

基于旱限库容的水库优化调度策略研究

——以广东省东江流域为例

陈颖毅^{1,2,3,4}, 张之琳^{1,2,3,4}, 黄广灵^{1,2,3,4}, 苏阳悦⁵

¹广东省水利水电科学研究院, 广东 广州

²广东省水动力应用研究重点实验室, 广东 广州

³河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州

⁴广东省流域水环境治理与生态修复重点实验室, 广东 广州

⁵广东省水文局惠州水文分局, 广东 惠州

收稿日期: 2025年7月3日; 录用日期: 2025年8月5日; 发布日期: 2025年10月30日

摘要

针对干旱“发展缓慢”和“可预见性差”的特点, 本文提出了一套基于旱限库容的水库优化调度策略, 并以2020~2021年广东省东江流域抗旱过程为例, 结合抗旱实际, 提出了降低控制断面目标流量、减少出库流量等一套调度规则。仿真结果表明, 按此优化策略的水库调度过程能够有效延长可利用水量时间, 使控制断面流量更加平稳, 同时显著改善水库运行工况的安全性。研究成果为抗旱调度规则的制定和求解提供了新思路, 对提升干旱时期的水资源合理利用水平和水库科学调度能力具有重要意义。

关键词

旱限库容, 抗旱调度, 连续干旱, 抗旱管理

Reservoir Optimal Operation Model Based on Drought-Limited Storage Capacity

—A Case Study of the Dongjiang River Basin in Guangdong Province

Yingyi Chen^{1,2,3,4}, Zhiling Zhang^{1,2,3,4}, Guangling Huang^{1,2,3,4}, Yangyue Su⁵

¹Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou Guangdong

²Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Research, Guangzhou Guangdong

³State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou Guangdong

⁴Guangdong Provincial Key Laboratory of Water Quality Improvement and Ecological Restoration for Watersheds, Guangzhou Guangdong

⁵Hydrological Branch of Guangdong Provincial Hydrological Bureau, Huizhou Guangdong

作者简介: 陈颖毅, 男, 硕士, 研究方向为水资源调度, 水旱灾害防御研究。Email: YYC_2020@163.com

Abstract

In response to the characteristics of drought such as “slow development” and “low predictability”, this paper proposes a set of reservoir optimal operation strategies based on drought-limited storage capacity. Taking the drought resistance process in the Dongjiang River Basin of Guangdong Province from 2020 to 2021 as an example, combined with the actual drought resistance situation, a set of operation rules are put forward, including reducing the target flow of the control section and decreasing the outflow. The simulation results show that the reservoir operation process under this optimized strategy can effectively extend the water available period, make the flow of the control section more stable, and significantly improve the safety of reservoir operation conditions. The research results provide new ideas for the formulation and solution of drought resistance operation rules, and are of great significance for improving the appropriate utilization level of water resources and the scientific operation capacity of reservoirs during drought periods.

Keywords

Reservoir Operation, Water Allocation, Continuous Drought, Drought Management

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

干旱灾害发展过程通常呈现“缓慢”与“预见性较差”的特点，一旦成灾，干旱对社会经济的影响范围、持续时间及产生的损失均大于其他自然灾害[1]-[3]。因此，开展特大旱情下的抗旱调度规则研究具有重要意义。旱限库容是水库在干旱预警期内为保障基本供水而预留的特定水量，作为水库抗旱调度的关键阈值，通过设定不同干旱等级下的库容底线，提醒决策者需采取相关措施预防潜在的旱情风险，实现干旱情势下水资源的时空再分配，既能保障城市供水、农业灌溉等基本用水需求，又能为流域水资源联合调配提供量化依据，是平衡“抗旱保供”与“生态安全”的重要指标。2020~2021年，广东省东江流域遭遇了近60年来最严重的干旱，涉及供水人口高达5000万。在抗旱过程中，通过降低控制断面目标流量和减少出库流量等措施，新丰江水库低于死水位运行的天数较常规调度减少了94 d [4]，然而也暴露出东江流域缺乏应对特大旱情的统一调度规则的问题。

目前，国内关于抗旱调度的研究多集中于单一水库旱限水位的确定。例如，张礼兵[5]通过对梅山水库分期旱限水位的研究，提出了应对大型灌区不同水平枯水年的调度方法；张家鸣[6]将旱限水位与水库兴利调度图有机结合，用于干旱事件的应对；姜桂花[7]通过分析太湖的取水、通航和生态水位，确定了太湖的旱警水位。然而，这些研究大多针对单一水库或湖泊的旱限水位设置，较少考虑流域层面多水库协同调度及连续两年干旱条件下的旱限库容应用。同时多水库协同调度也面临着不同的挑战，一是多目标间冲突的平衡[8]；二是水资源协同调控机制的研究[9]；三是供水侧和需水侧的响应变化预测[10]等多方面难点。

