

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.06.020

水网联通情境下鄂尔多斯市多水源-多用户-多目标 水资源优化配置

吴 山¹,高瑞忠^{1,2,3},王英杰¹,闫江鸿⁴,王银龙¹,房丽晶¹,刘廷玺^{1,2,3}

- (1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018;
2. 黄河流域内蒙段水资源与水环境综合治理自治区协同创新中心,内蒙古 呼和浩特 010018;
3. 内蒙古自治区生态水文与水资源高效利用重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018;
4. 鄂尔多斯市水资源保护利用中心,内蒙古 鄂尔多斯 017200)

摘要:基于水网联通格局下跨区域、跨流域大尺度调水供水新模式,为协调鄂尔多斯市资源、经济、环境可持续发展,缓解水资源空间分布不均及“能粮争水”问题,以鄂尔多斯市典型区域(东胜区、康巴什区、达拉特旗、乌审旗、伊金霍洛旗)为研究区,基于区域社会经济数据,以 2023 年为现状年,采用 NSGA-Ⅱ 构建了多水源-多用户-多目标水资源优化配置模型,开展了规划年(2030 年)平、枯水情境下水资源配置研究。结果表明:2023 年地下水、黄河水、地表水、再生水、疏干水供给占比分别为 60%、15%、5%、6%、14%,水源开发以地下水为主,其他水源利用程度低;2030 年平水情境(来水频率 50%)、枯水情境(来水频率 75%)下配置水量分别为 7 2319.15 万、71 997.28 万 m³,缺水率分别为 8.00%、10.21%;各情境下区域配置水量均满足生活、生态和工业用水需求,农业出现不同程度缺水情况,尤其是达拉特旗,在枯水情境下农业缺水率为 23.26%;2030 年平、枯水情境下各水源供给占比分别为 29%、25%、14%、11%、21%和 32%、24%、12%、11%、21%,与 2023 年相比,地下水供给比例减少,其他水源供给比例上升,供水结构显著优化,用水水平显著提高。

关键词:多水源-多用户-多目标水资源优化配置;水网联通;供水结构;NSGA-Ⅱ;鄂尔多斯市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0176-10

Multi-source, multi-user and multi-objective optimal allocation of water resources under context of water network connection in Ordos City//WU Shan¹, GAO Ruizhong^{1,2,3}, WANG Yingjie¹, YAN Jianghong⁴, WANG Yinlong¹, FANG Lijing¹, LIU Tingxi^{1,2,3} (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River Basin, Hohhot 010018, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Ecohydrology and High-Efficient Utilization of Water Resources, Hohhot 010018, China; 4. Ordos City Water Resources Protection and Utilization Center, Ordos 017200, China)

Abstract: Considering the new model of large-scale water diversion and supply across regions and river basins under the pattern of water network connectivity, to coordinate the sustainable development of resource, economy, and environment in Ordos City, alleviate the uneven spatial distribution of water resources, and deal with the problem of water competition between energy and grain, typical areas of Ordos City, including Dongsheng District, Kangbashi District, Dalad Banner, Uxin Banner, and Ejin Horo Banner were taken as the study area. Based on regional social and economic data, with 2023 as the status-quo year, NSGA-Ⅱ was adopted to construct a multi-source, multi-user, and multi-objective optimal allocation model to conduct research on water resources allocation for future planning year (2030) under normal and dry scenarios. The results show that in 2023, the supply proportions of groundwater, Yellow River water, surface water, reclaimed water, and dewatering water were 60%, 15%, 5%, 6%, and 14%, respectively, indicating a primary reliance on groundwater and low utilization rate of other water sources. The volumes of water allocation under the normal water scenario (frequency of 50%) and dry water scenario (frequency of 75%) in 2030 are 723.191 5 million m³ and

基金项目:鄂尔多斯市黄河“几字弯”攻坚战重大科技攻关项目(ZD20232323);内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2023JBGS0007);内蒙古农业大学基本科研业务费专项资金项目(BR22-12-04);内蒙古自治区一流学科科研专项重点项目(YLXKZX-NND-010)

作者简介:吴山(2000—),女,硕士研究生,主要从事水资源配置研究。E-mail:wushan000213@163.com

通信作者:高瑞忠(1977—),男,教授,博士,主要从事生态水文、水文地质及水资源配置研究。E-mail:ruizhonggao@qq.com

719.9728 million m³, with water shortage rates of 8.00% and 10.21%, respectively. Under all scenarios, the regional water allocation meets the demands for domestic, ecological, and industrial water uses, while agriculture experiences varying degrees of water shortage, especially in Dalad Banner under the dry scenario, where the agricultural water shortage rate reaches 23.26%. The supply proportions of various water sources under the normal scenario in 2030 are 29%, 25%, 14%, 11%, and 21%, respectively, and data under the dry scenario are 32%, 24%, 12%, 11%, and 21%, respectively. Compared to 2023, the proportion of groundwater supply in 2030 decreases, while the proportions of other water sources increase, indicating a significant optimization of water supply structure and a significant improvement in water use level.

Key words: multi-source, multi-user and multi-objective water resources optimal allocation; water network connectivity; water supply structure; NSGA- II ; Ordos City

水资源是推动社会经济发展的核心要素,21 世纪以来,水资源短缺成为全球资源环境领域的重大挑战^[1-2]。我国地域广阔,地区之间水资源分布极不均衡,南北水资源错位严重,导致水资源供应不平衡^[3-4]。这一问题在黄河流域尤为突出,严重制约区域经济社会可持续发展,破坏生态环境平衡^[5-6]。近年来,黄河上游鄂尔多斯市抢抓国家能源战略西移的发展契机,多措并举,统筹推进,成功实现了经济社会的快速腾飞,但部分地区地下水超采引发水质下降、水资源枯竭等环境地质问题愈加突出^[7]。基于《国家水网建设规划纲要》加快区域水网联通建设,有序推进省、市、县各级水网互联互通,是实现水资源空间均衡目标、促进区域经济社会高质量可持续发展的重要手段^[8-9]。

