

面向关中地区水网韧性提升的水库群优化调配研究

黄生志¹, 闫俊¹, 郭恂², 黄强¹, 周伟³, 冯仲恺⁴, 于磊¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048;
3. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001; 4. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为研究水网建设及水网优化调配技术对陕西省关中地区水资源系统韧性演变的影响,基于复杂网络理论构建了水资源系统韧性评价指标体系,分别以 2020 年、2035 年为基准年和规划水平年,计算了水网建设前后基准年和规划水平年采用优化调配技术的水资源系统韧性;结合引汉济渭工程、东庄水库与古贤水库供水工程、关中地区主要 8 座大中型调蓄水库、地下水资源及非常规水源的联合调配,构建了关中地区水库群水网的优化调度模型与优化配置模型,并采用动态规划法和遗传算法对模型进行求解,分析了基准年与规划水平年水资源的供需平衡情况。结果表明:经水库群联合优化调配后,基准年关中地区除杨陵的水资源系统韧性均有所提升,整体韧性从 31.11 提高至 32.22,提高了 3.57%;规划水平年水资源系统的韧性从 44.05 提升至 44.51,较优化调配前提高了 1.04%;水网建设后水资源系统的韧性从 31.11 提高到 44.05,提高了 41.59%。

关键词:水网;水资源系统韧性;优化调度;优化配置;关中地区;陕西省

中图分类号:TV212.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)05 - 0258 - 10

Optimization and allocation of reservoir groups for enhancing the resilience of water network in Guanzhong area// HUANG Shengzhi¹, YAN Jun¹, GUO Yi², HUANG Qiang¹, ZHOU Wei³, FENG Zhongkai⁴, YU Lei¹(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Shaanxi Provincial Hydroelectric Survey and Design Institute, Xi'an 710001, China; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the influence of water network construction and water network optimization and allocation technology on the evolution of water resources system resilience in Guanzhong area of Shaanxi Province, an evaluation index system for water resources system resilience was constructed based on the complex network theory. The water resources system resilience before and after the construction of the water network in the base year and planning year of 2020 and 2035 is calculated by using the optimized allocation technology. Optimized dispatch model and optimized configuration model of the water network of the Guanzhong reservoir group were constructed combining with the Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project, the Dongzhuang and Guxian reservoir water supply projects, eight major medium-to-large-scale regulating reservoirs in Guanzhong area, groundwater resources, and unconventional water sources. The model is solved by dynamic programming and genetic algorithm, and the balance between water supply and demand in the base year and planning year is analyzed. The results show that after the joint optimization and allocation of the reservoir group, the water resources system resilience in Guanzhong area has been improved except for Yangling, with the overall resilience improving from 31.11 to 32.22, an increase of 3.57%; the resilience of the water resources system in the planning year is increased from 44.05 to 44.51, a 1.04% improvement compared to the pre-optimization allocation scenario; the resilience of the water resources system increased from 31.11 to 44.05, an increase 41.59%, after the construction of the water network.

Key words: water network; water resources system resilience; optimized scheduling; optimized allocation; Guanzhong area; Shaanxi Province

水资源系统的韧性是指在综合考虑气象、水文、等多种因素的基础上,推动流域(区域)的可持续发展、经济发展、社会保障、生态环境、基础设施、优化调配,增强水资源系统应对未来不确定性和实现可持

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202305);陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2023JC-XJ-19)
作者简介:黄生志(1988—),男,教授,博士,主要从事气象变化与风险调控研究。E-mail:huangshengzhi7788@126.com
通信作者:闫俊(1999—),女,硕士研究生,主要从事水库群优化调度与配置研究。E-mail:974109939@abc.com

续发展的能力。国家“十四五”规划指出,扎实推进黄河流域生态保护和高质量发展,注重优化流域发展格局,在此背景下,韧性发展成为黄河流域发展的重要方向。目前对韧性的定量评估及演变分析是相关领域的前沿科学问题之一。科学认识水资源系统韧性,发展有效、系统的水安全保障技术,已经成为区域高质量发展过程中的重要科技支撑^[1]。提升水资源系统韧性可以通过工程措施和非工程措施两大途径实现,工程措施主要指水网工程的建设,通过建设水网调蓄工程来解决水资源时空分布不均的问题,从供给侧提升水资源系统的韧性;非工程措施则是基于区域水网工程开展水网优化调配,是实现“安全可靠、节约高效、调控有序”水网工程建设目标的关键技术^[2]。

目前,国内外学者大多采用综合评价法来评估水资源系统的韧性。例如:王红瑞等^[3]认为,水资源系统韧性的影响因素可以从抵抗性、恢复性和适应性3个角度进行分析;赵志龙等^[4]基于这3个角度选取韧性指标,构建了韧性评价指标体系;Yu等^[5]则从水资源系统的禀赋条件、受灾情况及外部因素出发,综合评估了水资源系统的韧性;陈燕飞等^[6]采用基于改进层次分析法的可变模糊识别模型对汉江流域中下游水环境韧性进行了评价;范志鹏等^[7]构建了水网节点的概化图,并采用复杂网络理论进行分析,基于网络效率和最大连通子图,构建了水网韧性评估模型,为长江黄河等跨流域水网的韧性提供了定量评估方法;张鑫等^[8]将水网工程抽象为复杂网络,采用PageRank算法评估水网节点的重要性;李锋等^[9]则将复杂网络理论引入水网工程中,模拟在随机攻击或自然灾害中,节点失效后水网韧性的变化,从而评估节点对水网结构整体和局部的影响;刘欢等^[10]基于水网视角,根据适配理论和水资源多维属性理论,提出了包含资源层、社会层、经济层和生态层的水资源与关联要素适配性评价方法,并应用于南水北调中线一期工程影响区;万芳等^[1]应用混沌理论对流域水资源系统韧性演变及传播特征、韧性水平进行了分析。总体而言,基于综合评价法的水资源系统韧性评估体系能够将传统的被动风险应对转化为积极主动的风险管理策略。在水资源系统韧性评估中,通常从抵抗性、恢复性和适应性3个角度进行分析,并结合复杂网络理论对水网韧性进行研究。

水资源配置策略应依据不同用水行业、供水水源及区域特征,合理调配水资源,挖掘潜力并拓展稳定水源,通过科学配置实现水资源的高效利用,进一步优化和完善水资源配置格局,以确保资源的可持

