

温天福, 邹钰, 游进军, 等. 基于 MIKE Basin 的袁河流域枯水期水库群联合供水调度研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 33-44. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.003

WEN Tianfu, ZOU Zhu, YOU Jinjun, et al. Study on coordinated water supply scheduling of reservoir groups during dry season in Yuanhe River Basin based on MIKE Basin model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 33-44. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.003

基于 MIKE Basin 的袁河流域枯水期水库群联合供水调度研究

温天福^{1,2}, 邹钰¹, 游进军³, 赵楠芳^{1,2}, 马真臻³, 刘鑫^{1,2}

(1. 江西省水利科学院, 江西南昌 330029; 2. 水旱灾害防御江西省重点实验室, 江西南昌 330029; 3. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:【目的】2022 年鄱阳湖流域遭遇罕见的夏秋连旱、汛期极枯的干旱事件, 河流和水库水位持续降低, 开展流域水库群供水联合调度可缓解水资源供需矛盾突出的问题。【方法】以赣江袁河流域为例, 选取 10 个重点供水工程和 30 个关键供水对象, 运用 MIKE Basin 构建了流域水库联合供水调度模型, 提出水库联合供水调控措施并分析流域供水调度效果。【结果】针对 2001、2007 年和 2022 年等典型年份, 袁河流域有山口岩灌区、袁河水厂、飞剑潭灌片、袁南灌区、袁惠渠灌区、濠河灌区等 6 个用水户存在缺水现象, 缺水率范围为 0.2%~28.9%; 在采取调整山口岩、飞剑潭和江口水库供水限制水位, 调整山口岩水库供水对象以及新增水库工程等 3 种调控措施后, 主要用水对象缺水程度有明显改善, 缺水率平均下降 7.2%; 在 90%、95% 和 99% 3 种来水频率下, 山口岩灌区、飞剑潭灌片及袁惠渠灌区缺水率平均下降 7.41%、3.46% 和 2.28%。【结论】根据实际缺水情况提出的水库调控措施, 有效改善了枯水期流域灌区等主要用水对象的缺水程度, 可为流域应对极端干旱事件提供技术支撑。

关键词: 极端干旱; 供水调度; 缺水率; MIKE Basin 模型; 袁河流域

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.003

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV697.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0033-12



Study on coordinated water supply scheduling of reservoir groups during dry season in Yuanhe River Basin based on MIKE Basin model

WEN Tianfu^{1,2}, ZOU Zhu¹, YOU Jinjun³, ZHAO Nanfang^{1,2}, MA Zhenzhen³, LIU Xin^{1,2}

(1. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Flood and Drought Disaster Defense, Nanchang 330029, Jiangxi, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

收稿日期: 2024-09-09; 修回日期: 2025-01-23; 录用日期: 2025-01-24; 网络出版日期: 2025-04-03

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3206002); 江西省水利科技项目(202325ZDKT14); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-202215)

作者简介: 温天福(1981—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: wen-tianfu@whu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] In 2022, the Poyang Lake Basin experienced a rare drought event with consecutive summer and autumn aridity and extremely low water levels during the flood season, leading to sustained declines in river and reservoir water levels. Implementing coordinated water supply scheduling for the reservoir groups in the basin can alleviate the prominent imbalance between water supply and demand. [Methods] Taking the Yuanhe River Basin (a tributary of the Ganjiang River) as an example, 10 key water supply projects and 30 critical water supply targets were selected. A coordinated water supply scheduling model for reservoirs in the basin was established using the MIKE Basin model. Coordinated water supply regulation measures for reservoirs were proposed, and the water supply scheduling effects in the basin were analyzed. [Results] In typical years such as 2001, 2007, and 2022, six water consumers in the Yuanhe River Basin, including the Shankouyan irrigation area, Yuanhe Water Plant, Feijiantan irrigation area, Yuannan irrigation area, Yuanhuiqu irrigation area, and Menghe irrigation area, experienced water shortages with water shortage rates ranging from 0.2% to 28.9%. After implementing three regulation measures, including adjusting the limit water levels of water supply for Shankouyan, Feijiantan, and Jiangkou reservoirs, adjusting the water supply targets for Shankouyan reservoir, and adding new reservoir projects, the water shortage levels of the main water consumers significantly improved, achieving an average 7.2% reduction in water shortage. Under three inflow frequencies of 90%, 95%, and 99%, the water shortage rates for Shankouyan irrigation area, Feijiantan irrigation area, and Yuanhuiqu irrigation area decreased by an average of 7.41%, 3.46%, and 2.28%, respectively. [Conclusion] Based on the actual water shortage conditions, reasonable reservoir regulation measures are proposed, which effectively improves the water shortage levels of major water consumers, such as irrigation areas in the dry season. These measures can provide technical support for the response to extreme drought events in river basins.

Keywords: extreme drought; water supply scheduling; water shortage rate; MIKE Basin model; Yuanhe River Basin

0 引言

2022年, 鄱阳湖流域遭遇特大干旱, 流域出现“汛期反枯”的水文过程, 7—9月流域降雨量为164.1 mm, 仅占年降雨量9.6%, 为近40年来最低^[1]。连续的高温干旱使得流域内供水工程可供水量迅速减少, 对社会经济、生态系统等带来很大影响^[2], 也对流域工程供水调度带来了严峻的挑战。水库是供水工程的重要组成部分, 开展流域水库群供水调度可调整水资源时空分配, 提高行业用水量及供水保障程度, 对于社会经济稳定具有重大意义^[2-3]。水库群供水调度具有多目标、多约束和多阶段等特点^[4]。基于生物进化和人工智能的优化算法具备较强的全局寻优和并行计算能力, 成为当前供水调度模型求解的重要方法。OUYANG等^[5]采用综合跨流域引水水库调节(IDR)模型, 建立了丹江口水库多目标供水调度模型, 并选取6个评价指标对比分析方案效果。彭安帮等^[6]提出考虑生态补水目标的丹江口水库供水调度模型, 采用NSGA-II获得多目标联合调度方案。彭方旭等^[7]以弃水量最小为目标建立多水库复杂联合供水调度模型, 采用改进粒子群算法优化调度过程, 提高了供水保证率。程毅^[8]基于差分进化-自适应Metropolis算法求解了嘉陵江水库群联合供水调度问题。实际上, 优化算法提升水库供水能力有限, 改变水库现状才能更好地提升区域供水效率^[7]。同时,

优化水库供水规则或调度次序也可提升供水调度过程的合理性和可行性^[9]。林鹏飞等^[10]提出了面向双保证率的水库供水能力双层优化方法, 满足多个保证率要求对水库调度规则和供水能力进行同步优化。优化供水规则先将水库群聚合为虚拟水库, 优化调度图后将供水任务分配至各成员水库^[11], 而优化蓄供水次序侧采用供水补偿调节法或蓄水量指标评价等方式^[12]。为了实现水库群蓄供水次序与调度图联合优化, 康艳等^[13]提出了蓄供水次序与调度图双层优化方法, 分析了蓄供水次序变化对供水效益的影响。王宗志等^[14]考虑调水和供水效率, 建立了水库调供水规则的水库优化调度模型, 并采用理想点法和遗传算法对调度规则寻优。基于水库优先利用区间水的原则, 张可等^[15]建立了考虑径流丰枯特性的闸坝-水库联合调度模型, 利用改进的遗传算法求解得到调度规则。

实际上, 目前一些界面友好、运算高效的模型软件^[16-17]在流域供水调控中得到推广运用, 也逐渐成为一个重要的研究方向。丹麦水利研究所研制的MIKE Basin侧重于结合不同调度方式及用水过程进行水资源调控, 在我国多个流域有着成功的应用案例^[18-24]。孙栋元等^[25]基于MIKE Basin建立石羊河流域水资源管理模型, 反映了用水节点水资源供需关系和优先权限, 可以实现流域水资源合理规划与配置。

