水量降幅为 10%、25% 以上”的水资源节约集约利用规划目标。

(2) 推动跨流域调水工程建设、完善供水保障布局。积极推动大型跨流域调水工程 ,缓解黄河流域水资源量不足问题 ,做到开源和节流双管齐下。根据流域各省区实际情况 ,合理建设相应调蓄供水

工程,积极推动青海省西宁市、陕西省陕北地区、甘肃省湟水北干渠、引大济湟等水利工程建设或扩建,为沿黄地区经济社会发展提供水资源支撑和保障。2025、2030年应分别实现“农村自来水普及率为91%、93%以上”。

(3) 推进非常规水源利用。非常规水源作为常规水源的重要补充,需要将其纳入水资源统一配置,进一步提升非常规水源在各产业的应用布局。推进陇东、宁东、蒙西等黄河流域大型工业和能源基地等矿井水综合利用,科学利用微咸水、苦咸水。加快实施苦咸饮用水水质改良和淡化利用,在水源条件较好的灌区,实施咸淡水混灌和咸淡水轮灌,合理利用浅层地下水灌溉替换黄河水。2025、2030年应分别实现“缺水城市再生水回用率为25%、30%以上”。

(4) 强化水资源刚性约束,完善水资源管理政策法规。严格落实“三条红线”,根据不同地区实际情况因地制宜地制定相应的水资源管理政策。强化省界断面,黄河干流、大夏河、大通河、渭河、湟水河、洮河等重要控制断面和生态流量控制断面的下泄流量、水量、水位监测,对水资源论证和取水许可要严格把控,不允许水资源超载地区新增取水许可,确保生态用水及地下水水位有效管控,到2025年建立基本的政策法规和技术标准体系。

(5) 推动农业、工业、生活3个重点领域节水。农业用水方面,甘肃黄河高抽灌区、宁蒙灌区、汾渭平原、下游引黄灌区等大中型灌区作为重要粮食生产区域,在保证作物产量的前提下,开展深度节水控水,逐步推广高效灌溉方式。工业用水方面,在“几字弯”能源基地、陇东能源基地等重点区域发展绿色能源产业,推广循环用水等高新技术工艺,完善工业用水价格体系,建立严格的超额用水标准。生活用水方面,厉行城市和农村节约用水,改造老旧城区的用水设施,确保新建城区采用节水器具,在黄河中上游贫困农村地区集中配套用水设施,推广日常节水工具,将节水型社会建设优秀的城市树立成典型,带动其周边市县,协同推进节水城市群建设进程。2025、2030年应分别实现“城市公共供水管网漏损率为9%、8%以下”。

(6) 完善区域水资源配置体系。始终把流域生态放在首位,按照优先保障生态流量用水原则,完善干支流水资源调度,确定重要支流主要控制断面的生态流量目标,制定生态补水应急措施方案同时推动流域内河流细化分配和跨地区河流配置。此外,做好与南水北调工程及大运河相关河流调度衔接,

推进三门峡、刘家峡、龙羊峡及小浪底主要水库的协调调度,构建以重要调水工程为主线、一大批大中型水库为连接点、重要河流湖泊为连接线的地表水网体系。2025、2030年应分别实现“水资源配置水网控制率为60%、80%以上”。

(7) 推动水利工程智慧化更新改造,加大对创新型节水技术研发的投入。针对流域内的老旧水利基础设施进行升级改造,配套完善灌区输水管道及泵站等基础设施,将传统的粗放管理方式转换为精细化信息系统管理,确保大型引黄灌区的改造和重点供水工程的高效开展,实现水量智能化计量及物联网设备水肥一体化,全面完成重要灌区的智慧化管理。2025、2030年应分别实现“重要水利工程智能化控制率为60%、85%以上”。

## 5 结论

本文测算了黄河流域2020年的净水资源利用率,分析了水资源利用水平,探究了水资源利用与经济发展间的解耦状态,提出了黄河流域水资源利用优化途径。根据研究得到如下结论。