水资源优化配置是最大限度满足用水部门需求,实现社会、经济、环境协调发展和水资源高效利用的有效手段^[10]。传统水资源配置方法,如线性规划法^[11]、动态规划法^[12-13]、模糊评价法^[14]等,其收敛性和计算效果较差,难以解决复杂的实际问题。随着计算机技术的成熟和发展,智能优化算法在求解水资源配置问题中逐渐得到应用,如粒子群算法^[15-16]、蚁群算法^[17]、鲸鱼算法^[18]、萤火虫算法^[19]、遗传算法^[20-22]等,其中,第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)因运行速度快、解集收敛性好等优点被广泛应用^[23]。Gao 等^[24-26]采用 NSGA-II 构建了不同区域(流域)多目标多水源优化配置模型,均取得了较好研究成果。但目前鲜有在水网联通格局下的跨区域水资源配置研究。黄河流域作为我国重要的生态屏障和经济带,正面临水资源总量不足且时空分布不均、经济发展需求与生态保护目标矛盾突出等严峻挑战,三者之间的平衡机制亟待完善。

本文从区域水网联通的视角出发,选取 2023 年为现状年,综合考虑社会、经济、环境持续发展及地下水过度开采等问题,以区域缺水量最小、净效益最大、地下水利用量最小为目标,构建黄河干旱地区鄂尔多斯市典型区域(东胜区、康巴什区、达拉特旗、乌审旗、伊金霍洛旗)地下水、黄河水、地表水、再生

水、疏干水多水源联合供给多用户(生活、生态、工业、农业)的多水源-多用户-多目标水资源优化配置模型,并采用 NSGA- II 求解,提出规划年(2030 年)平、枯水情境优化配置方案,以期为鄂尔多斯市水资源精细化管理和高效利用提供支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区中西部,地处黄河“几字弯”腹地,地理位置为 37.87°N~40.73°N、108.17°E~111.00°E,包括鄂尔多斯市东胜区、康巴什区、达拉特旗、乌审旗和伊金霍洛旗(图 1)。研究区属于典型温带大陆性气候,干燥少雨、蒸发量大,年降水量 250~350 mm,年蒸发量 1 200~1 500 mm,无法满足雨养农业需求^[27]。鄂尔多斯市身兼国家级能源化工基地和我国重要的农牧业产地双重角色,2023 年人均 GDP 26.58 万元,位居全国首位,但水资源极其匮乏,多年人均水资源 1 406 m³^[28],分别较内蒙古自治区和全国低 749 m³ 和 632 m³,属于我

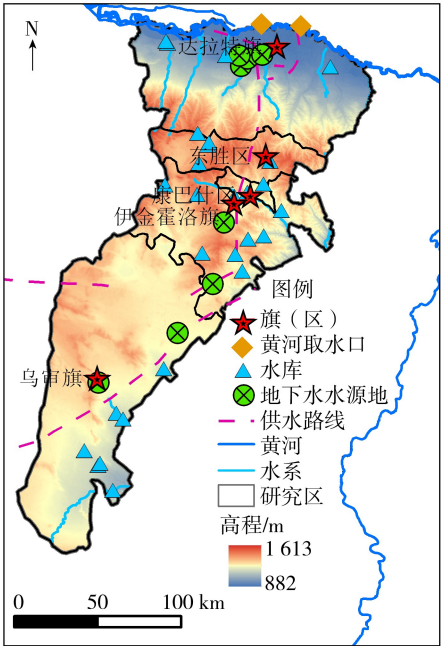


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

国缺水最严重的地区之一,水资源短缺和空间分布不均衡成为制约地方经济发展的主要瓶颈。

1.2 数据来源

采用的数据来源于《鄂尔多斯市统计年鉴》(2016—2023 年)、《鄂尔多斯市水资源公报》(2016—2023 年)、《鄂尔多斯市水资源可持续利用规划》《内蒙古自治区行业用水定额》《黄河可供水量分配方案》《内蒙古黄河取水许可总量控制指标细化方案》等。

2 模型与方法

2.1 水资源优化配置模型构建

多目标规划是数学规划中的一个分支,能够解决多目标决策管理问题。水资源配置与社会、经济、生态等因素密切相关,属于典型的复杂系统多目标规划问题^[29]。本文参考黄河流域水资源配置建模方法,通过设定决策变量、多个目标函数及约束条件,构建多水源-多用户-多目标水资源优化配置模型^[30-31]。

2.1.1 目标函数

水资源配置需要兼顾社会、经济、生态环境等指标的矛盾和协调因素^[32],以缺水量最小为社会效益最优、净效益最大为经济效益最优、地下水利用量最小为环境效益最优目标函数,建立多水源-多用户-多目标水资源优化配置模型。

a. 社会效益最优目标函数:

f_1 = min [\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (0.8D_{kj} - \sum_{i=1}^I X_{kij})] \tag{1}

式中:f_1 为区域总缺水量;K 为子区数量;J 为用户数量;I 为供水水源数量;D_{kj} 为子区 k 用户 j 的需水量;X_{kij} 为决策变量,表示水源 i 向子区 k 用户 j 的供水量。

b. 经济效益最优目标函数:

f_2 = max { \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J [(b_{kj} - c_{kj}) \sum_{i=1}^I X_{kij} \alpha_{ki} \lambda_{kj}] } \tag{2}

式中:f_2 为净效益;b_{kj} 为子区 k 用户 j 的用水效益系数;c_{kj} 为子区 k 用户 j 的供水费用系数;\alpha_{ki} 为水源 i 向子区 k 的供水次序系数;\lambda_{kj} 为子区 k 用户 j 的用水公平系数。

c. 环境效益最优目标函数:

f_3 = min \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J X_{kij} \tag{3}

式中:f_3 为地下水总利用量;X_{kij} 为子区 k 用户 j 的地下水利用量。

2.1.2 约束条件

a. 非负性约束:

X_{kij} \geq 0 \tag{4}

b. 供水能力约束:

\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{kij} \leq S_i \tag{5}

式中 S_i 为水源 i 的可供水量。

c. 需水量约束:

D_{kjmin} \leq \sum_{i=1}^I X_{kij} \leq D_{kjmax} \tag{6}

式中: D_{kjmin} 为子区 k 用户 j 的最小需水量; D_{kjmax} 为子区 k 用户 j 的最大需水量。

2.2 参数确定与模型求解

2.2.1 参数确定

a. 供水次序系数、用水公平系数。2023 年研究区供水以地下水为主,占总供水量 60%,因此,规划年应加强地表水资源(黄河水、地表水)开发,提高非常规水(再生水、疏干水)的利用,同时减少地下水开采,保障多水源联合供水格局,促进水资源可持续利用。结合鄂尔多斯市产业结构和布局,依据优先保障生活、生态用水的原则,参考文献[33],设置区域地下水、黄河水、地表水、再生水、疏干水供水次序系数分别为 0.17、0.50、0.50、0.33、0.33,设置农业、工业、生活、生态用水公平系数分别为 0.13、0.20、0.40、0.27。

b. 用水效益系数、供水费用系数。农业、工业用水效益系数采用分摊系数法;居民生活和生态用水效益系数较为复杂,其取值方法均参考文献[34]。各旗(区)农业、工业、生活、生态用水效益系数分别为 6.7、548.6、577.5、577.5 元/m³。基于区域水费征收标准,各旗(区)农业、工业、生活及生态供水费用系数分别为 0.6、5.0、1.92、2.1 元/m³。

2.2.2 模型求解

为了解决 Srinivas 等^[35]提出的 NSGA 过早收敛问题,采用了 Deb 等^[36]提出的 NSGA-II 优化算法。该算法包含 6 个关键环节:种群初始化、非支配排序、拥挤距离计算、个体选择、交叉与变异操作和种群重组与选择^[37-38],其优势在于可高效求解复杂多目标优化问题,保持解的多样性,并获得优质解,尤其在处理 2 个或 3 个目标问题时表现出优异的性能^[39]。多水源-多用户-多目标水资源优化配置模型求解流程如图 2 所示。

3 结果与分析

3.1 供需平衡

为奠定研究区水资源常态开发、分配、管理及干旱应急调度的工作基础,以 2023 年为现状年开展研究。现状年研究区用水结构和供水情况如图 3 和

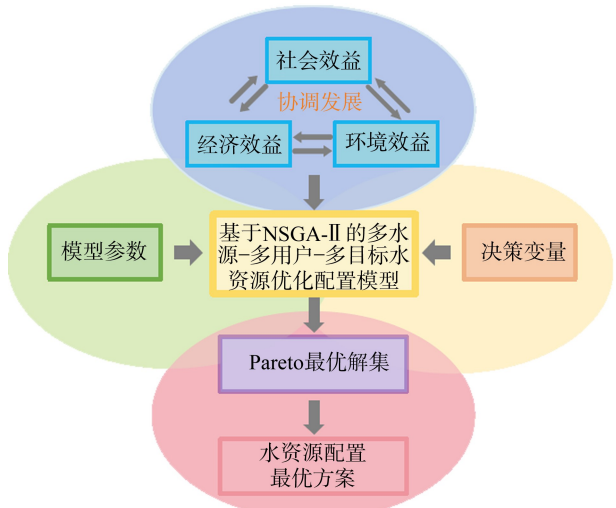


图2 多水源-多用户-多目标水资源优化配置模型求解流程
 Fig.2 Solving process for multi-source, multi-user, and multi-objective water resources optimal allocation model

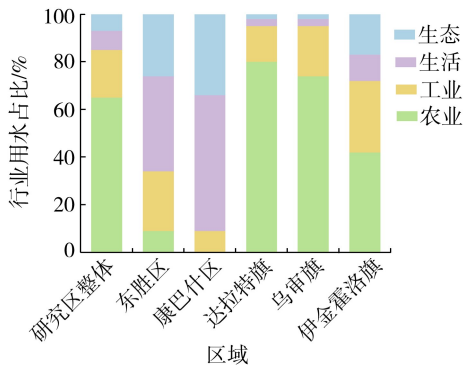


图3 2023年研究区用水结构

Fig.3 Composition of water utilization of study area in 2023

图4所示,地下水、黄河水、地表水、再生水、疏干水5种水源联合供给农业(农、林、牧、渔)、工业、生活

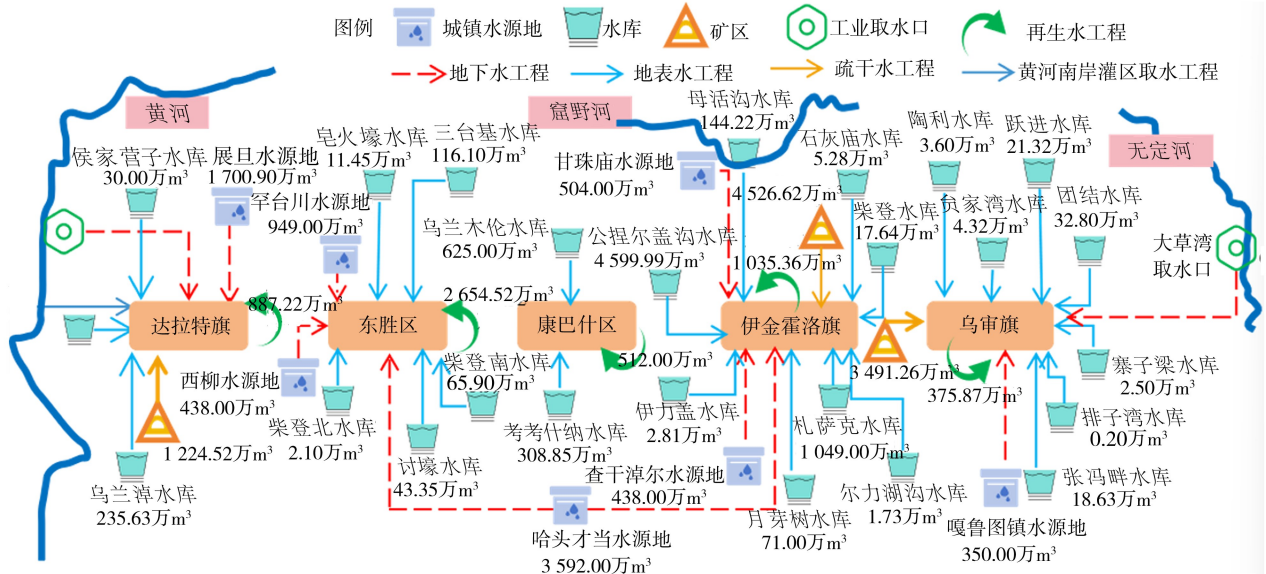


图4 2023年研究区供水情况

Fig.4 Water supply of study area in 2023

(居民生活、服务业、建筑业)、生态4个行业,各水源供给比例约分别为60%、15%、5%、6%、14%,区域水源以开发地下水为主,黄河水、地表水利用率不高,非常规水(再生水、疏干水)利用程度低。研究区整体农业、工业、生活、生态用水比例约分别为65%、20%、8%、7%,农业和工业用水占比最大,农业是第一用水大户。未来随着经济快速发展,水资源需求强劲增长,“能粮争水”将更加严重,供需矛盾日益尖锐,亟须在水网联通背景下开展旗(区)尺度下水资源调控研究,提供合理的水资源配置方案并优化产业布局,为区域绿色高质量发展提供支撑。