赵方玲等^[26]运用 MIKE Basin 优化感潮河段闸一站运行方案, 显著降低运行能耗。AGRAWAL 等^[27]以印度 Parvati 流域为例, 基于 MIKE Basin 构建流域尺度可持续水资源管理综合模型, 实现不同气候条件和种植模式下水库的实时运行模拟。MULAT^[28]利用 MIKE Basin 模型建立了 Tana 流域的水量平衡模型, 分析水资源分配方案及其不同发展情景下的潜在变化。然而, 目前研究以流域水资源模拟与配置为主, 针对主要用水户开展结合调度规则的流域水库群供水调度相对较少。此外, 运用模型系统分析不同调度措施、来水频率的水库供水调度效果, 支撑流域水利工程的相关规划仍然需要进一步加强。

袁河流域是赣江下游重要的一级支流, 流域内水库、塘坝等供水工程以及水厂、灌区等供水对象较多, 在干旱情况下仍然存在部分时段缺水程度较高等问题, 开展极端干旱下流域水库群联合供水调度研究十分必要。本文充分考虑流域不同的供水调控措施, 基于水库供水规则及用水户优先级, 运用 MIKE Basin 构建流域水库群供水调度模型, 分析干旱情况下不同措施对水库群联合供水调度的影响, 为袁河流域水库调度及抗旱决策提供有力的支撑。

1 流域概况与数据来源

1.1 袁河流域

袁河又称袁水, 为赣江下游左岸一级支流, 流域

面积 6 262 km², 主河道长 279 km, 涉及萍乡、宜春、新余 3 市 7 县(市、区)62 个乡镇, 主要包括上游芦溪县、中游袁州区及下游分宜县和渝水区。流域现有山口岩、飞剑潭、四方井和江口水库 4 座大型水库以及上石、沙江、酌江水库等 11 座重要中型水库, 总库容为 13.72 亿 m³, 兴利库容为 6.55 亿 m³。袁河流域水系分布如图 1 所示。

流域内生活用水户有芦溪水务、袁河水厂、新余三水厂等, 取水口分别位于山口岩水库、袁河干流和江口水库, 年取水规模分别为 1 095 万 m³, 3 760 万 m³ 和 2 600 万 m³。工业用水户有芦溪县工业、袁州区工业、分宜电厂、新余钢铁厂等, 其中分宜电厂和新余钢铁厂取水口分别位于江口水库和袁河干流, 年取水规模分别为 5 500 万 m³、6 132 万 m³。农业用水户有山口岩灌区、袁北灌区(由飞剑潭、沙江和酌江灌片组成)、袁南灌区、濛河灌区和袁惠渠灌区等, 有效灌溉面积 634 km²。其中, 山口岩灌区有效灌溉面积为 36.7 km², 利用山口岩水库发电尾水灌溉; 飞剑潭灌片有效灌溉面积为 137.3 km², 由灌片内小型水库及塘坝, 上石水库、飞剑潭水库依次供水; 袁惠渠灌区有效灌溉面积为 190 km², 利用江口水库发电尾水灌溉。流域内大型水库的特征值及供水对象如表 1 所列。

1.2 数据来源

流域数字高程数据为 ASTER GDEM 30M, 来自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>)。

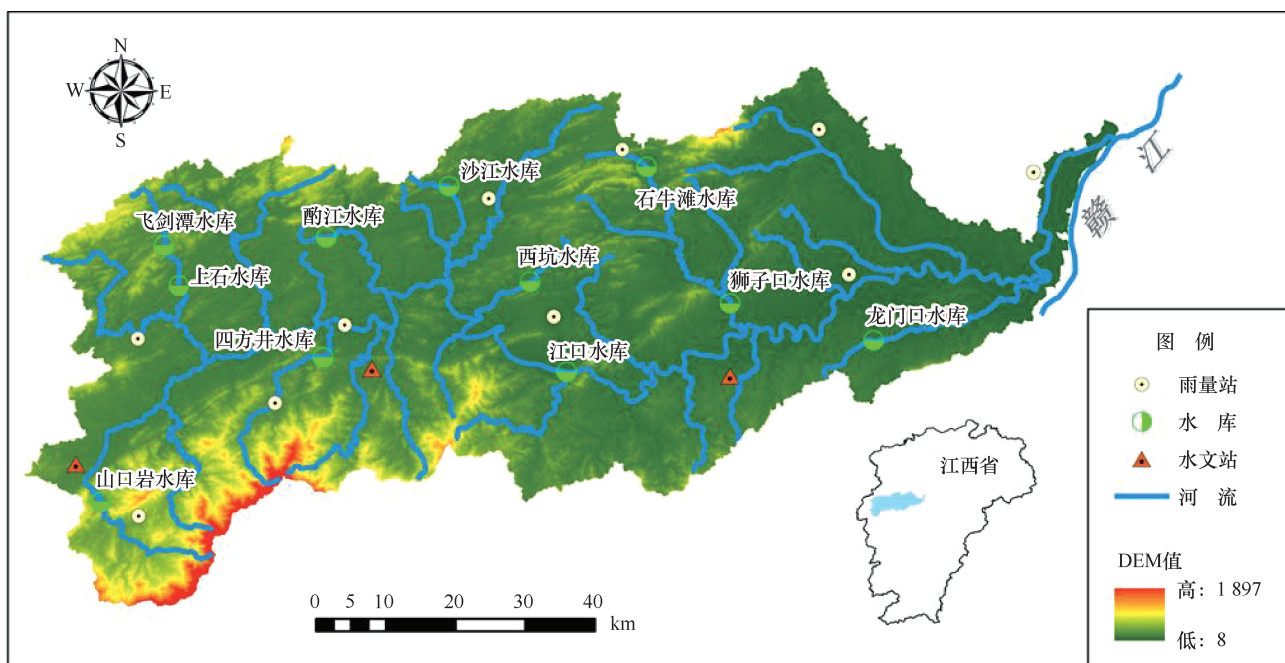


图 1 袁河流域水系及重要水库分布

Fig. 1 River network and main reservoir distribution in Yuanhe River Basin

表 1 大型水库特征值及供水对象

Table 1 Characteristic values and water supply targets of large reservoirs

水库名称	正常蓄水位/m	死水位/m	汛限水位/m	兴利库容/亿 m ³	供水对象
山口岩水库	244.0	221.0	243.0	0.624	白源水厂、芦溪水务、山口岩灌区
飞剑潭水库	178.0	164.0	177.0	0.748	飞剑潭灌片
江口水库	69.5	65.0	68.5	3.400	分宜电厂、新余四水厂、袁惠渠灌区

1980—2022 年王源、温汤、竹亭等 13 个雨量站逐日降雨以及芦溪、土库和神山 3 个水文站逐日蒸发和流量等数据序列, 来源于江西省水资源监测中心。2022 年白源水厂、芦溪水务、袁南灌区、新余钢铁厂等重要用水户季度取水量, 来自江西省用水统计调查直报管理系统。大型水库特征水位、水库库容面积曲线及 2022 年实测出入库流量及水位数据, 来自各水库管理单位。

2 研究方法

2.1 需水计算

流域需水按用水行业划分为生活、工业、农田灌溉和生态需水。江西省用水统计调查直报系统中用水户实际取水数据为季度数据, 考虑到生活、工业用水相对平稳, 日尺度生活需水 $W_{liv}(t)$ 和工业需水 $W_{ind}(t)$ 进行均化处理。农田灌溉需水由水稻和经济作物灌溉需水以及灌区内生态需水(仅大型灌区)组成, 流域内灌区作物以水稻(早、晚稻)为主, 占 80%, 且水稻灌溉需水量远大于经济作物, 故以水稻灌溉需水替代作物灌溉需水。根据水稻间歇性灌溉制度, 利用日降雨和日蒸发数据, 按田间水量平衡原理计算净灌溉定额, 其计算公式为

$$M = \sum_{t=1}^{365} m(t) = a \times E(t) + L(t) + C(t) + h(t) - h(t-1) - P(t) \quad (1)$$