(1) 2020年黄河流域水资源利用率为65%,净水资源利用率为58%,流域水资源开发利用依然处于过度状态;水资源利用水平在研究期间呈现上升趋势,空间差异明显。

(2) 水资源利用水平的主要影响因素包括产业结构、科技水平、政策规制、经济发展、水利设施建设等。

(3) 提出黄河流域水资源利用水平的提升途径主要包括实施水资源消耗总量和强度双控,推动跨流域调水工程建设、完善供水保障布局,推进非常规水源利用,强化水资源刚性约束,推动农业、工业、生活3个重点领域节水,完善区域水资源配置体系,推动水利工程智慧化更新改造,加大对创新型节水技术研发的投入。

实现水资源高效利用是黄河流域高质量发展的必经之路。水资源利用水平提升途径研究并非简单的命题,需要开展一系列系统、深入的研究,从而提出更具针对性的对策措施,为推进黄河流域生态保护和高质量发展献计献策。

## 参考文献:

- [1] 左其亭,吴青松,金君良,等. 区域水平衡基本原理及理论体系[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 165-173.
- ZUO Q T, WU Q S, JIN J L, et al. The basic principle

- and theoretical system of regional water balance [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(2): 165–173.
- [2] ADEEL Z. A renewed focus on water security within the 2030 agenda for sustainable development [J]. *Sustainability Science*, 2017, 12(6): 891–894.
- [3] 左其亭, 胡德胜, 窦明, 等. 基于人水和谐理念的最严格水资源管理制度研究框架及核心体系 [J]. *资源科学*, 2014, 36(5): 906–912.  
ZUO Q T, HU D S, DOU M, et al. Framework and core system of the most stringent water resource management system based on the concept of human-water harmony [J]. *Resources Science*, 2014, 36(5): 906–912.
- [4] 左其亭. 黄河流域生态保护和高质量发展研究框架 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(11): 1–6, 16.  
ZUO Q T. Research framework for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin [J]. *Yellow River*, 2019, 41(11): 1–6, 16.
- [5] 《黄河流域水资源节约集约利用实施方案》印发 [J]. *给水排水*, 2022, 58(1): 32.  
The implementation plan for the conservation and intensive utilization of water resources in the Yellow River Basin was printed and distributed [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58(1): 32.
- [6] SHI C F, LI L J, CHIU Y H, et al. Spatial differentiation of agricultural water resource utilization efficiency in the Yangtze River Economic Belt under changing environment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 346: 131200.
- [7] CHEN Y W, WONG C W Y, YANG R, et al. Optimal structure adjustment strategy, emission reduction potential and utilization efficiency of fossil energies in China [J]. *Energy*, 2021, 237: 121623.
- [8] LIU S C, XIAO W, LI L L, et al. Urban land use efficiency and improvement potential in China: a stochastic frontier analysis [J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 105046.
- [9] 左其亭. 净水资源利用率的计算及阈值的讨论 [J]. *水利学报*, 2011, 42(11): 1372–1378.  
ZUO Q T. Discussion on the calculation method and threshold of the net-utilization ratio of water resources [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(11): 1372–1378.
- [10] LAURETI T, BENEDETTI I, BRANCA G. Water use efficiency and public goods conservation: a spatial stochastic frontier model applied to irrigation in Southern Italy [J]. *Socio-economic Planning Sciences*, 2021, 73: 100856.
- [11] LIANG X D, LI J C, GUO G X, et al. Evaluation for water resource system efficiency and influencing factors in Western China: a two-stage network DEA-Tobit model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 328: 129674.
- [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] 左其亭, 吴青松, 姜龙, 等. 黄河流域多尺度区域界定及其应用选择 [J]. *水利水运工程学报*, 2022(5): 12–20.  
ZUO Q T, WU Q S, JIANG L, et al. Multi-scale regional definition and its application selection in the Yellow River Basin [J]. *Hydro-science and Engineering*, 2022(5): 12–20.
- [14] 牛玉国, 王煜, 李永强, 等. 黄河流域生态保护和高质量发展水安全保障布局 and 措施研究 [J]. *人民黄河*, 2021, 43(8): 1–6.  
NIU Y G, WANG Y, LI Y Q, et al. Water security layout for the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin [J]. *Yellow River*, 2021, 43(8): 1–6.
- [15] 李东. 浅析水资源开发利用与水电开发率 [J]. *中国水能及电气化*, 2010(5): 31–35.  
LI D. Analysis on water resources development and utilization rate and hydropower development rate [J]. *China Waterpower & Electrification*, 2010(5): 31–35.
- [16] 祝晓宇, 张海涛, 杜富慧, 等. 基于调入调出关系的地表水开发利用效率研究 [J]. *人民黄河*, 2022, 44(1): 67–70.  
ZHU X Y, ZHANG H T, DU F H, et al. Analysis of development and utilization rate of surface water in primary water resources area based on the relationship between transfer in and out [J]. *Yellow River*, 2022, 44(1): 67–70.
- [17] 雷静, 张琳, 黄站峰. 长江流域水资源开发利用效率初步研究 [J]. *人民长江*, 2010, 41(3): 11–14.  
LEI J, ZHANG L, HUANG Z F. Preliminary study on development rate of water resources in Yangtze River Basin [J]. *Yangtze River*, 2010, 41(3): 11–14.
- [18] 左其亭, 张志卓, 马军霞. 黄河流域水资源利用水平与经济社会发展的关系 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(10): 29–38.  
ZUO Q T, ZHANG Z Z, MA J X. Relationship between water resource utilization level and socio-economic development in the Yellow River Basin [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(10): 29–38.
- [19] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137–151.