本文基于实用性和可操作性原则，围绕旱限库容这一控制性指标，以东江流域抗旱调度为例，构建了基于旱限库容的水库优化调度策略。通过分析控制断面目标流量、出库流量以及旱限库容启用时机对蓄水量、控制断面流量和水库运行工况的影响，进行效果验证，对东江流域抗旱乃至抗旱调度规则研究具有一定的指导意义。

2. 基于旱限库容的水库优化调度策略

2.1. 基本思想

当遭遇连续干旱年份，流域层面应对干旱的关键在于调整主要控制断面的目标流量、调控控制性水库的蓄泄过程及其调整时机，甚至在旱情前期进行有目的的轻度缺水，为旱情后期预留可调水量，从而实现年际年内水量的转移，避免调度期间出现重度缺水的情况，尽可能减轻重点地区和关键时段的不利影响。由于干旱具有“可预见性差”和“发展缓慢”的特点，以旱限库容作为预警指标，能够为水库调度决策提供科学依据。当水库蓄水量接近或达到旱限库容时，表明干旱形势严峻，需及时调整调度方案，以延缓水资源短缺问题的恶化，延长流域可利用水量的时间。

2.2. 调度期和调度尺度

本次研究根据东江流域旱情的发展情况，调度期设定为2020年4月1日至2022年3月31日，初始调度库容为2020年4月1日的蓄水量，汛期为每年4月至9月，枯水期为每年10月至次年3月，调度尺度为日。

2.3. 旱限库容

根据《广东省主要江河水库旱限水位(流量)(试行)》(粤水防御函[2021]1918号)，东江流域三大水库的旱限水位和库容如表1所示。根据《广东省东江流域水资源分配方案》，明确提出了三大水库要按照防洪、供水为主，兼顾发电的功能进行联合优化调度，统一调配水资源。东江流域水系概化图详见图1。

表 1. 东江流域三大水库旱限水位

序号	水库名称	旱限水位(m)	库容(亿 m³)
1	新丰江	101	61.51
2	枫树坝	149	8.14
3	白盆珠	66	2.62
合计		/	72.28