式中, M 为净灌溉定额(mm); $m(t)$ 为第 t 日水稻净灌水量(非灌溉期净灌水量为 0)(mm); a 为时段内水稻蒸腾系数; $E(t)$ 为第 t 日水面蒸发量(mm); $L(t)$ 为第 t 日田间渗漏水量(mm); $C(t)$ 为第 t 日田间排水量(mm); $h(t)$ 、 $h(t-1)$ 为第 t 、 $t-1$ 日田间水深(mm); $P(t)$ 为第 t 日降雨量(mm)。

农田灌溉需水量计算公式为

$$W_{arg} = \frac{10 \times M \times S}{\eta} \quad (2)$$

式中, W_{arg} 为农田灌溉需水(m³); S 为灌区面积(m²); η 为灌溉水利用系数。

生态需水 W_{eco} 仅考虑袁北灌和袁惠渠灌区生态用水, 以及坝后河道最小生态需水。大型灌区生态需

水直接取灌区设计成果, 坝后河道最小生态需水根据 Tennant 方法取多年平均来水的 10%。

2.2 MIKE Basin 模型

2.2.1 径流模拟

基于 MIKE Basin 中 Rainfall-runoff 模块(NAM 模型)模拟区域逐日来水过程。NAM 集总式降雨径流模型结构简单, 自上而下有融雪、地表、浅层、地下四层蓄水体(本研究不考虑融雪蓄水体)。模型的输入数据为区域降雨量和蒸发量, 根据出口断面实测流量率定参数。为了体现水库的来流过程以及用水户取水口的流量过程, 以重要供水工程及重要取水口位置为依据, 将流域划分为 30 个集水区 C1—C30, 如图 2 所示。C1、C6、C7、C11、C12、C16、C17、C23、C25 分别为山口岩、飞剑潭、上石、酌江、沙江、江口、西坑、石牛滩和狮子口水库的集雨面积, 其余为各重要用水户取水口的集雨面积。

NAM 模型参数率定选取袁河上游芦溪水文站, 该站集水面积 331 km²。为了避免上游山口岩水库调度运行的影响, 模型率定期取 1980—1999 年, 验证期取 2000—2003 年。模型率定期、验证期的确定性系数分别为 0.65、0.70, 相对误差分别为 1.2%、-3.9%, 模拟精度较高, 可用于袁河流域水库群的供水调度模拟。

2.2.2 供水调度

利用 DEM 数据自动追踪河流流向生成水系, 在相应位置添加水库、用水户和取水口。流域用水行业存在水库供水、河道内直接取水两种方式。对于水库供水, 一个水库或取水口可向单个或多个用水户按优先级供水: 山口岩水库供水顺序依次为白源水厂、芦溪水务、山口岩灌区; 飞剑潭水库供水顺序依次为飞剑潭灌片、酌江灌片; 江口水库供水顺序依次为第三水厂、分宜电厂、袁惠渠灌区; 龙门口水库供水顺序依次为南安水厂、龙门口灌区。流域内一个用水户可从一个或多个取水口取水, 其中飞剑潭灌片可从飞剑潭水库和上石水库取水; 第四水厂可从孔目江、狮子口水库和石牛滩水库取水。对于河道内取水, 有 9 个

用水户直接从河道取水, 如芦溪工业、袁河水厂、新余钢铁厂等。根据实际情况确定供取水关系, 如图 3 所示。根据水库坝后河道最小生态需水, 山口岩、飞剑潭和江口水库最小下泄流量为 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