以2030年为规划年,采用定额法对规划年平、枯水情境下(来水频率分别为50%、75%)研究区农业、工业、生活、生态需水预测。为促进水资源全面节约、高效利用的区域发展需求,参考刘美钰等^[40]的研究,以需水总量的80%作为需水量的最小值,预测结果如表1所示。2030年平水情境下研究区总需水量为78610.01万~98262.51万 m^3 ,枯水情境下研究区总需水量为80182.90万~100228.62万 m^3 。

基于研究区水土资源不匹配、水资源禀赋不一,兼顾各旗(区)发展需求,考虑区域水网联通建设及水资源综合利用方案的推进及水资源管理“三条红线”指标要求,对研究区地下水、黄河水、地表水、再生水、疏干水可供水总量进行预测。依据相关规划,2030年各情境下黄河水、地下水、再生水、疏干水可供水总量均分别为18981.41万、54264.91万、8091.92万、14989.21万 m^3 ;地表水平、枯水情境下可供水总量分别为10503.00万、9871.00万 m^3 。

表 1 2030 年研究区平、枯水情境下行业需水量预测

来水情境		需水量/万 m ³					
		农业	工业	生活	生态	总量上限	总量下限
平水情境	东胜区	1 256.00	2 049.56	4 132.34	2 471.83	9 909.73	7 927.78
	康巴什区	2.39	186.97	1 210.36	294.74	1 694.46	1 355.57
	达拉特旗	32 472.89	9 246.25	1 886.78	473.46	44 079.38	35 263.50
	伊金霍洛旗	14 808.59	10 632.47	1 089.48	886.30	27 416.84	21 933.47
	乌审旗	5 594.13	6 190.42	1 711.55	1 666.00	15 162.10	12 129.68
	研究区整体	54 134.00	28 305.67	10 030.51	5 792.33	98 262.51	78 610.01
枯水情境	东胜区	1 397.37	2 049.56	4 132.34	2 471.83	10 051.10	8 040.88
	康巴什区	2.39	186.97	1 210.36	294.74	1 694.46	1 355.57
	达拉特旗	33 998.19	9 246.25	1 886.78	473.46	45 604.68	36 483.74
	伊金霍洛旗	14 935.48	10 632.47	1 089.48	886.30	27 543.73	22 034.98
	乌审旗	5 766.68	6 190.42	1 711.55	1 666.00	15 334.65	12 267.72
	研究区整体	56 100.11	28 305.67	10 030.51	5 792.33	100 228.62	80 182.90

3.2 水资源优化配置方案

基于确定的相关系数和模型参数,运用 NSGA-II 求解多水源-多用户-多目标水资源优化配置模型,设置种群大小为 200,迭代次数 500 次,交叉概率为 0.7,个体间变异概率为 0.5,得到帕累托解集。为促进区域社会与生态协同发展,兼顾社会、经济、环境效益,避免单一目标最优、减少决策冲突、增强方案的鲁棒性、减少未来不确定性风险,选取几何中间解作为方案解(图 5)。规划年平、枯水情境下水资源优化配置方案均满足区域发展的经济效益与环境效益,但不能满足社会效益需求,平、枯水情境下配置水量分别为 72 319.15 万 m³ 和 71 997.28 万 m³,缺水总量分别 6 290.86 万 m³ 和 8 185.62 万 m³。

2030 年平、枯水情境下各区域供水源与用水部门之间的水资源配置结果如图 6 所示。平、枯水情境下各水源对各区域不同用水行业供给水量具有差异性,配置结果从高到低可分为 3 个梯队。第一梯队包括达拉特旗、乌审旗,配置水量均超过 2 亿 m³;第二梯队为伊金霍洛旗,配置水量接近 1.2 亿 m³;第三梯队包括东胜区、康巴什区,总配置水量低于

1 亿 m³。水资源配置在空间上有显著差异性,但在 2030 年平、枯水情境下,这一空间差异性较为相似。

结合研究区水资源分布和产业结构,进一步分析配置结果在平、枯水情境下空间差异的相似性。第一梯队地区邻近黄河和窟野河,具有良好的浅层地下水资源,这些地区农业是第一用水大户,整体用水需求大,导致达拉特旗、乌审旗水资源配置水量高;第二梯队地区伊金霍洛旗,矿业、制造业、火电等密集型企业集中发展,其他产业均衡发展,因此水资源配置适度;第三梯队地区为城市中心,人口集中、产业密集,但是可利用水资源量有限,故东胜区、康巴什区配置水量很低。2030 年不同情境下的水资源优化配置实现了资源与区域经济规模、结构和布局的时空耦合。

3.3 最优配置结果

3.3.1 规划年受水区缺水率

依据区域强化节约用水,建设节水型农业、节水型工业和节水型服务业,提高水资源利用效率和效益的要求,选用需水量下限值和配置水量计算规划年平、枯水情境下研究区整体缺水率,分别为