续发展和区域间的均衡供给^[11-13]。水资源具有时空分布不均的特征,黄河流域各区域的水资源供需状况与水资源的丰枯变化不匹配,导致工程性缺水问题尤为突出,具体表现在区域间水资源配置工程的不足,以及城乡水源工程在覆盖面与效能上的短板。水网建设和水资源优化调配对于提升水资源系统韧性具有显著影响,但目前关于水资源系统韧性提升效能的定量研究仍显不足,且现有研究尚未深入探讨水库群优化调配技术与水网建设在系统韧性提升中的具体作用机制。因此,系统地剖析水网建设与水资源优化调配对水资源系统韧性提升的效能及其影响机制,具有重要的理论意义和实践价值。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文关中地区指西安市、咸阳市、渭南市、宝鸡市、铜川市和杨陵区五市一区,目前形成了以黄河、渭河流域陕西区域内各水系为基础,以石头河、桃曲坡、黑河金盆(以下简称“金盆”)、石砭峪、李家河、亭口、涧峪、酒河等大中型水库及其供水工程为依托的区域城乡供水网络。依托宝鸡峡、冯家山、石头河、桃曲坡、泾惠渠、交口抽渭、东雷抽黄(一期、二期)、洛惠渠、羊毛湾等水源工程形成大中型灌区的独立供水网,基本保障了关中地区灌溉用水^[14]。同时,通过引嘉济清、引红济石、引渭济黑、引乾济石、引汉济渭等跨流域调水工程建立了沟通长江水系的输水通道。

关中地区是陕西水网建设的核心区域,依托“引汉济渭总干线”和引嘉济清、引红济石、引渭济黑、引乾济石等跨流域调水工程形成贯通长江(汉江、嘉陵江)、黄河(渭河)两大流域的输水通道,构建“北塬横线”“渭北横线”“岭北横线”3条横线来保障区域供水安全。关中地区现状(2020年)水源工程和规划水平年(2035年)水网工程分布见图1。

1.2 数据来源

收集整理西安市、咸阳市、渭南市、宝鸡市、铜川市、杨陵区五市一区供水水库数据,选择冯家山水库、石头河水库、桃曲坡水库、金盆水库、石砭峪水库、李家河水库、涧峪水库、酒河水库共8座水库进行分析,研究数据包括历年水库入库径流(1979—2020年)、水位-库容关系曲线以及经济社会数据、气象水文数据、供用水数据、水网建设信息等,来源于中国气象数据(<http://data.cma.cn/>)、国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)、中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/DOI/doiList.aspx>)、水资源公报、陕西统计年鉴

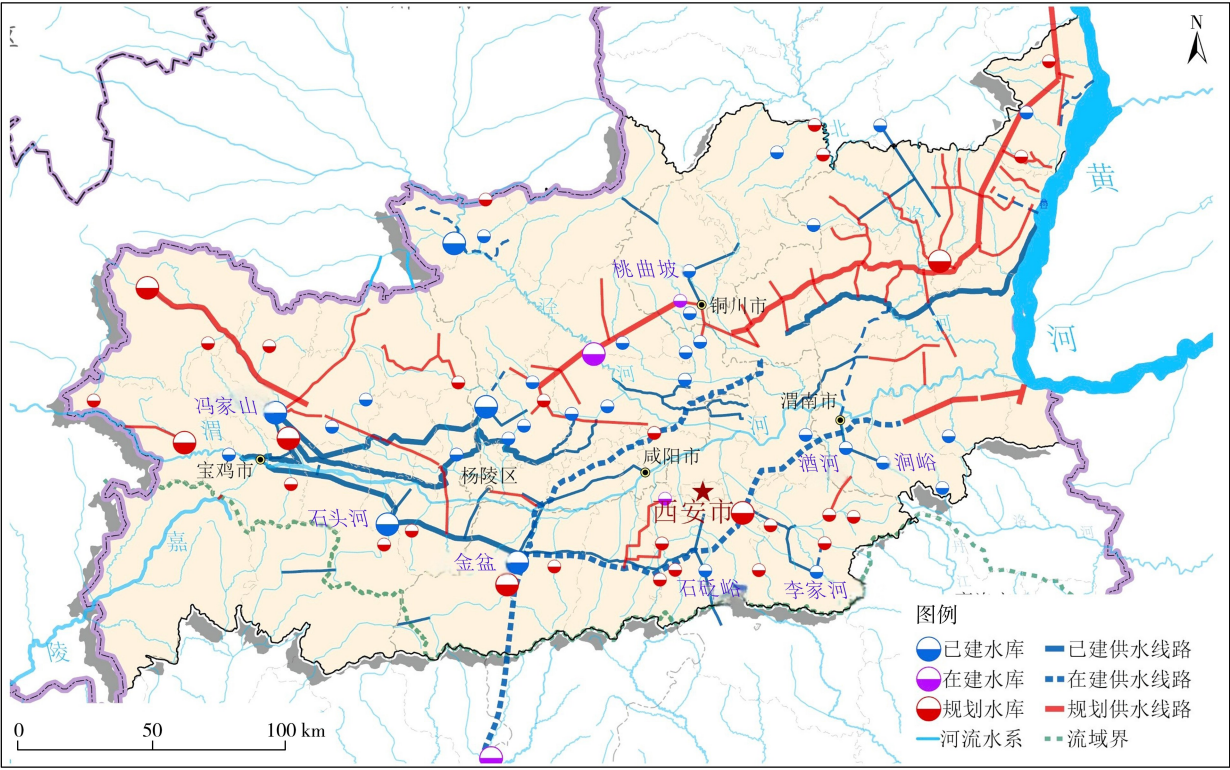


图 1 关中地区现状水源工程和规划水网工程分布

Fig. 1 Distribution of current water source projects and planned water network projects in Guanzhong area

以及《陕西省水网建设规划》等。

2 模型与方法

复杂网络作为一种有机体系的表示方式,被广泛运用于自然科学和社会科学领域^[15]。在复杂网络理论中,节点指标通常用于从多个角度对网络的特征进行定量评估,且常通过多维度的指标对网络进行综合分析。作为复杂网络的一种,水网的形态和功能特征亦可通过不同的节点指标来表征。本文选取复杂网络中的平均度、接近中心度、介数中心度等关键指标及 K-shell 分解对水网节点进行综合评价。这些指标能够有效反映水网在结构上的连接性、节点的重要性及信息流通的效率等特征。其中平均度是用来衡量网络稀疏性或稠密性的指标,表示水网稠密程度,平均度越大水网越密;接近中心度用于衡量节点重要性,表示水网节点之间的互联互通能力;介数中心度是以经过某个节点的最短路径的数目来刻画节点重要性的指标,能够揭示出对水网互联互通产生较大影响的关键节点,介数中心度越高,意味着其他节点之间的最短路径中,更多的路径必须经过该节点作为中转,表明该节点在水网中起着至关重要的连接作用。K-shell 方法是一种基于复杂网络全局结构的粗粒化分解方法,通过去除不重要的节点,根据节点在网络中的位置判断节点的重要性。为进一步细化分析,本文依据关中地区