Basin simulation 提供了多水库供水调度系统。除了设置水库特征水位、曲线等属性外, 每座水库还可以设置供水范围、对象和规模等参数, 以模拟特定运

行规则和供水要求。该系统根据各节点水量平衡运用水库调度规则模拟流域供水过程, 采用缺水率为目标函数, 同样用于评价水库调控措施的效果。函数形式为

$$\min P = \frac{WD - WS}{WD} \quad (3)$$

式中, P 为缺水率(%); WS 为总供水量(m^3); WD 为总需水量(m^3)。

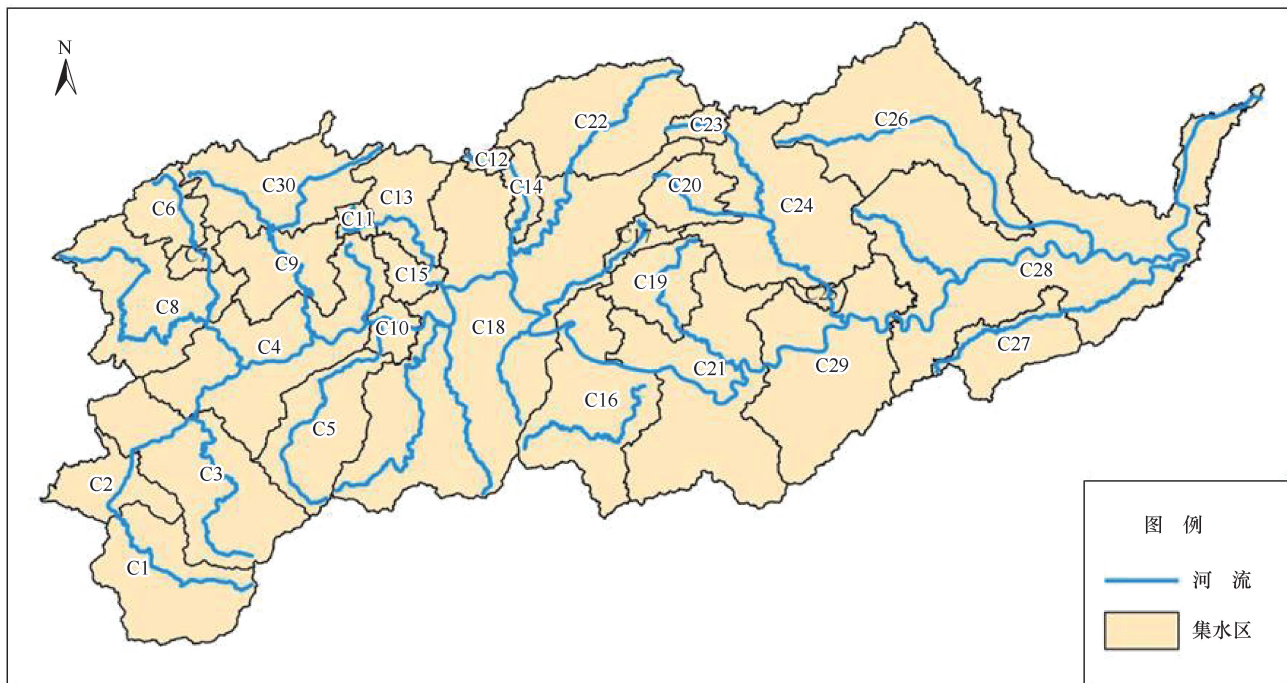


图 2 袁河流域集水区划分

Fig. 2 Division of catchment area in Yuanhe River Basin

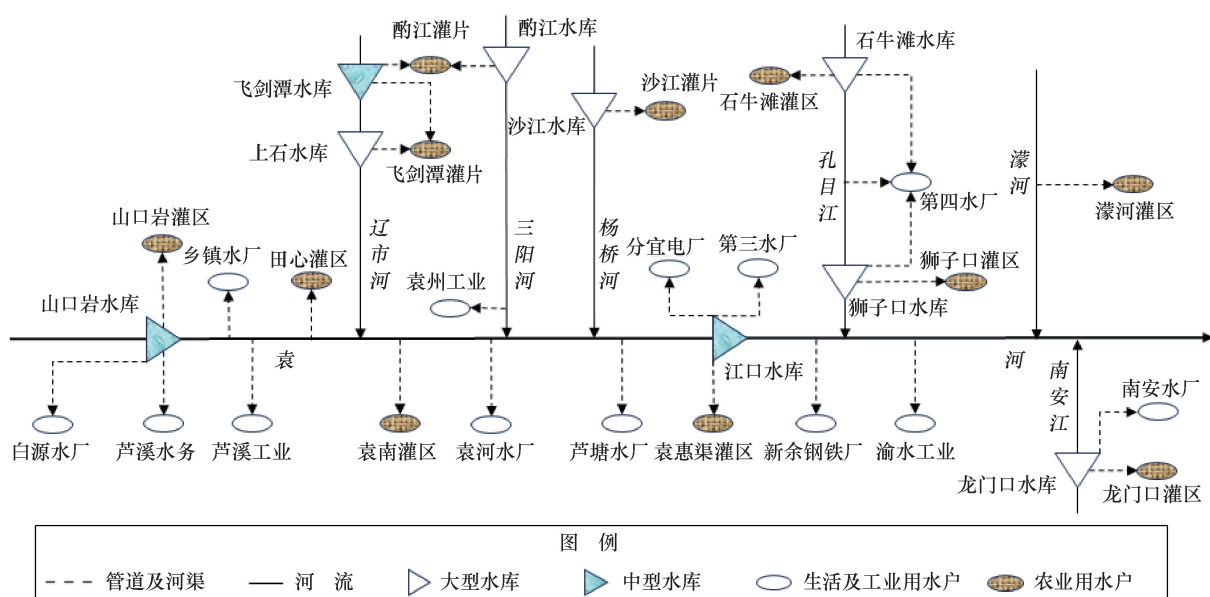


图 3 袁河流域供水关系

Fig. 3 Water supply network in Yuanhe River Basin

约束条件包括水量平衡、库水位、水库可供水量及用水户需水量等。

(1) 水量平衡约束。计算公式如下

$$V(t) = V(t-1) + [Q(t) - q(t)] \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中, $V(t)$ 、 $V(t-1)$ 分别为第 t 、 $t-1$ 日的水库蓄水量(m^3); $Q(t)$ 和 $q(t)$ 分别为第 t 日的入库和出库流量(m^3/s), 其中出库流量由坝址最小生态流量及供水量和可能的弃水量等组成。

(2) 库水位约束。约束范围如下

$$Z_{\min}(t) \leq Z_k(t) \leq Z_{\max}(t) \quad (5)$$

式中, $Z_k(t)$ 为第 t 日第 k 个水库水位(m); $Z_{\min}(t)$ 、 $Z_{\max}(t)$ 分别为第 t 日水库最低、最高水位(m)。

水库最低水位为死水位, 最高水位在汛期(4—9月)为汛限水位, 其余月份为正常蓄水位。

(3) 水库可供水量约束。即第 i 个水库供给供水范围内所有对象的水量之和不超过该水库的可供水量, 约束范围如下

$$\sum_{i=1}^I x_{ki} \leq WS_k \quad (6)$$

式中, x 为第 k 个水库向第 i 个用水对象的供水量(m^3); WS_k 为水库 k 的最大可供水量(m^3)。

(4) 用水户需水量约束。即第 j 个用水户接受多个水库供给水量之和不超过该用水户的需水量, 约束范围如下

$$\sum_{k=1}^K x_{kj} \leq WD_j \quad (7)$$

式中, x 为第 k 个水库向第 j 个用水对象的供水量(m^3); WD_j 为用水户 j 的需水量(m^3)。

3 结果分析

3.1 供需水分析

3.1.1 典型年选取

选取 1982—2022 年流域内 13 个雨量站, 采用 P-III 曲线计算袁河流域年降水量和 7—9 月降水量。2001、2007 年和 2022 年为袁河流域出现旱情的年份, 2001 年流域年降水频率为 76.2%, 7—9 月降水频率为 97.1%, 为“枯水年汛期极枯”典型年份; 2007 年流域年降水频率为 97.2%, 7—9 月降水频率为 54.3%, 为“极枯年汛期非枯”典型年份; 2022 年流域年降水频率为 38.6%, 7—9 月降水频率为 98.5%, 为“丰水年汛期极

枯”典型年份。为了全面分析水库群供水调度, 选择 2001、2007 和 2022 年为流域干旱典型年, 其来水特征如表 2 所列。

表 2 典型年降水特征

Table 2 Precipitation characteristics of typical years

典型年份	全年		7—9月		降水特征
	降水量 /mm	降水频率	降水量 /mm	降水频率	
2001	1 451.6	76.2%	168.7	97.1%	枯水年汛期极枯
2007	1 158.2	97.2%	315.3	54.3%	极枯年汛期非枯
2022	1 715.7	38.6%	162.8	98.5%	丰水年汛期极枯

3.1.2 用水户需水分析

(1) 生活、工业需水。根据江西省用水统计调查直报系统, 2022 年袁河流域主要生活及工业用水户需水量如图 4 所示。生活总需水量为 22 974 万 m^3 , 其中袁河水厂年需水量最大, 为 8 800 万 m^3 , 占生活总需水量的 38.3%; 工业总需水量为 12 528 万 m^3 , 其中新余钢铁厂年需水量最大, 为 6 039 万 m^3 , 占工业总需水量的 48.2%。

(2) 农业需水。选用 2001、2007 年和 2022 年三个典型年逐日降水、蒸发数据, 以袁北灌区早、晚稻灌溉制度为标准, 计算各灌区农田灌水定额及其逐日灌溉水量。袁河流域农田灌溉期主要在 4—10 月, 其中 7—10 月为灌溉高峰期。以袁惠渠灌区为例, 2001 年总需水量为 3.41 亿 m^3 , 其中 7—10 月需水量为 2.35 亿 m^3 , 占总需水量的 68.9%; 2007 年总需水量为 3.11 亿 m^3 , 其中 7—10 月需水量为 2.08 亿 m^3 , 占总需水量的 66.9%; 2022 年总需水量为 4.04 亿 m^3 , 其中 7—10 月需水量为 2.98 亿 m^3 ,

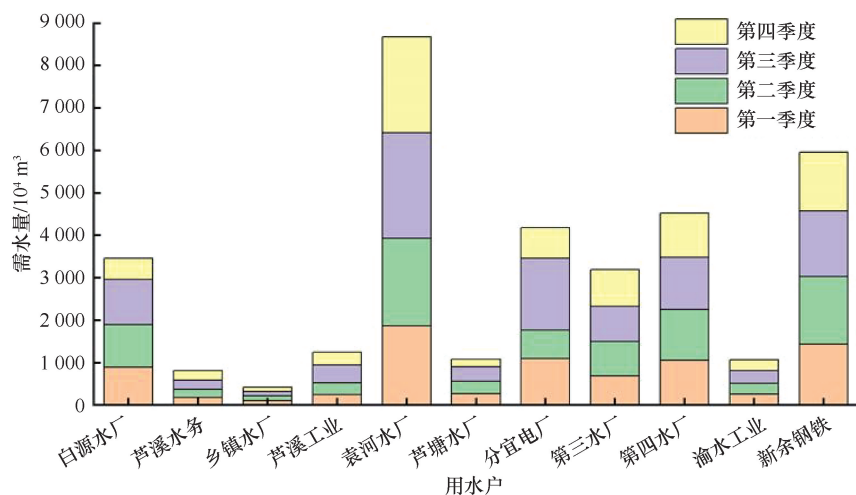


图 4 主要生活、工业用水户年需水量

Fig. 4 Annual water demand of main water consumers for domestic and industrial uses