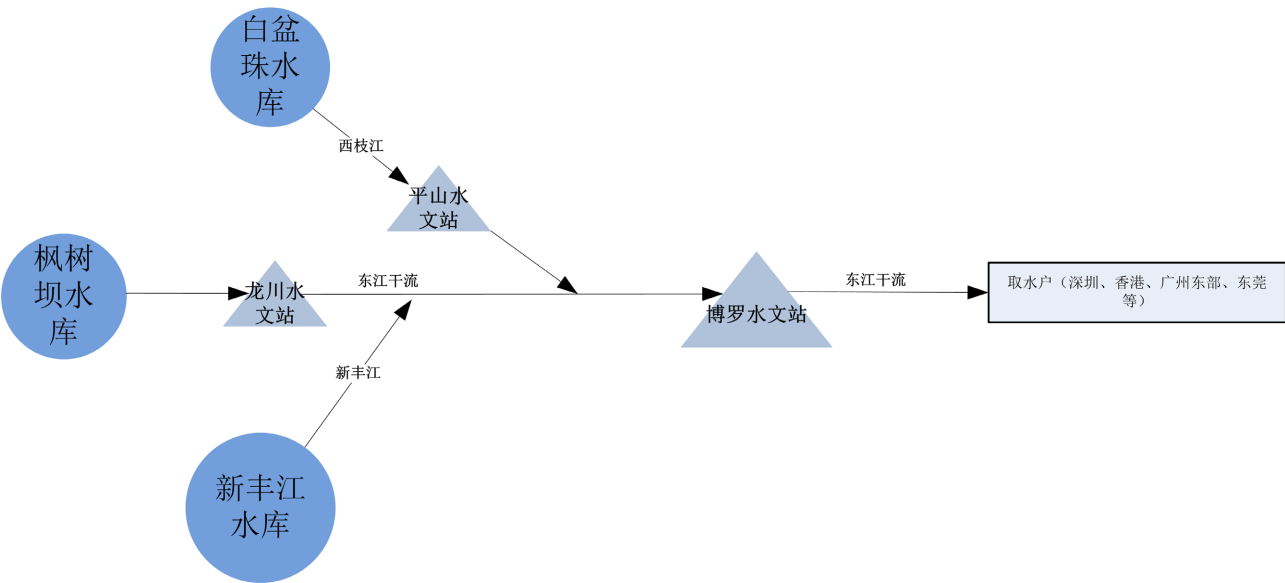


图 1. 东江流域水系概化图

2.4. 控制断面目标和出库流量调整方式

正常情况下, 东江博罗控制断面目标流量应不小于 $320 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据本次东江流域抗旱的实际调度经验, 汛期博罗控制断面不小于 $212 \text{ m}^3/\text{s}$ 、枯水期不小于 $256 \text{ m}^3/\text{s}$, 基本能保障下游用水不受咸潮上溯的影响, 同时需水库分别配合压减出库流量 40% (汛期)、20% (枯水期)。

2.5. 出、入库流量处理方式

以三大水库 2020 年 4 月至 2022 年 3 月的逐日来水资料作为天然入流系列, 博罗断面流量减去三大水库出库流量为三大水库至博罗水文站区间来水, 将入库流量、区间流量带入模型中, 出库流量按照实际调度的比例进行分配。

2.6. 数学模型

当流域控制性工程蓄水充足时, 按照控制断面目标控制下泄, 当流域蓄水量低于旱限库容时, 通过调整控制断面流量目标, 限制出库流量等措施调节水资源配置, 逐日计算得到调度过程。

2.6.1. 约束条件

设置调度模型约束条件, 实现模拟环境和运行边界的仿真。

水库水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (F_{i,t} - W_{i,t}) \quad (1)$$

特征水位约束:

$$Z_{i,\text{死}} \leq Z_i \leq Z_{i,\text{汛限}} \leq Z_{i,\text{正常}} \quad (2)$$

节点水量平衡约束:

$$Q_{i,t} = q_{i,t} + \left(\sum_{i=1}^n W_{i,t} / \Delta t \right) \quad (3)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为第 i 个水库时段初、末蓄水量; $F_{i,t}$ 为第 i 个水库 t 时段入库水量; $W_{i,t}$ 为第 i 个水库 t 时段泄放水量; $Z_{i,\text{死}}$ 、 $Z_{i,\text{汛限}}$ 、 $Z_{i,\text{正常}}$ 分别为第 i 个水库的特征水位; $Q_{i,t}$ 为第 i 个控制断面的 t 时段末流量; $q_{i,t}$ 为 t 时段初区间流量。其他约束包括水量、水位非负约束。

2.6.2. 计算流程

基于水库旱限库容的水库优化调度计算流程见图 2, 调度期为 T , 水库数量为 N , 流域主要控制断面流量目标为 L 。首先输入入库流量、蓄水量, 判断蓄水量 V 是否达到旱限库容, 重新调整断面目标流量 L , 计算水量缺口 $W_{\text{缺},t}$, 根据水量缺口逐次分配各水库的出库水量 $W_{i,t}$, 同时跟流域调度计划拟定的出库水量 $WP_{i,t}$ 进行比较, 然后根据其他约束条件进行调整, 最后得到流域调度过程。

3. 算例分析

本次以东江流域三大水库的抗旱调度过程为例, 利用 2020~2021 年的实际水文数据和用水需求数据, 对基于旱限库容的水库优化调度进行算例仿真。共设计三种调度方案。当库容水量富裕时, 按照博罗站不低于 $320 \text{ m}^3/\text{s}$ 的目标控制; 三大水库库容小于旱限库容时, ① 方案一: 下调博罗断面控制流量至 $256 \text{ m}^3/\text{s}$, 压减 20% 出库流量; ② 方案二: 在方案一的基础上, 进一步下调汛期博罗断面控制流量至不低于 $212 \text{ m}^3/\text{s}$, 压减 40% 出库流量; ③ 方案三: 按照实际库容小于旱限库容(2020 年 12 月 26 日)时, 采用方案二的调度方式。水库参数详见表 2。