的节点数据按五市一区划分,并将各市区的相同节点指标融入水资源系统韧性综合评价体系中。通过这一方式,能够更全面地评估水网在不同地区的韧性表现,为区域水资源管理提供更加精准的决策支持。

2.1 关中地区水资源系统韧性评价指标体系

2.1.1 评价指标体系构建

水资源系统的韧性不仅体现在其对单一干扰的应对能力,更关键在于其对各种复杂、动态干扰的综合应对能力。因此,水资源系统韧性的评估应从多维度出发,全面考量其抵抗性、恢复性与适应性。本文依据水资源系统韧性的核心特征,结合自然、社会、经济、生态等多领域因素以及水网节点的关键指标^[16],构建了陕西省水资源系统韧性评价指标体系,对评价指标采用 AHP-熵权法确定主客观权重^[17],结果如图 2 所示(括号中数据为指标权重),其中人均用水量指标、缺水率指标为负向指标,其余指标为正向指标。

准则层恢复性权重最大,适应性权重最小;对指标层而言,抵抗性中人均水资源量和水网疏密度权重相对较大,恢复性中地下水生产能力占比权重最大,适应性中排水管道长度、生态环境用水量、人均园林绿化面积权重相对较大。17 项指标中,地下水生产能力占比、非常规水供水比例、人均水资源量、水网疏密度和节点重要性 5 项指标权重相对较大。

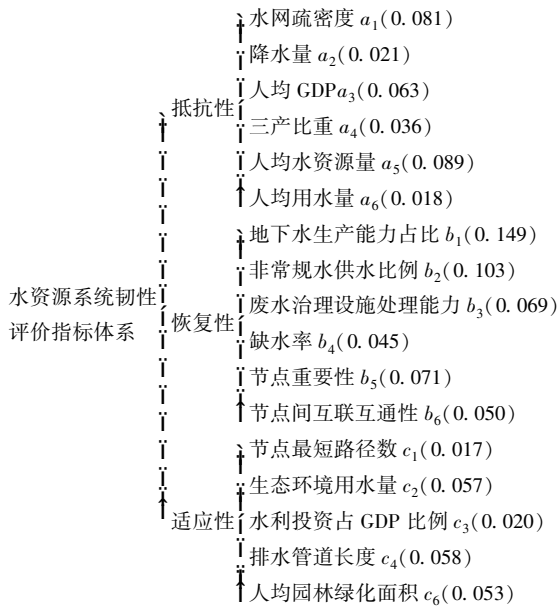


图 2 关中地区水资源系统韧性评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of resilience of water resources system in Guanzhong area

2.1.2 水资源系统韧性分级标准制定

为便于分析各区域水资源系统韧性水平,对各区域的水资源系统韧性水平进行纵横向比较,以基准年各区域水资源系统的抵抗性、恢复性、适应性水平的最小值之和取整作为下限,以一个区域韧性水平理论最大值作为上限。参考赵志龙等^[18-20]韧性评价的分级标准,结合陕西省实际情况将关中地区水资源系统韧性等级划分为强韧性(70~100)、较强韧性(55~<70)、中等韧性(40~<55)、较低韧性(25~<40)、低韧性(0~<25) 5 个评价等级。

2.1.3 水资源系统韧性评价

利用指标权重值与标准化后的指标值计算水资源系统的韧性水平,计算公式如下:

$$R = \sum_i y_i w_i \quad (1)$$

式中: R 为水资源系统韧性; y_i 为评价指标 i 归一化后的值; w_i 为评价指标 i 的权重。

2.2 关中地区水网工程优化调度模型与优化配置模型构建

2.2.1 关中地区水资源优化调度模型

本文采用动态规划法对水库调度进行优化,在不超出各节点地下水可开采量限制的前提下,以水库供水量、调水工程调水量最大为目标,依据水源类别、水库相关工程参数、可用水量等信息,以 2020 年为基准年,2035 年为规划水平年,分别构建基准年和规划水平年的优化调度模型。其中,基准年的优化调度模型不考虑引汉济渭工程、东庄水库和古贤水库供水,以各水库供水量最大为目标构建优化调度模型;规划水平年的优化调度模型考虑引汉济渭

工程优化后的调水过程,东庄水库和古贤水库年均向关中地区供水量分别为 4.35 亿、10.01 亿 m^3 。

a. 目标函数。基准年目标函数为水库供水量最大,规划水平年目标函数为引汉济渭工程调水量最大。其中,规划水平年本地 8 座水库求解方法与基准年相同,不考虑东庄水库和古贤水库参与调蓄。对引汉济渭工程选择以月尺度为时段,按黄金峡水库优先供水、三河口水库蓄补调节的模式,经长系列(1954—2009 年)调节,确定其调水量求解策略。

b. 约束条件。约束条件包括水库的水量平衡、库容、水位、水量等非负约束和生态流量以及工程允许调水量等。

2.2.2 关中地区水资源优化配置模型

关中地区水资源系统较为复杂,涉及多种水源和不同类型的供水工程,优化配置时需考虑用水部门不同优先次序。同时,水源与受水单元之间、用水部门与各水源之间也存在交叉供配关系。因此,在构建水资源优化配置模型之前,需要明确水资源系统中的供水水源、输配水工程的供给关系、受水节点之间的供给关系和用水部门的层次,明确各水源与当地重点市区的供给关系,并基于此建立符合关中五市一区各元素之间水量输配关系的水资源供水网络拓扑图,具体供水网络概化结果见图 3。

在基准年配置中,考虑了石头河水库对杨陵、咸阳、宝鸡、西安的供水情况;在规划水平年配置中,考虑了引汉济渭工程向杨陵、咸阳、渭南、西安供水,东庄水库向西安、铜川、咸阳(三原县)、渭南(富平县)供水,以及古贤水库向渭南供水。

按照配置原则,各水源和用水部门的供用水的优先次序如下:①先利用再生水。先满足生态用水,剩余部分供给工业。②然后利用外调水。为合理配置外调水源,杜绝外调水量弃水情况的发生,优先利用外调水供给重点市区,先保障生活需求,后保障工业需求。③再利用当地地表水。当地地表水在满足农业灌溉、生态任务后,再供给城镇生活与工业用水。④最后利用当地地下水。考虑关中地区地下水超采的实际情况,减少地下水开采,保护和涵养地下水,地下水调节补充当地地表水配水后的缺口,先保障生活,后保障工业。