占总需水量的 73.8%。袁北灌区分为飞剑潭、沙江和酌江灌片, 其中, 飞剑潭水库灌片灌溉面积 135.3 km², 占比总灌溉面积的 67%, 飞剑潭水库最大灌溉日供水流量为 8 m³/s, 飞剑潭灌片内河道生态需水量为 3 753 万 m³/a, 并入灌区农业灌溉需水计算。袁惠渠灌区渠首的最大取水流量为 40 m³/s, 灌区生态需水 1.26 亿 m³/a, 并入灌区农业灌溉需水计算。典型年袁河流域不同用水户需水量如表 3 所列。

表 3 典型年主要供水对象需水量

Table 3 Water demand of main water supply targets in typical years

供水类型	供水对象	需水量/万 m ³		
		2001 年	2007 年	2022 年
生活	白源水厂	3 455	3 455	3 455
	芦溪水务	1 095	1 095	1 095
	袁河水厂	8 800	8 800	8 800
	银龙水务	1 330	1 330	1 330
	第三水厂	3 218	3 218	3 218
	第四水厂	4 576	4 576	4 576
工业	芦溪工业	1 261	1 261	1 261
	分宜电厂	4 228	4 228	4 228
	新余特殊钢	6 039	6 039	6 039
农业	山口岩灌区	5 253	4 118	5 631
	田心灌区	1 526	1 397	1 609
	飞剑潭灌片	21 662	17 085	23 995
	袁南灌区	4 781	4 136	4 536
	袁惠渠灌区	34 078	31 104	40 443
	濠河灌区	3 542	3 335	5 043
	龙门口灌区	1 111	1 065	1 221

按照现状水库供水调度规则, 运用构建的袁河流域 MIKE Basin 模型, 耦合集水区 NAM 模型模拟来水过程, 模拟不同典型年水库群供水调度过程, 并统计各供水节点的供水过程。以 2022 年为例, 袁惠渠灌区在 10 月 2 日—10 月 10 日和 10 月 13 日—10 月 21 日出现供需不平衡情况, 共缺水 1 034.1 万 m³, 供需平衡过程如图 5 所示。

3.2 缺水分析

3.2.1 不同典型年缺水情况

通过对主要供水对象的供需平衡分析, 3 个典型年有 6 个供水对象存在缺水现象, 除袁河水厂为生活供水对象外, 其余 5 个均为农田灌溉, 缺水情况如表 4 所列。由于典型年来水过程存在一定差异, 供水对象的缺水程度在不同典型年之间存在明显变化。2001 年, 袁河水厂缺水量 254.2 万 m³, 缺水率 2.9%; 飞剑潭灌片的缺水量最大, 为 1 310.2 万 m³, 山口岩灌区的缺水率最大, 为 19.9%; 袁南灌区缺

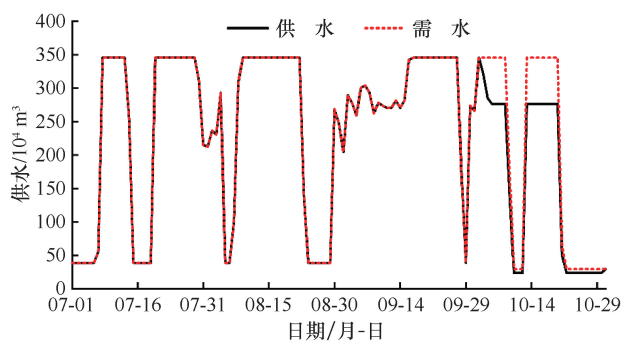


图 5 2022 年袁惠渠供需水过程

Fig. 5 Water supply and demand process of Yuanhuiqu in 2022

水量和缺水率均最小, 分别为 299.8 万 m³ 和 2.9%。2007 年, 袁河水厂缺水量 120.7 万 m³, 缺水率 1.4%; 袁惠渠灌区缺水量最大, 为 1 775.0 万 m³, 濠河灌区缺水率最大, 为 28.9%; 袁南灌区缺水量最小, 为 342.2 万 m³, 袁惠渠灌区的缺水率最小, 为 5.7%。2022 年, 袁河水厂缺水量 16.1 万 m³, 缺水率 0.2%; 袁惠渠灌区缺水量最大, 为 1 034.1 万 m³, 濠河灌区缺水率最大, 为 15.8%; 袁南灌区缺水量和缺水率均最小, 分别为 49.9 万 m³ 和 1.1%。

3.2.2 调控措施及效果分析

根据袁河流域水库供水调度现状, 可从调整限制水位、调整水库供水任务和新增蓄水工程等 3 个方面制定水库调控措施。在调整限制水位方面, 山口岩水库和江口水库的农业限制供水水位较高, 使得农业用水户缺水较大, 然而水库兴利库容仍有较大可利用量, 可适当降低水库限制水位, 加大农业灌溉供水能力; 飞剑潭水库库区淤泥堆积, 设计正常蓄水位 180 m, 现状正常蓄水位 178 m 除险加固后可恢复兴利库容 1 490 万 m³。在调整水库供水任务方面, 在缺水时段山口岩水库增加为下游袁河水厂和袁南灌区供水的任务。在新增蓄水工程方面, 四方井水库已于 2023 年建成, 可向袁河水厂和袁南灌区供水; 袁河支流濠河的水资源开发利用仅 14%, 可兴建蓄水工程为濠河灌区增加供水量。本文提出了 3 种调控措施。

(1) 将山口岩水库农业限制供水水位从 234 m 降至 230.0 m, 飞剑潭水库农业限制供水水位从 168.0 m 降至 166.0 m, 江口水库农业限制供水水位从 67.5 m 降至 67.0 m。

(2) 新增山口岩水库供水任务, 通过袁河干流向袁南灌区和袁河水厂供水。

(3) 四方井水库(2023 年 4 月基本完工)对袁河

表 4 典型年流域缺水情况

Table 4 Basin water shortage in different typical years

供水对象	2001 年		2007 年		2022 年	
	缺水量/万 m ³	缺水率/%	缺水量/万 m ³	缺水率/%	缺水量/万 m ³	缺水率/%
山口岩灌区	1 046.1	19.9	766.5	18.6	921.6	8.8
袁河水厂	254.2	2.9	120.7	1.4	16.1	0.2
飞剑潭灌片	1 310.2	4.2	1230.3	7.2	809.6	3.6
袁南灌区	299.8	2.9	342.2	8.3	49.9	1.1
袁惠渠灌区	790.2	2.3	1 775.0	5.7	1 034.1	2.6
濠河灌区	453.4	11.7	963.8	28.9	796.7	15.8

水厂和袁南灌区供水, 在濠河上游兴建中型水库, 拟建兴利库容 1 000 万 m³。

在三个典型年供水调度的基础上, 依次采取调控措施 1、调控措施 2 和调控措施 3, 分析不同情景下流域供水调度过程及各用水户缺水情况变化, 结果如图 6 所示。

2001 年, 采取措施 1 后, 山口岩灌区缺水量减少了 322.9 万 m³, 缺水率由 19.9% 减少至 13.8%; 飞剑潭灌片缺水量减少了 282.5 万 m³, 缺水率由 14.9% 减少至 11.7%; 袁惠渠灌区缺水量减少了 790.2 万 m³, 缺水率由 2.3% 减少至 0, 不存在缺水现象。进一步采取措施 2 后, 袁南灌区缺水量减少了 45.2 万 m³, 缺水率由 1.0% 减少至 0.8%; 袁河水厂缺水量减少了 254.2 万 m³, 缺水率由 2.5% 减少至 0, 不存在缺水现象。进一步采取措施 3 后, 飞剑潭灌区缺水量减少了 544.9 万 m³, 缺水率由 11.7% 减少至 5.5%, 袁南灌区缺水量减少 254.6 万 m³, 缺水率由 0.8% 减少至 0, 濠河灌区缺水量减少 453.4 万 m³, 缺水率由 11.7% 减少至 0, 不存在缺水现象。