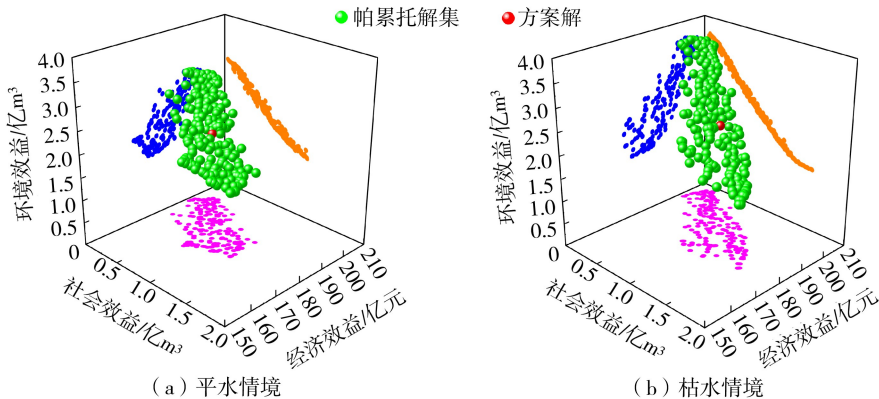


图 5 2030 年平、枯水情境下的帕累托解集

Fig.5 Pareto solution set under normal and dry scenarios in 2030

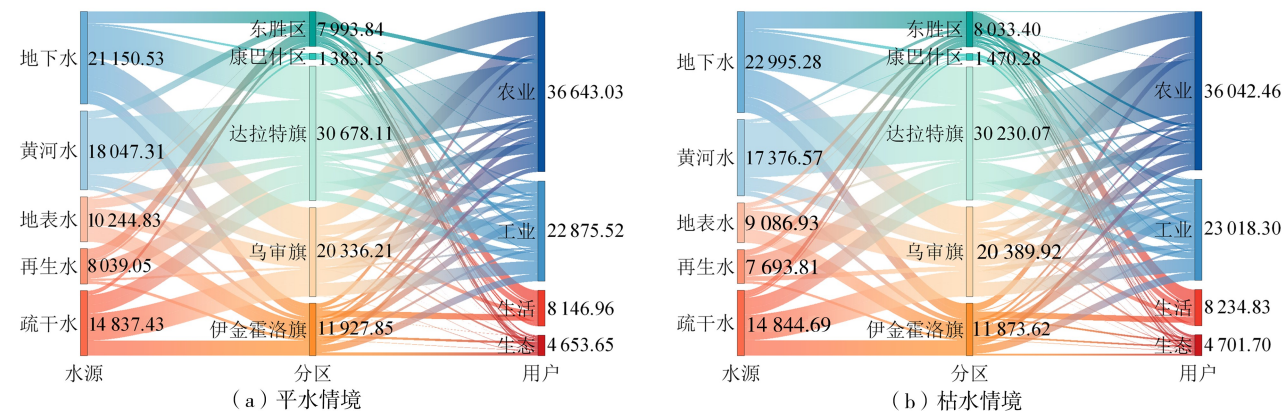


图6 2030年平、枯水情境优化配置结果(单位:万 m^3)

Fig. 6 Results of optimal allocation under normal and dry scenarios in 2030 (unit: 10^4m^3)

8.00%、10.21%。在旗(区)尺度上进行水量配置,结果表明,平水情境下,第三梯队地区优化配置水量满足发展的需求,第一、第二梯队地区出现不同程度缺水,其中伊金霍洛旗缺水率为1.66%,达拉特旗、乌审旗缺水较为严重,分别为13.00%、7.28%;枯水情境较平水情景缺水更严峻,缺水地区扩展到东胜区、达拉特旗、乌审旗、伊金霍洛旗,缺水率分别为0.09%、17.14%、7.47%、3.21%。

各旗(区)缺水率具有空间差异性,第一、第二梯队地区水资源较丰富,但缺水更严重,这是由于水资源配置考虑水网联通情境,并以经济效益最优为目标,协调各旗(区)水资源禀赋情况与消耗关系,体现了水网联通工程和以经济效益最优为目标在均衡各旗(区)水量配置的显著效果。枯水情境下蓄水有限,严重影响地表水供水工程的可供水量,同时枯水情境下农田灌溉定额增大,农业需水量增加,研究区总需水量增大,进一步加剧了水资源供需矛盾。今后亟须改善供水系统规模与管理,加强调蓄工程建设,提高对水资源的时空调控能力。

3.3.2 规划年行业缺水率

对2030年平、枯水情境下研究区整体行业缺水率进行分析,结果表明,工业、生活、生态用水均得到满足,未出现经济建设挤占生活和生态用水的情况,各情境下仅农业部门水资源出现供需失衡现象,平、枯水情境下,研究区整体农业缺水率分别为15.40%、19.69%,因此进一步针对农业缺水情况展开分析。

平水情境下,第三梯队地区未出现农业缺水情况,农业缺水的地区为第二梯队的伊金霍洛旗和第一梯队的达拉特旗、乌审旗,缺水率分别为6.46%、18.49%、13.61%。第二、第三梯队地区农业占比不大,灌溉效率高,需水量均较小,容易满足,农业缺水量低;第一梯队地区农业灌溉面积大,畜牧业发达,农业用水量大,而农业增加值低,在保护环境和保障

居民生活的前提下优先发展经济,农业用水被忽略,使得达拉特旗和乌审旗农业缺水较严重。枯水情境下,达拉特旗、东胜区、伊金霍洛旗、乌审旗4个区域出现农业缺水情况,缺水率分别为23.26%、8.38%、12.51%、15.40%。研究区整体水资源需增供减,导致行业用水竞争加剧,行业缺水程度增加,属于资源兼结构性缺水,也说明了黄河流域鄂尔多斯地区农业“望天收”的现状。

2030年平、枯水情境下,各区域配置水量基本满足生活、工业和生态行业需水,农业是唯一缺水部门,枯水年尤为严峻。因此,各旗(区)提倡发展高效节水型现代化农业以及低耗水高新技术产业,优化和完善产业结构至关重要。

3.3.3 规划年供水结构

2030年研究区供水结构分析结果如图7所示。与现状率相比,研究区整体供水类型(地下水、黄河水、地表水、再生水、疏干水)保持不变,但规划年平、枯水情境下各水源供给比例分别为29%、25%、14%、11%、21%和32%、24%、12%、11%、21%,较现状年地下水供给比例明显下降,黄河水、地表水、再生水、疏干水供水比例显著提升,水网联通背景下各旗(区)均为5类水源供水,较2023年供水结构显著优化。

未来,随着鄂尔多斯市经济发展,水网联通工程建设、黄河水和地表水高效利用的推进,以及对疏干水、再生水等非常规水源利用的日益重视,黄河水、地表水和非常规水(再生水、疏干水)的供给比例将逐渐提高,供水结构将进一步优化,从而促进地下水环境的良性循环及生态环境改善。