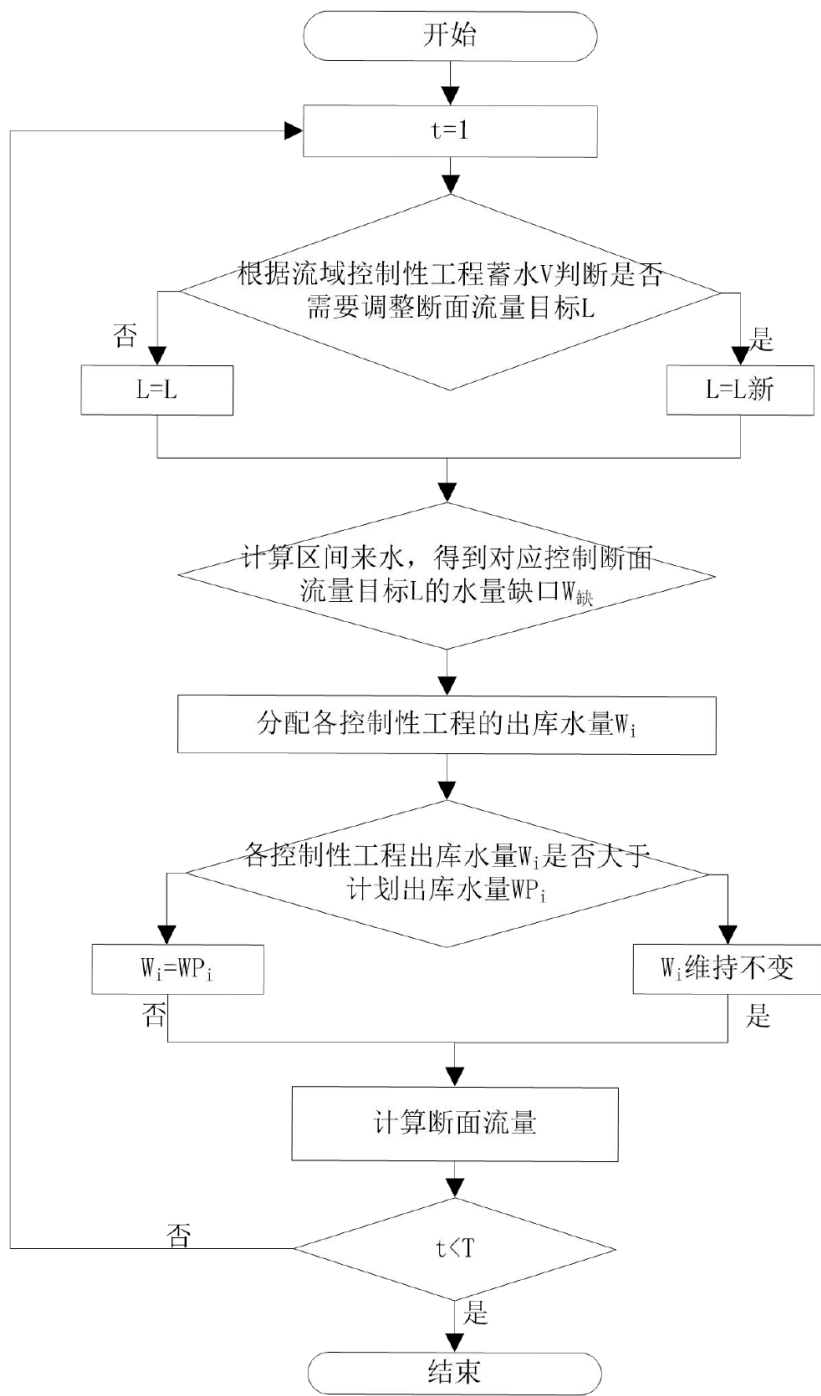


图 2. 基于早限库容的水库优化调度计算流程

表 2. 水库参数信息

	新丰江水库	枫树坝水库	白盆珠水库	备注
死库容(亿 m ³)	43.07	2.85	1.70	/
正常蓄水位对应库容(亿 m ³)	107.97	15.35	5.54	/
起调库容(亿 m ³)	73.40	7.57	1.84	2020 年 4 月 1 日早 8 点库容

仿真模拟结果表明,可利用水量时间明显延长(见表 3),按照优化调度准则进行水库调度,方案三较实际情况多蓄水 4.02 亿 m³,通过合理控制出库流量和优化蓄水时机,水库能够在干旱时期更有效地为下游提供水资源(见图 3),缓解了用水紧张局面;断面流量过程更加平稳(见图 4),方案三博罗站流量在抗旱关键期(2021 年枯水期)基本上优于实际情况(见表 5),且在枯水期过程更加平稳,更加有利于抑制咸潮上溯,保障下游地区的用水稳定性,减少对生态环境的不利影响,同时也降低了水利设施的运行风险;水库运行工况更安全(见表 4),方案三显著降低新丰江、白盆珠水库低于死库容运行的时间,新丰江水库水位始终保持在安全范围内,避免了水库运行水位过低等安全问题。综上所述,将旱限库容作为抗旱预警信号,在抗旱后期的水量调节过程中发挥着不可替代的关键作用。