2007 年, 采取措施 1 后, 山口岩灌区缺水量减少了 467 万 m³, 缺水率由 18.6% 降至 7.3%; 飞剑潭灌片缺水量减少了 424.2 万 m³, 缺水率由 14.3% 降至 9.3%; 袁惠渠灌区缺水量减少了 1 558 万 m³, 缺水率由 5.7% 降至 0.7%。进一步采取措施 2 后, 袁河水厂缺水量减少 120.7 万 m³, 缺水率由 2.9% 降至 0, 不存在缺水现象。进一步采取措施 3 后, 飞剑潭灌片缺水量减少了 806.1 万 m³, 缺水率由 9.3% 降至 0; 袁南灌区缺水量减少 342.2 万 m³, 缺水率由 2.0% 降至 0; 濠河灌区缺水量减少 963.8 万 m³, 缺水率由 28.9% 降至 0, 不存在缺水现象。

2022 年, 采取措施 1 后, 山口岩灌区缺水量减少了 420.1 万 m³, 缺水率由 8.8% 降至 4.8%; 飞剑潭灌片缺水量减少了 433.8 万 m³, 缺水率由 10.1% 降至 4.7%; 袁惠渠灌区缺水量减少了 1 034.1 万 m³, 缺水率由 2.6% 降至 0, 不存在缺水现象。进一步采

取措施 2 后, 袁河水厂缺水量减少 16.1 万 m³, 缺水率由 0.4% 降至 0, 不存在缺水现象。进一步采取措施 3 后, 飞剑潭灌片缺水量减少了 375.8 万 m³, 缺水率由 4.7% 降至 0; 袁南灌区缺水量减少 49.9 万 m³, 缺水率由 0.2% 降至 0; 濠河灌区缺水量减少 796.7 万 m³, 缺水率由 15.8% 降至 0, 不存在缺水现象。

3.3 不同来水频率下调控效果

在不同频率但来水过程相同的情况下, 水库的可供水量有所变化。针对 2001 年、2007 年和 2022 年三个典型年, 选择 90%、95% 和 99% 三种来水频率, 分析山口岩、飞剑潭和江口三座大型水库的可供水量。对于山口岩水库, 在 2001 年、2007 年和 2022 年不同来水频率下的可供水量变化较小, 变化幅度在 5% 以内, 平均可供水量为 1.5 亿 m³; 对于飞剑潭水库, 2001 年和 2022 年不同来水频率下可供水量相差较小, 平均可供水量为 0.5 亿 m³, 但相同频率下 2007 年较 2001 年和 2022 年的可供水量明显增加, 增幅 15% 以上, 平均可供水量为 0.68 亿 m³; 对于江口水库, 2001 年和 2007 年不同来水频率下可供水量相差较小, 平均可供水量为 0.47 亿 m³, 但相同频率下 2022 年较 2001 年和 2007 年的可供水量明显增加, 增幅 10% 以上, 平均可供水量为 0.54 亿 m³。

选取供水优先级低的山口岩灌区、飞剑潭灌区和袁惠渠灌区等农业供水对象, 分析 3 种调控措施下典型年不同来水频率的缺水程度变化, 结果如表 5 所列。在采取 3 种调控措施后, 山口岩灌区、飞剑潭灌区的缺水率较袁惠渠灌区有较明显的降低, 其中对于 2007 年来水过程较 2001 年和 2022 年在缺水程度改善方面更为明显。对于山口岩灌区, 针对 2001 年和 2022 年来水过程 3 种频率, 调控措施可有效降低其缺水程度, 缺水率平均下降 3.93% 和 6.23%, 而针对 2007 年来水过程, 调控措施可明显降低灌区缺水程度, 90%、95% 和 99% 来水频率下缺水率分别下降 10.30%、12.50% 和 13.40%。对于飞剑潭灌区, 针对 2001 年和 2022 年来水过程的 3 种频率, 缺水率

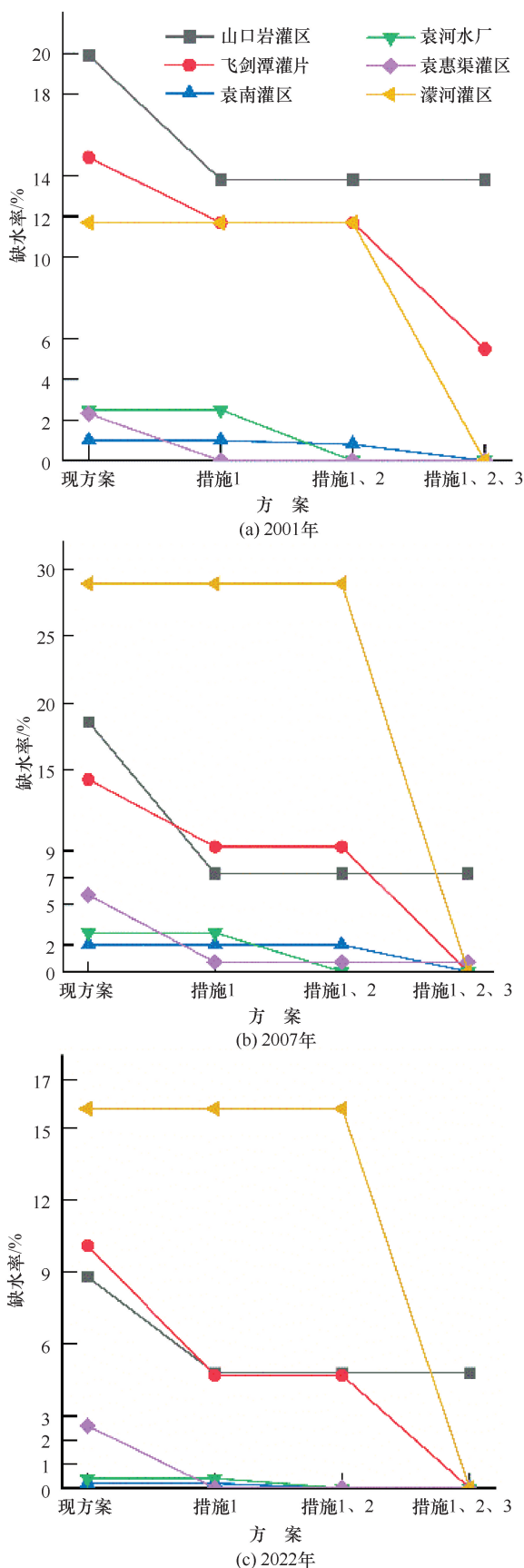


图6 典型年水库调控措施结果

Fig. 6 Results of reservoir regulation measures in typical years

平均下降 3.10% 和 2.50%；针对 2007 年来水过程，调控措施可较大地降低灌区缺水程度，90%、95% 和 99% 来水频率下缺水率分别下降 2.60%、7.20% 和 4.50%。对于袁惠渠灌区，针对 2001 年来水过程的 3 种频率，缺水率平均下降 1.77%；针对 2022 年来水过程的 3 种频率，调控措施降低缺水程度有限，缺水率平均下降 0.67%；针对 2007 年来水过程，90%、95% 和 99% 来水频率下缺水率分别下降 3.00%、5.70% 和 4.50%。

4 结果讨论

流域大中型水库存在串联或并联关系，供水关系和调度规则错综复杂，开展供水调度研究可以有效提升区域供水保障程度。对于雄安新区，侯效灵等^[29]概化水资源系统并运用 WEAP 构建了多水源联合配置模型，合理利用调蓄库实现丰枯调剂，缓解 2035 年可能存在的缺水问题。基于用水安全度改进 WEAP 模型，张赵毅等^[30]开展了粤港澳大湾区城市群水资源配置，结果表明考虑地区和行业用水优先顺序，部分地区用水满足程度可提升 10%~15%。魏光辉等^[31]运用 WEAP 模型模拟对比不同干旱等级的需水方案，通过改变水资源配置原则可减少约 5%~20% 的缺水率。本文采用情景预案方式设计了 3 种供水措施，流域的缺水率平均下降约 7%，与其他方法的分析结果类似。