4 讨论

鄂尔多斯市是我国西部黄河“金腰带”上的金三角之一^[41],也是典型的资源兼工程性缺水城市,为实现经济发展规模与水资源可持续利用相协调,

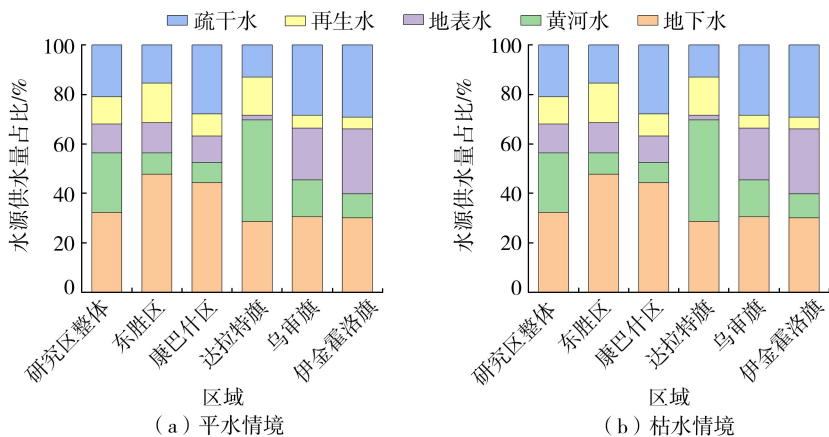


图 7 2030 年研究区平、枯水情境供水结构

Fig. 7 Water supply structure under normal and dry scenarios of study area in 2030

梁士奎等^[42]提出以“三条红线”为重点进行水资源配置,黄曼丽等^[43]认为区域水资源要以社会、经济和生态环境效益为目标进行优化配置,因此本文结合“三条红线”控制指标与相关水资源管理规划,构建了以区域缺水量最小、净效益最大、地下水利用量最小为目标的多水源-多用户-多目标水资源优化配置模型。

2030 年平、枯水情境下水资源配置方案表明,由于各区域产业结构不同,配置水资源量有显著的空间差异性,与栾清华等^[44]的研究结果一致。第一梯队地区以农业用水为主,需水量大,需水不容易满足,在枯水情境下,蓄水受限,且达拉特旗、乌审旗农作物以玉米为主,灌溉定额增大,缺水更严峻。第二梯队地区伊金霍洛旗属于偏工业多元化城市,各情境下供需水量处于略失衡状态。第三梯队地区为鄂尔多斯市中心城区,产业、人口聚集,生活、生态用水占比较大,农业用水占比较小,尤其是康巴什区,因此仅在枯水期东胜区农业略缺水。为缓解水资源空间分布不均衡引发的供需不平衡矛盾,文中考虑水网连通工程的建设,使区域缺水率、行业缺水率、供水结构较 Shi 等^[45]的研究结果有所改善。

5 结 论

a. 现状年(2023 年)研究区整体地下水、黄河水、地表水、再生水、疏干水供给占比分别为 60%、15%、5%、6%、14%,水源开发以地下水为主,其他水源利用程度低。

b. 规划年(2030 年)平水情境下研究区整体优化配置水量为 72319.15 万 m^3 ,最低需水量为 78610.01 万 m^3 ,综合缺水率为 8.00%;枯水情境下研究区整体优化配置水量为 71997.28 万 m^3 ,最低需水量为 80182.90 万 m^3 ,缺水率为 10.21%。农业缺水最严重,平、枯水情境下研究区整体农业缺水

率分别为 15.40%、19.69%,其中达拉特旗枯水情境下农业缺水率高达 23.26%。

c. 2030 年各情境下供水结构均得到显著改善,平、枯水情境下研究区整体地下水供给比例分别下降至 29%、32%;黄河水供给比例分别上升至 25%、24%;地表水供给比例分别为 14%、12%;各情境下再生水和疏干水供给比例分别为 11%、21%。地下水供给占比大幅度下降,其他 4 种水源供给量可观。

d. 未来应完善黄河水、地表水及非常规水(再生水、疏干水)利用设施的建设,大力发展循环经济,推广先进节水技术,节水和开源相结合,提高节水灌溉面积率和优化产业结构,促进黄河流域高质量发展。

参考文献:

- [1] 时荣超,郭文忠. 农业灌溉水资源优化配置研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 1-13. (SHI Rongchao, GUO Wenzhong. Research progress on the optimal allocation of agricultural irrigation water resources [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(4): 1-13. (in Chinese))
- [2] 陈锐. 基于生态重建的西部流域尺度水资源调控模式初探[J]. 中国科学院院刊, 2005, 20(1): 37-41. (CHEN Rui. The primary study on regulation and controlling of water resources in river basin scale of Western China based on ecological rehabilitation [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2005, 20(1): 37-41. (in Chinese))
- [3] 田进宽,郭佳航,左其亭,等. 沙颍河流域水资源配置思路与计算模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 62-67. (TIAN Jinkuan, GUO Jiahang, ZUO Qiting, et al. Thoughts and calculation model for water resources allocation in Shaying River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 62-67. (in Chinese))
- [4] 张娟娟,黎佳茜,吴瑞,等. 我国再生水循环利用: 现状、趋势及对策[J]. 环境科学, 2024, 45(12): 7031-7040.