- [20] 左其亭,姜龙,马军霞,等. 黄河流域高质量发展判断准则及评价体系[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 1-8, 22.
- ZUO Q T, JIANG L, MA J X, et al. Judgment criteria and evaluation system for high-quality development of the Yellow River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 1-8, 22.
- [21] ZUO Q T, HAO M H, ZHANG Z Z, et al. Assessment of the happy river index as an integrated index of river health and human well-being: a case study of the Yellow River, China [J]. Water, 2020, 12(11): 3064.

## Utilization Level and Improvement Approach of Water Resources in the Yellow River Basin

ZUO Qiting<sup>1 2 3</sup>, WANG Pengkang<sup>1</sup>, ZHANG Zhizhuo<sup>1</sup>, WU Qingsong<sup>1</sup>

(1.School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2.Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3.Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the current situation and problems of water resources utilization in the Yellow River Basin, this study examined the related concepts of utilization rate of water resources, and put forward the index of "net-utilization ratio of water resources" to represent the development and utilization of water resources in the Yellow River Basin. Super-SBM model was further used to quantify utilization rate of water resources in the Yellow River Basin, and an adaptation model was constructed by combining Tapio theory to explore the decoupling state between water resources utilization and economic development. The restrictive factors and ways to improve the utilization level of water resources in the Yellow River basin were discussed. The results showed that: ① In 2020, the utilization rate of water resources in the Yellow River Basin was 65%, and the net-utilization rate of water resources was 58%. Although the actual water resources utilization intensity is not as high as imagined, the development and utilization of water resources in the basin was still in an excessive state. ② The overall level of water resources utilization in the Yellow River Basin showed an upward trend during the study period, and the spatial pattern of "higher in the lower reaches than in the middle reaches than in the upper reaches" was generally presented in the nine provinces. Different development patterns and characteristics led to the differences of water resources utilization in different regions. ③ The influencing factors of water resources utilization level were mainly divided into industrial structure, scientific and technological level, policy regulation, economic development and water conservancy facilities construction. Finally, corresponding improvement approaches were proposed for the influencing factors.

**Keywords:** water resource utilization level; net-utilization ratio of water resources; Super-SBM model; improvement approach; Yellow River Basin