2.2.2.1 目标函数和约束条件

本文目标函数中选择的目标主要为经济效益和社会效益,在单一水源向多单元配置中考虑其经济效益以及社会效益最大化为目标,构建目标函数。其中,社会效益最大化表现为缺水率最小。

a. 经济效益目标。以基准年和规划水平年各子区配水或各行业供水净效益最大作为经济效益目

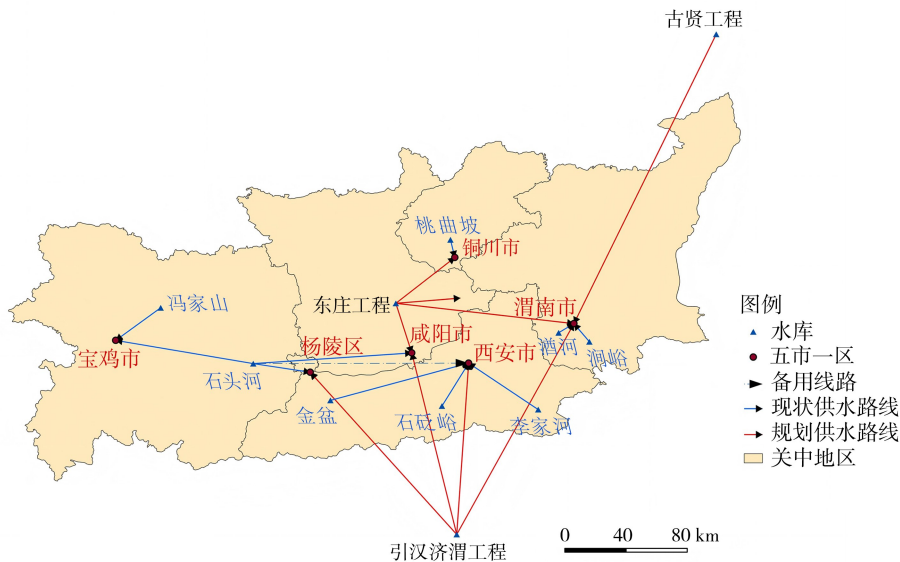


图3 关中地区供水拓扑关系

Fig.3 Topological relationship of water supply in Guanzhong area

标。计算公式为

$$\max f_1(x) = \max \left[\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (b_{jk} - c_{jk}) x_{jk} \beta_{jk} \right] \quad (2)$$

式中: $f_1(x)$ 为社会经济效益; b_{jk} 为供水效益系数, 具体为 k 区域 j 用水户的用水量对应效益系数; c_{jk} 为 k 区域 j 用水户的单位供水量费用系数, 元/ m^3 ; x_{jk} 为水源向 k 区域 j 用户的供水量, m^3 ; β_{jk} 为 k 区域 j 用水户的用水公平系数, 表示 k 区域内的 j 用水户相对其他用水户优先得到供给的重要性程度^[21]; J 为区域总数; K 为用水户总数。

b. 社会效益目标。在社会效益目标评估中, 主要以代表性指标为主予行评估, 本文采用各区域总缺水量来评估^[22]:

$$\max f_2(x) = \min \left[\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (D_{jk} - x_{jk}) \right] \quad (3)$$

式中: $f_2(x)$ 为社会效益; D_{jk} 为 k 区域 j 用水户的需水量, m^3 。

c. 约束条件。约束条件包括需水量约束、供水能力约束、非负约束等。

2.2.2.2 求解方法

优化配置模型涉及变量诸多, 包括诸多用户、水源、区域等^[22], 而且变量之间存在密切关联性, 同时还存在耦合约束条件, 模型计算难度较大, 而遗传算法作为一种基于种群的智能优化算法, 具有收敛速度快、解集空间多样性和寻优能力强等特点, 非常适合解决多目标优化问题^[23], 因此优化配置模型采用遗传算法求解。关中地区水资源优化配置模型涉及不同区域的水资源分配, 问题的约束条件较为复杂且可能具有多个局部最优解, 遗传算法通过模拟自然选择和基因变异的过程, 能够在较大的解空间中

进行全局搜索, 从而避免陷入局部最优解。

关中地区水资源配置主要以生活、工业、农业、生态 4 种类型为主, 模型参数设置如下:

a. 用水公平系数。根据用户的性质和重要性, 关中地区的用水户优先得到供给的次序一般为生活用水、工业用水、农业用水、生态用水, 不同子区的情况略有不同。基准年石头河水库供水, 用水公平系数为

$$\beta_{jk} = (1 + n_{\max} - n_i) / \sum_{i=1}^l (1 + n_{\max} - n_i) \quad (k, j = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

式中: n_i 为水源 i 的供水序号; $n_{\max}$ 为水源最大供水序号; 下标 k 代表杨陵、咸阳、宝鸡、西安 4 个子区, j 代表生活、工业、农业、生态 4 种用水类型。由式(4)计算得到基准年各个子区的生活、工业、农业、生态用水公平系数分别为 0.4、0.3、0.2 和 0.1, 规划水平年(考虑引汉济渭工程和东庄水库供水)各子区的生活和工业用水公平系数分别为 0.6 和 0.4。

b. 用水效益系数。不同类型用水的效益系数取值方式不同。①工业用水效益系数取工业万元增加值取水量的倒数^[22]; ②农业用水效益系数按灌溉后的农业增产效益乘以水利分摊系数确定^[22]; ③生活与生态用水效益是间接而复杂的, 不仅有经济方面的因素, 而且还有社会效益存在, 因此其效益系数一般难以定量化, 根据居民生活、环境用水优先满足的配置原则, 为保证其得到满足, 效益系数赋予较大值。生活用水效益计算公式为

$$B_L = VfQ = \text{ref}Q/p \quad (5)$$

式中: B_L 为生活用水效益, 元; V 为单位生活用水价格, 元/ m^3 ; f 为引水效益分摊系数, 即在引调水工程

与生活水平进步之间分摊,可参照邻近地区已有研究成果取值; Q 为受水区居民生活实际利用的引调水量, m^3 ; r 为居民年人均可支配收入,元; e 为恩格尔系数; p 为人均年用水量, m^3 。基准年生活、工业、农业、生态用水效益系数分别为 900、813、550、500、500 元/ m^3 ,规划水平年生活、工业供水效益系数分别为 1 200、960 元/ m^3 。

c. 供水量用水费用系数。不同子区、不同用户用水费用系数不同,而不同行政区划也会导致费用系数不同,在子区内取其费用系数的平均值确定^[21]。参照临近地区相关情况,生活、工业用水费用系数分别取 2.9、1.8 元/ m^3 。同时,根据信息论中关于熵权法的定义及运用要求,计算确定社会目标函数权重为 0.6,经济目标函数权重为 0.4。

d. 遗传算法参数,设定最终种群规模数量为 100,交叉概率为 0.7,变异概率为 0.01,最大迭代次数为 2 000。

3 计算结果与分析

3.1 水资源优化调配结果

通过求解基准年优化调度模型,得到多水源优化调度结果,包括当地地表调蓄水库(冯家山、石头河、桃曲坡、金盆、石砭峪、李家河、涧峪、酒河水库)的长系列入库径流、时段水位、时段下泄流量以及时段可供流量过程。以石头河和李家河两座水库为例,图 4 为月水位的整体趋势,图 5 和图 6 分别为两水库长系列来水、水位和供水过程。