- (ZHANG Juanjuan, LI Jiayi, WU Rui, et al. Recycling of reclaimed water in China: current situation, development trend, and countermeasures [J]. Environmental Science, 2024, 45(12): 7031-7040. (in Chinese))
- [5] 孙志林, 夏珊珊, 许丹, 等. 区域水资源的优化配置模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(2): 344-348. (SUN Zhilin, XIA Shanshan, XU Dan, et al. Optimal allocation model of regional water resources[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(2): 344-348. (in Chinese))
- [6] 陆建红, 王小双, 肖恒, 等. 基于 TOPSIS 的郑州市水资源综合效益评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 49-54. (LU Jianhong, WANG Xiaoshuang, XIAO Heng, et al. Evaluation of comprehensive benefits of water resources in Zhengzhou based on TOPSIS[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 49-54. (in Chinese))
- [7] 石奇伟, 段利民, 杨璐, 等. 鄂尔多斯市水资源承载力分析及障碍度诊断[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2025, 61(2): 129-140. (SHI Qiwei, DUAN Limin, YANG Lu, et al. Analysis of water resource carrying capacity and obstacle diagnosis in Ordos City[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2025, 61(2): 129-140. (in Chinese))
- [8] 陈军飞, 张学友, 李远航, 等. 考虑利他偏好的南水北调水资源供应链生态补偿契约决策[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 18-28. (CHEN Junfei, ZHANG Xueyou, LI Yuanhang, et al. Ecological compensation contract decision of water resources supply chain in South-to-North Water Diversion Project considering altruistic preference [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 18-28. (in Chinese))
- [9] 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 construction of water network in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 1-5. (in Chinese))
- [10] 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 resource allocation schemes based on normal cloud combination weighting [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 56-61. (in Chinese))
- [11] 崔振才, 于纪玉, 王启田. 模糊约束线性规划在日照区域水资源承载能力评价中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 27-32. (CUI Zhencai, YU Jiyu, WANG Qitian. Application of fuzzy constraint linear programming to assessment of carrying capacity of Rizhao regional water resources system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 27-32. (in Chinese))
- [12] 黄永皓, 张勇传. 微分动态规划及回归分析在水库群优化调度中的应用[J]. 水电能源科学, 1986, 4(4): 315-322. (HUANG Yonghao, ZHANG Yongchuan. Application of differential dynamic programming and regression analysis in reservoir optimization dispatching [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1986, 4(4): 315-322. (in Chinese))
- [13] 王霞, 唐德善, 赵洪武, 等. 太子河流域水资源优化配置供水模型[J]. 水利水运工程学报, 2005(2): 46-52. (WANG Xia, TANG Deshan, ZHAO Hongwu, et al. Optimal allocation of water resources in Taizi River Basin [J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(2): 46-52. (in Chinese))
- [14] 孟丽红, 陈亚宁, 徐祥明, 等. 基于可变模糊评价法的塔里木河流域水资源承载力研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 162-167. (MENG Lihong, CHEN Yaning, XU Xiangming, et al. Assessing water resources carrying capacity in Tarim River Basin using a variable fuzzy model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 162-167. (in Chinese))
- [15] 韩雨航. 精细化水资源优化配置模型构建及应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [16] 方国华, 王雪, 方应学, 等. 基于改进粒子群优化算法的区域水量水质联合配置模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 58-64. (FANG Guohua, WANG Xue, FANG Yingxue, et al. Regional water quantity and water quality joint allocation model based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 58-64. (in Chinese))
- [17] 陈晶, 华中, 孔敏, 等. 基于改进蚁群智能算法求解下的多目标农业水资源配置模型分析研究[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(1): 8-12. (CHEN Jing, HUA Zhong, KONG Min, et al. Analysis and study of multi-objective agricultural water resources allocation model solved by improved ant colony optimization algorithm [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2022, 28(1): 8-12. (in Chinese))
- [18] MOUSAVI S Z, AKHONDALI A M, NASERI A, et al. Evaluation of whale and particle swarm optimisation algorithms in optimal allocation of water resources of irrigation network to maximise net benefit case study: Salman Farsi [J]. International Journal of Hydrology Science and Technology, 2021, 12(3): 333-345.
- [19] 张凯, 沈洁. 基于萤火虫算法和熵权法的水资源优化配置[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 50-53. (ZHANG Kai, SHEN Jie. Optimal allocation of water resources based on firefly algorithm and entropy method [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 50-53. (in Chinese))
- [20] LI Ruihuan, CHANG Yingli, WANG Zhaocai. Study of optimal allocation of water resources in Dujiangyan

- irrigation district of China based on an improved genetic algorithm[J]. Water Supply, 2021, 21(6): 2989-2999.
- [21] 周天宇. 基于改进 NSGA-III 算法的三峡水库多目标精细优化调度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [22] 袁志朋, 杨侃, 陈静, 等. 基于 NSGA-III 的区域水资源多目标优化配置方案决策[J]. 人民黄河, 2024, 46(7): 79-84. (YUAN Zhipeng, YANG Kan, CHEN Jing, et al. Multi-objective optimal allocation scheme decision of regional water resources based on NSGA-III [J]. Yellow River, 2024, 46(7): 79-84. (in Chinese))
- [23] 崔彩琪. 黄河流域十大孔兑地区水资源多维承载力与优化调配研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [24] GAO Yayu, ZHANG Xinmin, ZHANG Xiaoyou, et al. Application of NSGA-II and improved risk decision method for integrated water resources management of Malian River Basin[J]. Water, 2019, 11(8): 1650.
- [25] 朱思峰, 李子胥. 基于改进型 NSGA-II 算法的晋中市水资源优化配置[J]. 中国农村水利水电, 2023(5): 91-97. (ZHU Sifeng, LI Zixu. Research on the optimal allocation of water resources based on improved NSGA-II algorithm in Jinzhong City [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(5): 91-97. (in Chinese))
- [26] 宋志红, 刘渊, 江生金, 等. 引江济淮工程(河南段)多目标水量优化调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 39-47. (SONG Zhihong, LIU Yuan, JIANG Shengjin, et al. Multi-objective water optimal dispatching of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project (Henan section) [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 39-47. (in Chinese))
- [27] 程度良, 李九一, 宋小燕, 等. 基于改进 TOPSIS 算法的鄂尔多斯市水资源承载力综合评价[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(6): 101-110. (CHENG Duliang, LI Jiuyi, SONG Xiaoyan, et al. Evaluation on water resources carrying capacity of Ordos City based on improved TOPSIS [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(6): 101-110. (in Chinese))
- [28] 石奇伟. 鄂尔多斯市多维水资源承载力与优化调配研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- [29] 江恩慧, 王远见, 田世民, 等. 流域系统科学初探[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1026-1037. (JIANG Enhui, WANG Yuanjian, TIAN Shimin, et al. Exploration of watershed system science [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1026-1037. (in Chinese))
- [30] 李金燕, 郭娇, 崔岚博, 等. 宁夏中南部调水工程受水区水资源配置效果评价[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1601-1611. (LI Jinyan, GUO Jiao, CUI Lanbo, et al. Evaluation on the effect of water resources allocation in the water receiving area of the central and southern Ningxia water transfer project [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1601-1611. (in Chinese))
- [31] 彭少明, 黄强, 刘涵, 等. 黄河流域水资源可持续利用多目标规划模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(6): 97-102. (PENG Shaoming, HUANG Qiang, LIU Han, et al. Sustainable utilization model of water resources in main stream of the Yellow River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(6): 97-102. (in Chinese))
- [32] 郇生霞, 颜志俊, 何梁, 等. 内蒙古干旱区水资源合理配置研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 54-58. (TAI Shengxia, YAN Zhijun, HE Liang, et al. A study on the scientific allocation of water resources in arid area of Inner Mongolia [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2005, 26(3): 54-58. (in Chinese))
- [33] 张权, 李凌琪, 江恩慧, 等. 基于 NSGA-II 的鄂尔多斯市多目标水量分配结构优化[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 22-30. (ZHANG Quan, LI Lingqi, JIANG Enhui, et al. Optimization of multi-objective water quantity allocation structure in Ordos City based on NSGA-II [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(5): 22-30. (in Chinese))
- [34] 赵燕, 武鹏林, 祝雪萍. 基于改进萤火虫算法的水资源优化配置[J]. 人民黄河, 2019, 41(5): 62-66. (ZHAO Yan, WU Penglin, ZHU Xueping. Optimal allocation of water resources based on modified firefly algorithm [J]. Yellow River, 2019, 41(5): 62-66. (in Chinese))
- [35] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [36] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [37] 于芷婧, 尚松浩. 华北轮作农田灌溉制度多目标优化模型及应用[J]. 水利学报, 2016, 47(9): 1188-1196. (YU Zhijing, SHANG Songhao. Multi-objective optimization method for irrigation scheduling of crop rotation system and its application in North China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(9): 1188-1196. (in Chinese))
- [38] 王慧, 高泽海, 孙超, 等. 基于 NSGA-II 的灌区水资源优化配置模型及应用[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 118-124. (WANG Hui, GAO Zehai, SUN Chao, et al. Water resource allocation for irrigation optimized using the NSGA-II model: theory and application [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 118-124. (in Chinese))
- [39] 负汝安, 董增川, 王好芳. 基于 NSGA2 的水库多目标优化[J]. 山东大学学报(工学版), 2010, 40(6): 124-128. (YUN Ruan, DONG Zengchuan, WANG Haofang.