MIKE Basin 可以较好地反映水利工程特点的水资源联合调度，在流域/区域尺度上为水资源优化配置、水库调度等提供数值模拟，为流域土地利用、工程设计和水能资源开发等提供技术支持。将水文模型 NAM 和水资源分配模型 MIKE Basin 相结合，考虑水库和灌区需水量变化特征的流域水资源模拟模型精度较高，其模拟误差可小于 5%^[24]，本文所构建的模型模拟精度为 5%，可以较好地反映流域水资源状态变化。以水电站和生态流量供水缺口之和最小为目标，王海潮等^[18]基于 MIKE Basin 建立了官厅山峡区间水库供水调度模型，实现了满足生态基流并维护泥沙平衡和水质要求的调度方式。杜清等^[20]将 MIKE Basin 模型与 Excel 规划求解方法相结合，实现了多功能复杂水库群联合调度模拟，计算了不同工况下水库运行对下游发电和弃水的影响。杨霄等^[32]考虑河湖水系连通工程建立了高原湖泊 MIKE Basin 水资源优化模拟模型，建立了公平性最优和供水缺水率最小的目标函数，最终不同供水方案减少缺水率近 10%。李波等^[33]建立了基于生态优先的渝西地区水资源配置

表 5 典型年调度措施结果

%

Table 5 Results of scheduling measures in typical years

%

来水频率		山口岩灌区			飞剑潭灌片			袁惠渠灌区		
		2001 年	2007 年	2022 年	2001 年	2007 年	2022 年	2001 年	2007 年	2022 年
P=90%	缺水率 1	22.6	10.3	22.0	11.9	2.6	19.4	5.1	3.0	6.4
	缺水率 2	17.3	0.0	15.1	8.4	0.0	15.9	2.9	0.0	5.0
	缺水率降幅	5.3	10.3	6.9	3.5	2.6	3.5	2.2	3.0	1.4
P=95%	缺水率 1	23.7	18.6	24.2	18.6	7.2	22.0	5.6	5.7	8.5
	缺水率 2	19.4	6.1	17.5	15.1	0.0	19.1	3.9	0.0	8.0
	缺水率降幅	4.3	12.5	6.7	3.5	7.2	2.9	1.7	5.7	0.5
P=99%	缺水率 1	30.3	20.9	34.2	26.4	8.8	26.2	7.8	6.0	19.3
	缺水率 2	28.1	7.5	29.1	24.1	4.3	25.1	6.4	1.5	19.2
	缺水率降幅	2.2	13.4	5.1	2.3	4.5	1.1	1.4	4.5	0.1

注: 缺水率 1 指现状调度规则下水户缺水率; 缺水率 2 指采取 3 种调控措施后用水户缺水率。

模型, 提出了在满足生态环境需水的前提下, 以提水为主要方式的水资源配置方案。对比相关研究成果, 本文运用 MIKE Basin 模型分析不同工况下水库调度的影响, 侧重基于工程调度规则优化的调度结果, 具有更强的可操作性。此外, 灌溉用水管理对于缺水期的用水安全十分重要, 运用 MIKE Basin 构建的用水管理系统可以得到流域水资源最佳管理方案, 有效保障农民收益和下游生态系统用水安全^[22-23]。同样地, 本文以生态断面及灌区为供水对象, 突出农田灌溉用水需求, 在不同来水频率下缺水程度可下降 7%, 流域供水效果改善明显。

相较于以往从流域水资源调配或现有水利工程调度等角度开展研究, 本文突出不同典型来水过程, 在不同调控措施下分析供水调度对用水户缺水方面的差异。但当前研究仍然存在不足之处, 需从以下三个方面继续强化: (1) MIKE Basin 系统的一个重要前提是“静止假设”, 即所计算的水资源系统中水量和水质是缓慢变化的。在空间尺度较大的流域及时间步长较长的分析中可以得到较好的结果, 但仍然存在供用排水时差导致的累积误差问题。结合 MIKE Basin 设置的二次开发接口, 在后续供水调度研究中可开发模块实现供水动态模拟, 但技术难度仍然较大^[34]。(2) 由于流域极端枯水事件的形成过程较为复杂, 以历史典型年数据为样本开展研究, 存在对水库群供水调度效果评估不够充分的问题。加强流域极端枯水事件的分析与特征提取, 根据供水的实际效果提出流域水库群调控的适应性措施, 需要在以后水库供水调度研究中进一步深化。(3) 实际上, 优化枯水期流域水库调控可以在一定程度上缓解区域旱情, 而改变工程调控规则以及兴建工程可以更好地提升流域供水调度效果, 但仍然存在考虑区域规划及用水经济性方面不充分等问题。结合流域产业发展规划及工程经济性, 在后续

研究中应充分考虑调控措施综合效益的约束。

5 结论

(1) 通过流域供需平衡分析, 2001、2007 和 2022 年袁河流域 6 个供水对象存在缺水情况, 以灌区缺水为主。在采取了调整水库限制供水位、调整水库供水任务和新增蓄水工程三种调控措施后, 2001 年山口岩灌区缺水率减少了 6.1%, 2007 年和 2022 年濠河灌区缺水率分别减少了 28.9% 和 15.8%, 用水户缺水情况都得到了有效缓解。

(2) 对于相同典型年, 山口岩、飞剑潭和江口等大型水库可供水量受来水影响存在一定程度变化。在 90%、95% 和 99% 三种频率情况下, 山口岩灌区、飞剑潭灌区在采取三种调控措施后的缺水率较袁惠渠灌区有明显降低, 受流域来水过程的影响, 2007 年较 2001 年和 2022 年在缺水程度改善方面更为明显。

参考文献 (References):

- [1] 雷声, 石莎, 屈艳萍, 等. 2022 年鄱阳湖流域特大干旱特征及未来应对启示[J]. 水利学报, 2023, 54(3): 333-346.
LEI S, SHI S, QU Y P, et al. Characteristics of extreme drought in the Poyang Lake Basin in 2022 and implications for future response [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(3): 333-346.
- [2] 郭旭宁, 胡铁松, 方洪斌, 等. 水库群联合供水调度规则形式研究进展[J]. 水力发电学报, 2015, 34(1): 23-28.
GUO X N, HU T S, FANG H B, et al. Advances in research using joint operating rule for multi-reservoirs water supply [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(1): 23-28.
- [3] 张玮, 刘攀, 刘志武, 等. 变化环境下水库适应性调度研究进展与展望[J]. 水利学报, 2022, 53(9): 1017-1027.
ZHANG W, LIU P, LIU Z W, et al. State-of-the-art review of reservoir adaptation operation in changing environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(9): 1017-1027.
- [4] 赵鸣雁, 程春田, 李刚. 水库群系统优化调度新进展[J]. 水文, 2005, 25(6): 18-23.
ZHAO M Y, CHENG C T, LI G. The present state-of-the art in the