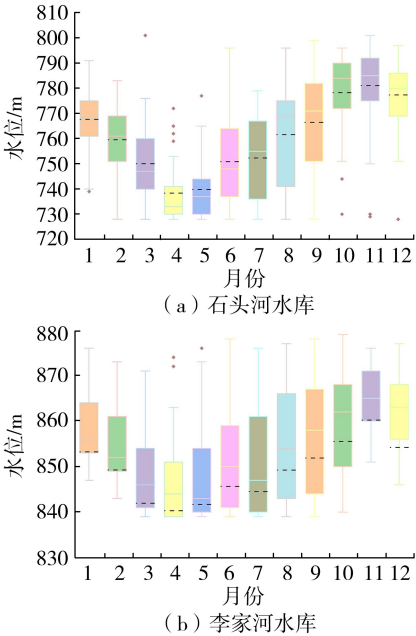


图 4 石头河、李家河水库月水位箱线图
Fig. 4 Monthly water level box diagram of Shitouhe Reservoir and Lijiahe Reservoir

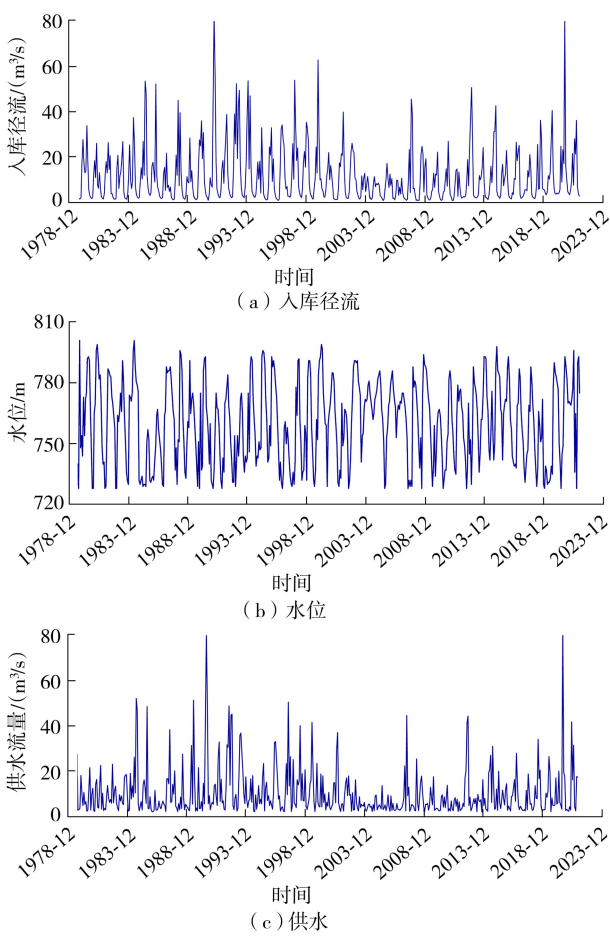


图 5 石头河水库 1979—2022 年运行过程
Fig. 5 The operation process of Shitouhe Reservoir from 1979 to 2022

在基准年无外调水源的情况下,当地水库开始增加供水。若长时间处于枯水期,水库实际水位接近死水位,表明地表调蓄库容仍不足,此时需依赖地下水补充用水缺口;若长期处于丰水期,水库水位接近正常蓄水位,汛期受防洪限制,地表水源工程可能会出现较多弃水现象。

规划水平年由于冯家山、石头河、桃曲坡、金盆、石砭峪、李家河、涧峪、酒河水库所选取的长系列径流与基准年一致,故这 8 座水库规划水平年长系列运行过程优化调度结果与基准年一致。引汉济渭工程调度原则中,黄金峡水库优先供水,三河口水库蓄补调节,以满足多年平均调水 15 亿 m^3 为前提,同时保证不超过汉江允许的可调水量,满足黄金峡、三河口水库基本生态流量,确定最大调水量目标,判断是否达标。引汉济渭工程调水过程如图 7 所示。

当外调水资源相对充裕时,关中地区规划水平年容易出现当地水库弃水的问题;而在来水量较为枯竭的情况下,即使引汉济渭工程与当地水库联合运行,也可能难以满足所有用水户的用水需求。因此选取 1982 年 7 月至 1985 年 6 月 3 年典型丰水期

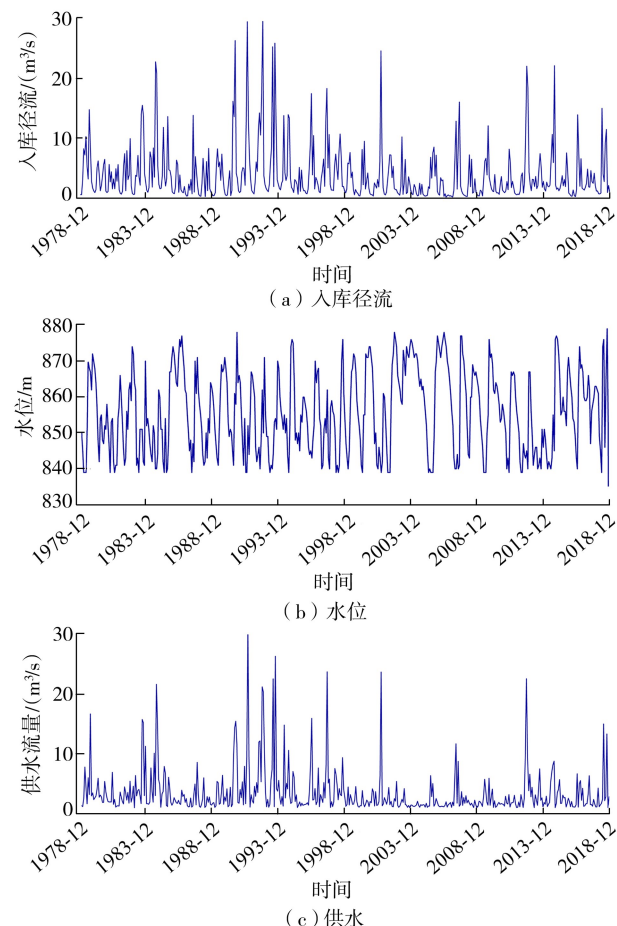


图6 李家河水库 1979—2018 年运行过程
Fig. 6 The operation process of Lijiahe Reservoir from 1979 to 2018