Multiobjective optimization of a reservoir based on NSGA2 [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(6): 124-128. (in Chinese))

[40] 刘美钰,张雷,栾清华,等. 人工鱼群算法在河间市水资源优化配置中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2021 (3): 74-83. (LIU Meiyu, ZHANG Lei, LUAN Qinghua, et al. Application of artificial fish swarm algorithm in optimal allocation of water resources in Hejian County, China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021 (3): 74-83. (in Chinese))

[41] 刘霞,刘辉,苏丽娟,等. 基于 AHP—熵值综合赋权法的煤炭资源型城市生态-经济-社会协调发展分析:以鄂尔多斯市为例[J]. 生态科学, 2023, 42(3): 213-224. (LIU Xia, LIU Hui, SU Lijuan, et al. Analysis on the coordinated development of ecology-economy-society based on AHP-entropy weight method in coal resource cities: a case study of Ordos City[J]. Ecological Science, 2023, 42 (3): 213-224. (in Chinese))

[42] 梁士奎,左其亨. 基于人水和谐和“三条红线”的水资源配置研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44 (7): 1-4. (LIANG Shikui, ZUO Qiting. Study on water resources allocation based on human-water harmony and “Three Red Lines ” [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(7): 1-4. (in Chinese))

[43] 黄曼丽,张健,丁大发,等. 基于遗传算法的区域水资源优化配置研究[J]. 人民长江, 2008, 39 (6): 29-32. (HUANG Manli, ZHANG Jian, DING Dafa, et al. Research on optimal allocation of regional water resources based on genetic algorithm [J]. Yangtze River, 2008, 39 (6): 29-32. (in Chinese))

[44] 栾清华,高昊悦,刘红亮,等. 基于 GWAS 模型的武安市水资源优化配置[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 32-42. (LUAN Qinghua, GAO Haoyue, LIU Hongliang, et al. Optimal allocation of water resources in Wu’ an City based on GWAS model[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 32-42. (in Chinese))

[45] SHI Qiwei, DUAN Limin, CUI Caiqi, et al. Optimal allocation of water resources in Ordos City based on the general water allocation and simulation model[J]. Water, 2024, 16(12): 1711.

(收稿日期: 2025 - 01 - 09 编辑: 施业)

+++++

(上接第 138 页)

[21] 陈浮,朱新华. 全球气候变化语境下水安全的维度与治理[J/OL]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 1-11 (2024-11-27). <https://link.cnki.net/urlid/32.1521.C.20241126.1537.004>. (CHEN Fu, ZHU Xinhua. Dimensions and governance of water security in the context of global climate change [J/OL]. Journal of Hohai University(Philosophy and social sciences), 1-11 (2024-11-27). <https://link.cnki.net/urlid/32.1521.C.20241126.1537.004>. (in Chinese))

[22] 张姣,胡庆芳,黄璟胜,等. 基于 ITA 法和 Mann-Kendall 法的漓江流域极端降水变化解析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 15-22. (ZHANG Jiao, HU Qingfang, HUANG Jingsheng, et al. Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (6): 15-22. (in Chinese))

[23] 王皓,罗静,叶金印,等. CMORPH 融合降水产品与地面观测雨量资料估算淮河流域面雨量对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42 (3): 189-194. (WANG Hao, LUO Jing, YE Jinyin, et al. Comparative analysis of area rainfall in Huaihe River Basin estimated by CMORPH-gauge merged data and observed rain gauge data[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014, 42(3): 189-194. (in Chinese))

[24] 吴勇拓,李致家,戚振亚,等. 基于水文模型的缺资料小流域设计洪水计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 1-8. (WU Yongtuo, LI Zhijia, QI Zhenya, et al. Design flood calculation of watershed with lack of data based on hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (6): 1-8. (in Chinese))

[25] 华家鹏. 小流域设计洪水的计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1998, 26 (2): 100-104. (HUA Jiapeng. Calculation method of design flood for small watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1998, 26(2): 100-104. (in Chinese))

[26] 何向东. 无资料地区小流域设计暴雨计算方法[J]. 地下水, 2017, 39(3): 120-122. (HE Xiangdong. Calculation method of designed rainstorm in small watershed with no data [J]. Groundwater, 2017, 39 (3): 120-122. (in Chinese))

[27] 尹瑞琪,李琼芳,陈启慧,等. 伊犁河上游流域三种日尺度降水产品性能评估[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 540-549. (YIN Ruiqi, LI Qiongfang, CHEN Qihui, et al. Performance evaluation of three daily precipitation products in the upper reaches of the Ili River[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 540-549. (in Chinese))

[28] 段树萍,郭飞,梁学和. 水文分析与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022: 209.

(收稿日期: 2024 - 11 - 24 编辑: 施业)