- optimum scheduling of multi-reservoir systems[J]. *Hydrology*, 2005, 25(6): 18-23.
- [5] OUYANG S, QIN H, SHAO J, et al. Multi-objective optimal water supply scheduling model for an inter-basin water transfer system: The South-to-North Water Diversion Middle Route Project, China [J]. *Water Supply*, 2020, 20(2): 550-564.
- [6] 彭安帮, 马涛, 刘九夫, 等. 考虑生态补水目标的丹江口水库供水调度研究[J]. *水文*, 2021, 41(3): 82-87.
- PENG A B, MA T, LIU J F, et al. Study on water supply scheduling of Danjiangkou Reservoir considering ecological replenishment objective[J]. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(3): 82-87.
- [7] 彭方旭, 汪妮, 魏霞. 基于改进粒子群算法的多水库复杂联合供水优化调度研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(3): 143-148.
- PENG F X, WANG N, WEI X. Optimal operation of multi-reservoir complex joint water supply based on improved particle swarm optimization[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(3): 143-148.
- [8] 程毅. 基于差分进化-自适应 Metropolis 算法的嘉陵江水库群联合供水调度[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2024, 57(9): 1232-1240.
- CHENG Y. Joint water supply dispatching of Jialing River reservoir group based on differential evolution-adaptive Metropolis algorithm [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024, 57(9): 1232-1240.
- [9] 李昱, 彭勇, 初京刚, 等. 复杂水库群共同供水任务分配问题研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(1): 83-90.
- LI Y, PENG Y, CHU J G, et al. Common tasks allocation problem of water supply for a complex multi-reservoir system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(1): 83-90.
- [10] 林鹏飞, 游进军, 蒋云钟, 等. 面向双保证率的水库供水能力优化计算方法研究[J]. *水利学报*, 2022, 53(5): 539-548.
- LIN P F, YOU J J, JIANG Y Z, et al. Research on optimization calculation method of reservoir water supply capacity for double reliability[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(5): 539-548.
- [11] 郭旭宁, 胡铁松, 黄兵, 等. 基于模拟-优化模式的供水水库群联合调度规则研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(6): 705-712.
- GUO X N, HU T S, HUANG B, et al. Joint operation rules for multi-reservoir water supply system based on the model of simulation and optimization[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(6): 705-712.
- [12] 黄草, 王忠静, 鲁军, 等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 II: 水库群调度规则及蓄放次序[J]. *水利学报*, 2014, 45(10): 1175-1183.
- HUANG C, WANG Z J, LU J, et al. A multi-reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River Basin II. Operation rules and water releasing/storing sequences [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(10): 1175-1183.
- [13] 康艳, 高轩, 李伶杰, 等. 供水水库群蓄供水次序与调度图双层优化研究[J]. *水利学报*, 2022, 53(10): 1240-1250.
- KANG Y, GAO X, LI L J, et al. A bilayer optimization method of water storing-supplying sequence and operation diagram for water supply reservoir group[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(10): 1240-1250.
- [14] 王宗志, 谈丽婷, 耿敏, 等. 考虑调水和供水规则的水库优化调度[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 15-21.
- WANG Z Z, TAN L T, GENG M, et al. Reservoir optimal operation considering water transfer and supply rules [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 15-21.
- [15] 张可, 孙艳, 王晓鹏, 等. 区间水优先的水库群引供水调度规则研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(1): 124-133.
- ZHANG K, SUN Y, WANG X P, et al. Study on water supply dispatching rules of reservoir group diversion with interval water priority[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(1): 124-133.
- [16] JHA M K, DAS GUPTA A. Application of mike basin for water management strategies in a watershed[J]. *Water International*, 2003, 28(1): 27-35.
- [17] 王鹏翔, 殷兆凯, 张子平, 等. 基于水位低通滤波的入库流量反推方法研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(5): 134-143.
- WANG P X, YIN Z K, ZHANG Z P, et al. Study on reverse deduction method of reservoir inflow based on water level low-pass filtering[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(5): 134-143.
- [18] 姚睿, 诸葛亦斯, 余晓, 等. 库河系统水温特性对气候变化响应研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(5): 59-70.
- YAO R, ZHUGE Y S, YU X, et al. Study on response of water temperature characteristics in reservoir-river systems to climate change [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(5): 59-70.
- [19] 王蕾, 肖长来, 梁秀娟, 等. MIKE BASIN 模型在吉林市水资源配置方面的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2014(1): 128-131.
- WANG L, XIAO C L, LIANG X J, et al. MIKE BASIN model in water resources allocation in Jilin City [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(1): 128-131.
- [20] 杜倩, 苗伟波. 基于 Mike Basin 的复杂水库群联合调度模型研究 [J]. *人民长江*, 2016, 47(4): 88-92.
- DU Q, MIAO W B. Study of joint operation model of complicated reservoir group based on Mike Basin [J]. *Yangtze River*, 2016, 47(4): 88-92.
- [21] 唐露芳, 黄义忠. 基于气象-农业综合干旱指数的云南省干旱时空演变特征[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(12): 54-66.
- TANG L F, HUANG Y Z. Spatiotemporal evolution characteristics of drought in Yunnan Province based on meteorological-agricultural comprehensive drought index [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(12): 54-66.
- [22] JAISWAL R K, GHOSH N C, GURU P, et al. MIKE BASIN based decision support tool for water sharing and irrigation management in rangawan command of India [J]. *Advances in Agriculture*, 2014, 2014(1): 924948.
- [23] DOULGERIS C, GEORGIU P, PAPADIMOS D, et al. Water

- allocation under deficit irrigation using MIKE BASIN model for the mitigation of climate change[J]. *Irrigation Science*, 2015, 33(6): 469-482.
- [24] 张颖, 宋晓猛, 王小军, 等. 鄂尔多斯市用水结构演变及驱动因素分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(11): 98-114.
ZHANG Y, SONG X M, WANG X J, et al. Analysis of evolution and driving factors of water consumption structure in Ordos City [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(11): 98-114.
- [25] 孙栋元, 卢书超, 李元红, 等. 基于 MIKE BASIN 的石羊河流域水资源管理模拟模型[J]. *水文*, 2015, 35(6): 50-56.
SUN D Y, LU S C, LI Y H, et al. Simulation model of water resources management based on MIKE BASIN for Shiyanghe River Basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(6): 50-56.
- [26] 赵方玲, 仇宝云, 张宇, 等. 感潮水利枢纽闸-站联合引水调度优化[J]. *排灌机械工程学报*, 2025, 43(11): 1148-1154.
ZHAO F L, QIU B Y, ZHANG Y, et al. Optimization of joint water diversion scheduling for gate-pump station in tidal water conservancy hub[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2025, 43(11): 1148-1154.
- [27] AGRAWAL A, KOTHARI M, JAISWAL R K, et al. Integrated basin-scale modelling for sustainable water management using MIKE HYDRO basin model: A case study of Parvati Basin, India [J]. *Water*, 2024, 16(19): 2739.
- [28] MULAT A G. Water resource modelling for the Lake Tana sub-basin using the Mike Basin model for current and future water resource development scenarios[J]. *Journal of Water and Land Development*, 2021: 215-224.
- [29] 张赵毅, 何艳虎, 谭倩, 等. 粤港澳大湾区城市群水资源配置模型[J]. *水力发电学报*, 2022, 41(9): 31-43.
ZHANG Z Y, HE Y H, TAN Q, et al. Water resources allocation model of urban agglomeration in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2022, 41(9): 31-43.
- [30] 魏光辉, 姜振盈. 基于 WEAP 模型的塔里木河干流水资源调配方案研究[J]. *人民珠江*, 2019, 40(6): 77-81.
WEI G H, JIANG Z Y. Study on water resources allocation scheme in Tarim River trunk stream based on WEAP model [J]. *Pearl River*, 2019, 40(6): 77-81.
- [31] 杨霄, 陈刚, 桑学锋, 等. 基于河湖水系连通的高原湖泊水资源优化模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2016(9): 205-211.
YANG X, CHEN G, SANG X F, et al. Water resources allocation at plateau lakes based on interconnected river system network [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(9): 205-211.
- [32] 李波, 曹正浩, 毛文耀, 等. 基于生态优先的渝西地区水资源配置研究[J]. *人民长江*, 2017, 48(11): 7-10.
LI B, CAO Z H, MAO W Y, et al. Water resources allocation of Western Chongqing based on ecology priority [J]. *Yangtze River*, 2017, 48(11): 7-10.
- [33] 莫铠, 李军, 贾鹏. MIKE BASIN 水资源模型对复杂水库调度程序的开发及应用[J]. *水科学与工程学报*, 2008(5): 24-27.
MO K, LI J, JIA P. Development and application of complicated reservoir operation program based on MIKE BASIN water resources model [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2008(5): 24-27.

(责任编辑 王璐)