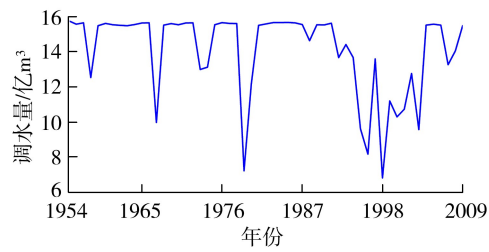


图7 引汉济渭工程调水量过程
Fig. 7 Water diversion process of the Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project

与 1998 年 7 月至 2001 年 6 月 3 年典型枯水期金盆水库的调度过程进行分析,具体过程如图 8 所示。

由图 8 可知,3 年典型丰水期金盆水库处于高水位运行,在外调水优先供水的原则下,引汉济渭工程所调水量几乎满足了所有用水户的用水需求^[24]。此时,当地水源承担较小的供水任务,供水量较少,造成大量弃水;3 年典型枯水期金盆水库水位波动较大,连续枯水年供水期时水位接近死库容运行。

综上所述,在当地水源与外调水联合供水的情况下,按照外调水源优先供给的原则,当地水源在连续丰水年份会出现大量弃水;而在连续枯水年份,即

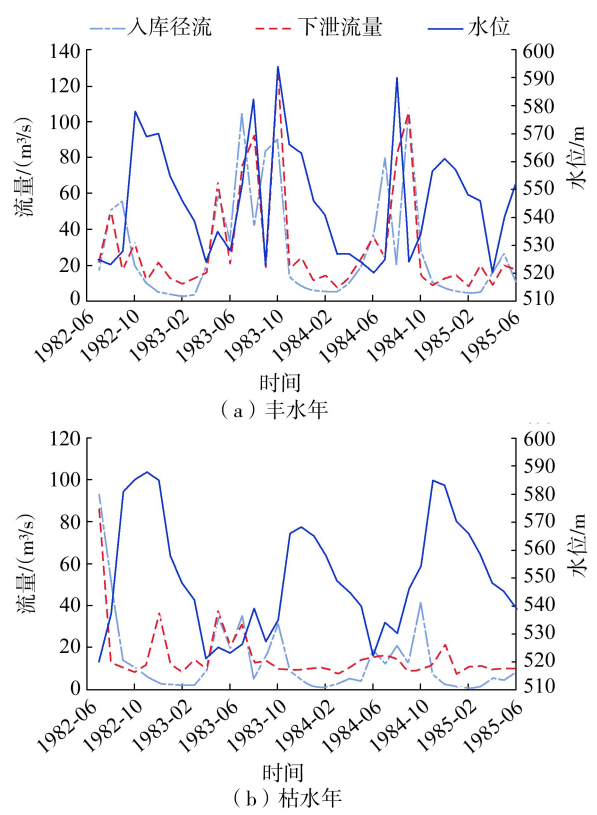


图8 丰水年与枯水年金盆水库调度过程
Fig. 8 The scheduling process of the Jinpen Reservoir in the wet year and dry year

使引汉济渭工程与当地水库群联合供水,仍难以满足所有用水需求,容易导致当地地下水的大量集中开采,也说明引汉济渭工程在关中地区配套的调蓄库容不足。因此,在多水源联合调配时,外调水的波动性将影响当地水源的供水过程,关中地区需要建设调蓄水库来改善不均匀的供水过程。

由表 1 可知,通过对当地 8 个水库的联合优化调度与配置,基准年关中五市一区的缺水率显著降低。以 2020 年为基准年,关中地区的总需水量为 56.73 亿 m^3 ,当地水源的可供水量为 49.92 亿 m^3 ,总缺水量达到 6.81 亿 m^3 ,缺水率为 12.00%。其中,咸阳的缺水量最大,达 3.85 亿 m^3 ,占总缺水量的 56.53%。从缺水程度来看,西安的缺水率由 19.80% 下降至 3.56%,铜川的缺水率由 33.70% 下降至 17.97%。在此过程中,关中地区的地表水总供水量为 29.12 亿 m^3 ,总供水量为 49.92 亿 m^3 。可以看出,在考虑需水分级优化供水情况下,西安、宝鸡、咸阳和杨陵的供水量发生了微小变化,主要原因是石头河水库在供给对象和水量不变的情况下,生活、工业、农业、生态各用水部门的用水需求保障次序发生了变化,从而供水量会有微小变化。通过本地水库群的联合优化调配,关中受水区的总缺水率由 21.90% 降至 12.00%,缺水率显著降低。然

表 1 基准年水资源优化配置结果

Table 1 Results of water resourcesptimal allocation in the base year

区域	需水量/亿 m ³						可供水量/亿 m ³					优化前 缺水率/%	优化后 缺水率/%
	生活		农业	工业	生态	合计	地表水	地下水	其他水源	合计	缺水		
	城镇	农村											
西安	7.76	0.75	6.11	1.99	3.36	19.97	11.07	5.43	2.76	19.26	0.71	19.80	3.56
铜川	0.21	0.06	0.75	0.19	0.07	1.28	0.82	0.16	0.07	1.05	0.23	33.70	17.97
宝鸡	1.11	0.45	5.57	1.02	0.15	8.30	4.95	3.11	0.13	8.19	0.11	17.60	1.33
咸阳	1.53	0.59	7.76	1.26	0.60	11.74	4.60	2.88	0.41	7.89	3.85	36.20	32.79
渭南	1.14	0.72	11.27	1.43	0.46	15.02	7.53	5.28	0.31	13.12	1.90	15.60	12.65
杨陵	0.11	0.02	0.19	0.07	0.03	0.42	0.15	0.23	0.03	0.41	0.01	1.10	2.38
关中地区	11.77	2.59	31.65	5.96	4.67	56.73	29.12	17.09	3.71	49.92	6.81	21.90	12.00

而,尽管水资源配置有所优化,关中地区仍存在一定程度的缺水,缺水状况亟须进一步改善。

由表 2 可知,通过当地 8 座水库以及三大工程联合优化调配,规划水平年当地调蓄水库的受水对象的缺水程度有了明显降低。2035 年规划水平年引汉济渭工程先期向部分重点城市供水,相比无引汉济渭工程、古贤水库与东庄水库优化调配,缺水情况有了明显改善。从缺水程度看,西安缺水率由 0.70%下降至 0.00%,咸阳缺水率由 4.30%下降至 0.00%,其余市区缺水率也明显降低。当地地表水源总供水量 50.89 亿 m³,总供水量 70.25 亿 m³,关中地区总缺水率由 2.00%降为 0.00%,相比无外调水优化调配缺水状况有了极大改善。经水网工程优化调配后,理论上关中五市一区缺水率为 0.00%,但是在未来变化环境下,全球气候变暖、黄河流域径流量衰减、水库运行中泥沙淤积造成库容损失等因

素,将导致关中地区的用水需求全都得到满足只能是理论上的。此外,经济社会发展可能会增加新的用水需求,来水量与水网工程调节能力的变化可能会对供给能力和供水量也造成影响。

3.2 水资源系统韧性提升效果及分析

在关中地区水资源系统韧性评价指标体系中,将水网优化调配后得到的缺水率作为变化因子,即仅考虑水网 4 项特征指标和缺水率的变化,不考虑其他要素变化,分析关中五市一区水网优化调配技术措施对水资源系统韧性的影响,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,经过水库联合优化调配后,基准年关中地区除杨陵外水资源系统韧性均有所提升,整体韧性从 31.11 提高至 32.22,提升幅度为 3.57%,其中铜川提升最大,达到 9.29%。基准年经过优化调配后,关中地区水库群的供水量和供水保证率均有所提高,除杨陵外其他五市缺水率下降,供水需求

表 2 规划水平年水资源优化配置结果

Table 2 Results of the water resources optimal allocation in the planning year

区域	需水量/亿 m ³						可供水量/亿 m ³					优化前 缺水率/%	优化后 缺水率/%
	生活		农业	工业	生态	合计	地表水	地下水	其他水源	合计	缺水		
	城镇	农村											
西安	8.82	0.99	6.22	4.25	4.71	24.99	16.76	5.43	2.80	24.99	0.00	0.70	0.00
铜川	0.29	0.05	0.91	0.53	0.08	1.86	1.60	0.16	0.10	1.86	0.00	5.80	0.00
宝鸡	1.98	0.34	6.34	2.04	0.36	11.06	6.75	3.90	0.40	11.05	0.00	3.90	0.00
咸阳	1.74	0.36	8.91	3.66	0.78	15.45	11.60	3.24	0.61	15.45	0.00	4.30	0.00
渭南	1.93	0.50	9.61	3.54	0.63	16.21	13.68	1.64	0.89	16.21	0.00	0.20	0.00
杨陵	0.19	0.02	0.19	0.25	0.04	0.69	0.50	0.14	0.05	0.69	0.00	2.30	0.00
关中地区	14.96	2.26	32.17	14.26	6.60	70.26	50.89	14.51	4.85	70.25	0.00	2.00	0.00

表 3 水网优化调配前后水资源系统韧性

Table 3 Resilience of water resources system before and after the optimal allocation ofwater network

区域	基准年			规划水平年			水网建设 前后增幅/%
	优化调配前	优化调配后	增幅/%	优化调配前	优化调配后	增幅/%	
西安	67.57	69.63	3.05	79.47	79.58	0.14	17.61
铜川	20.89	22.83	9.29	24.84	25.77	3.75	18.91
宝鸡	26.29	28.29	7.61	37.97	38.60	1.66	44.43
咸阳	19.93	20.35	2.11	31.28	31.97	2.21	56.95
渭南	23.02	23.38	1.56	35.53	35.56	0.09	54.34
杨陵	28.97	28.81	-0.55	55.23	55.60	0.67	90.65
关中地区	31.11	32.22	3.57	44.05	44.51	1.04	41.59

注:水网建设前后增幅是指规划水平年优化调配前相对基准年优化调配前水资源系统韧性的增幅。

得到了部分满足,水资源系统韧性得到增强。经过引汉济渭工程、东庄水库、古贤水库等水网骨干工程与本地水库群联合优化调配后,规划水平年关中五市一区的整体平均水资源系统韧性从 44.05 提升至 44.51,提升幅度为 1.04%,其中铜川提升最大,达 3.75%。通过水资源优化配置,各市区规划水平年的缺水率明显下降,可见水库群、重大引调水工程及骨干供水工程的水网优化调配是提升水资源系统韧性的重要手段,使得关中五市一区的水资源系统韧性得到提升。水网建设后(规划水平年优化调配前)关中地区水资源系统韧性水平相较于水网建设前(基准年优化调配前)有大幅度提升,各市区消除了低韧性水平,水网构建对关中地区水资源系统韧性的提升效果显著,基于水网骨干工程的优化调配技术已成为提升水资源系统韧性的关键非工程措施。关中地区水资源系统韧性水平的提升,不仅保障和优化了陕西省的水安全格局,也为全省水资源系统韧性的提升作出了积极贡献。

4 结 论

- a. 通过水库群优化调配,基准年缺水率由 21.90%降低到 12.00%,降低了 9.90 个百分点;规划水平年当地水库群优化调配并联合引汉济渭工程、古贤水库和东庄水库,关中五市一区用水需求基本得到满足,缺水率由 2.00%降到 0.00%。
- b. 通过水网工程建设,在不进行水库群联合优化调配的情况下,可将水资源系统韧性由 31.11 提高到 44.05,相比水网建设前提高了 41.59%。水网建设是提升水资源系统韧性最为重要的工程措施。
- c. 考虑水库群优化调配,基准年可将水资源系统韧性由 31.11 提高到 32.22,相比优化调配前提高了 3.57%;规划水平年可将水资源系统韧性由 44.05 提高到 44.51,相比优化调配前提高了 1.04%。考虑水库群、重大引调水及骨干供水工程的水网优化调度技术是提升水资源系统韧性重要的非工程措施。

参考文献:

[1] 万芳,王煜,王威浩,等.水网构建对汾河流域水资源系统韧性演变的影响[J].水资源保护,2025,41(1):19-26. (WAN Fang, WANG Yu, WANG Weihao, et al. The impact of water network construction on the resilience evolution of the Fenhe River Basin water resources system [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 19-26. (in Chinese))

[2] 孙才志,孟程程.中国区域水资源系统韧性与效率的发展协调关系评价[J].地理科学,2020,40(12):2094-

2101. (SUN Caizhi, MENG Chengcheng. Evaluation of the coordinated development relationship between regional water resources system resilience and efficiency in China [J]. Geographical Science, 2020, 40(12): 2094-2101. (in Chinese))

[3] 王红瑞,杨亚锋,杨荣雪,等.水资源系统安全的不确定性思维:从风险到韧性[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(1):1-8. (WANG Hongrui, YANG Yafeng, YANG Rongxue, et al. The uncertainty thinking of water resources system security: from risk to resilience[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(1): 1-8. (in Chinese))

[4] 赵志龙,杨亚锋,徐冬梅,等.基于二级模糊综合评价法的水资源系统韧性评价调控模型及应用[J].水电能源科学,2022,40(10):39-43. (ZHAO Zhilong, YANG Yafeng, XU Dongmei, et al. Resilience evaluation and regulation model of water resources system based on secondary fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Hydroelectric Energy Science, 2022, 40(10): 39-43. (in Chinese))

[5] YU Cuisong, HAO Zhenchun. Resilience degree: a new indicator of sustainable development to water resources system [C]//2008 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE 2008). Shanghai: IEEE, 2008: 3170-3173. (DOI: 10.1109/ICBBE. 2008. 378)

[6] 陈燕飞,张翔.河流水环境的可恢复性及其评价研究[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(1):34-46. (CHEN Yanfei, ZHANG Xiang. The recoverability and evaluation study of river water environment[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2016, 24(1): 34-46. (in Chinese))

[7] 范志鹏,李云玲,马睿,等.长江黄河跨流域多线路水网韧性评估[J].水资源保护,2025,41(1):27-34. (FAN Zhipeng, LI Yunling, MA Rui, et al. Resilience assessment of multi-line water network across the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 27-34. (in Chinese))

[8] 张鑫,陈燕,李桃迎.基于改进 PageRank 的多属性水网节点综合评价[J].计算机应用研究,2018,35(12):3659-3665. (ZHANG Xin, CHEN Yan, LI Taoying. Multi-attributen comprehensive evaluation of water network nodes based on improved PageRank [J]. Computer Applications Research, 2018, 35(12): 3659-3665. (in Chinese))

[9] 李锋,张鹏超,李慧敏,等.水网结构对多灾害情景的韧性响应研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,45(1):63-72. (LI Feng, ZHANG Pengchao, LI Huimin, et al. Resilience response of water network structure to multi-disaster scenarios[J]. Journal of North

- China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 45 (1): 63-72. (in Chinese))
- [10] 刘欢,甘永德,杨钦,等. 基于水网视角的水资源与关联要素适配性评价[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 62-68. (LIU Huan, GAN Yongde, YANG Qin, et al. Compatibility evaluation of water resources and associated elements based on the perspective of water networks [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 62-68. (in Chinese))
- [11] 王煜,彭少明,郑小康,等. 水网布局下黄河流域应对极端枯水的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2024, 35 (1): 11-23. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, et al. Key scientific issues for extreme water response in the Yellow River Basin under water network layout[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1): 11-23. (in Chinese))
- [12] 龚艳冰. 基于正态云组合赋权的水资源配置方案综合评价方法[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 56-61. (GONG Yanbing. Comprehensive evaluation method of water resources allocation scheme based on normal cloud combination weighting [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 56-61. (in Chinese))
- [13] 张金良. 构建黄河流域水网的思考[J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 1-5. (ZHANG Jinliang. Thoughts on the construction of water network in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 1-5. (in Chinese))
- [14] 许凯,何子杰,赵树辰,等. 国内外水资源配置方法对比浅析[C]//中国水利学会. 中国水利学会 2018 学术年会论文集:第五分册. 武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2018:8.
- [15] 冯仲恺,高浩宇,牛文静,等. 复杂流域水资源系统风险多链路网络研究 II: 风险传播[J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 1-8. (FENG Zhongkai, GAO Haoyu, NIU Wenjing, et al. Research on risky multilink networks for complex watershed water resource systems II: risk propagation [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 1-8. (in Chinese))
- [16] 安莉娜,范国福,吴迪,等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 35-41. (AN Lina, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 35-41. (in Chinese))
- [17] 陈冬冬. 基于 AHP-熵权综合评价法的郑州市水资源安全问题研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2021.
- [18] 赵志龙,杨亚锋,徐冬梅,等. 基于二级模糊综合评判法的水资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. 水电能源科学, 2022, 40 (10): 39-43. (ZHAO Zhilong, YANG Yafeng, XU Dongmei, et al. Resilience evaluation and regulation model of water resources system based on secondary fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Hydroelectric Energy Science, 2022, 40(10): 39-43. (in Chinese))
- [19] 宋亮亮,张劲松,杜建波,等. 基于云模型的水利工程运行安全韧性评价[J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 208-214. (SONG Liangliang, ZHANG Jinsong, DU Jianbo, et al. Resilience evaluation of hydraulic engineering operation safety based on cloud model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 208-214. (in Chinese))
- [20] 何欣,郭伟,王松,等. 基于多策略改进 DBO 算法的水库群优化调度应用[J]. 水资源管理, 2024, 38 (6): 1883-1901. (HE Xin, GUO Wei, WANG Song, et al. Application of multi-strategy improved DBO algorithm in reservoir group optimization scheduling [J]. Water Resources Management, 2024, 38 (6): 1883-1901. (in Chinese))
- [21] 李家庆. 都江堰灌区水资源优化配置研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.
- [22] 方国华,宋子奇,廖涛,等. 跨流域引调水工程供水效益量化分析[J]. 水利经济, 2021, 39 (1): 15-19. (FANG Guohua, SONG Ziqi, LIAO Tao, et al. Quantitative analysis of water supply benefits of cross-basin water diversion projects[J]. Water Resources Economics, 2021, 39 (1): 15-19. (in Chinese))
- [23] 王伟,卢慧敏,李君,等. 不同多目标遗传算法在水闸泵站优化调度应用的对比研究[J]. 治淮, 2024 (1): 21-23. (WANG Wei, LU Huimin, LI Jun, et al. Comparative study on the application of different multi-objective genetic algorithms in the optimization scheduling of sluice pump stations[J]. Zhi Huai, 2024(1): 21-23. (in Chinese))
- [24] 张陆洋. 考虑调蓄库的引汉济渭受水区多水源优化调配研究[D]. 西安:西安理工大学, 2022.

(收稿日期: 2024 - 12 - 05 编辑: 熊水斌)