为了更深入地了解不同调度方案的特点和差异,本研究对各方案的蓄水情况进行了详细对比分析。方案二 2020 年的蓄水表现十分突出(见表 3),较实际情况多蓄水 15.7 亿 m³、较方案三多蓄水 9.48 亿 m³,主要是实际调度过程博罗断面流量远超过 320 m³/s,而方案二基本上严格按照 320 m³/s 进行控泄导致,启用旱限库容进行断面目标流量的时间也明显推迟,说明做好日常的调度是抗旱前期的关键环节,同时也进一步的影响次年(2021 年)的调度过程。各方案较方案二在 2021 年的蓄水增量差分别为 6.84 亿 m³、-1.83 亿 m³、4.74 亿 m³,是因为方案一和方案二 2021 年汛期蓄水量相对较大,遭遇汛期来水,三大水库蓄水量超过旱限库容,导致按照博罗控制断面按照 320 m³/s 进行控泄,但是从控制断面流量的保障效果来看,方案二基本优于其他方案(见表 5)。

表 3. 三大水库调度节点对应库容

时间	实际(亿 m ³)	方案一(亿 m ³)	方案二(亿 m ³)	方案三(亿 m ³)
2020.04.01	82.81	82.81	82.81	82.81
2020.10.01	91.85	105.98	105.98	91.85
2021.04.01	53.30	69.00	69.00	59.52
2020 年末蓄水较方案二	-15.7	0	0	-9.48
2021.10.01	60.25	71.09	72.98	67.31
2022.03.31	56.40	63.43	65.16	60.42
调度期末蓄水较实际	0	7.03	8.76	4.02
2021 年蓄水增量差较方案二	6.84	-1.83	0	4.74

表 4. 三大水库低于死水位时间和最长持续时间

方案	新丰江水库低于死水位最长运行天数 (d)	枫树坝水库低于死水位最长运行天数 (d)	白盆珠水库低于死水位最长运行天数 (d)
实际情况	26	0	115
方案一	0	0	0
方案二	0	0	0
方案三	0	0	18

表 5. 旱限库容启用时间与枯水期平均流量

方案	启用旱限库容调整的时间	2021 年枯水期博罗断面平均流量(m ³ /s)
实际	/	261
方案一	2021 年 3 月 1 日	294
方案二	2021 年 3 月 1 日	295
方案三	2020 年 12 月 25 日	289

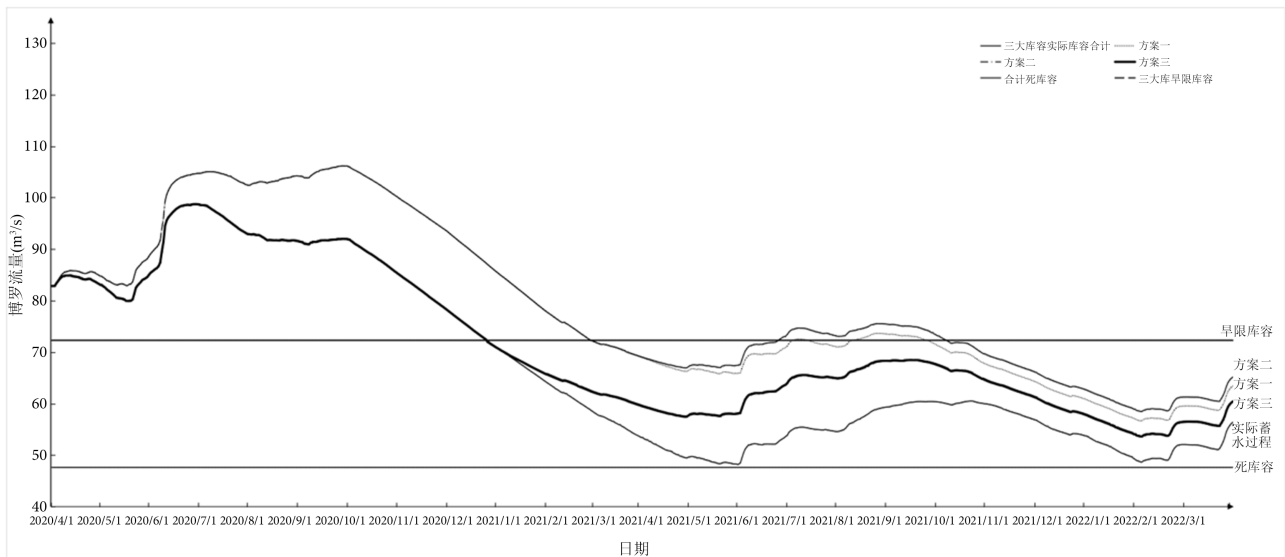
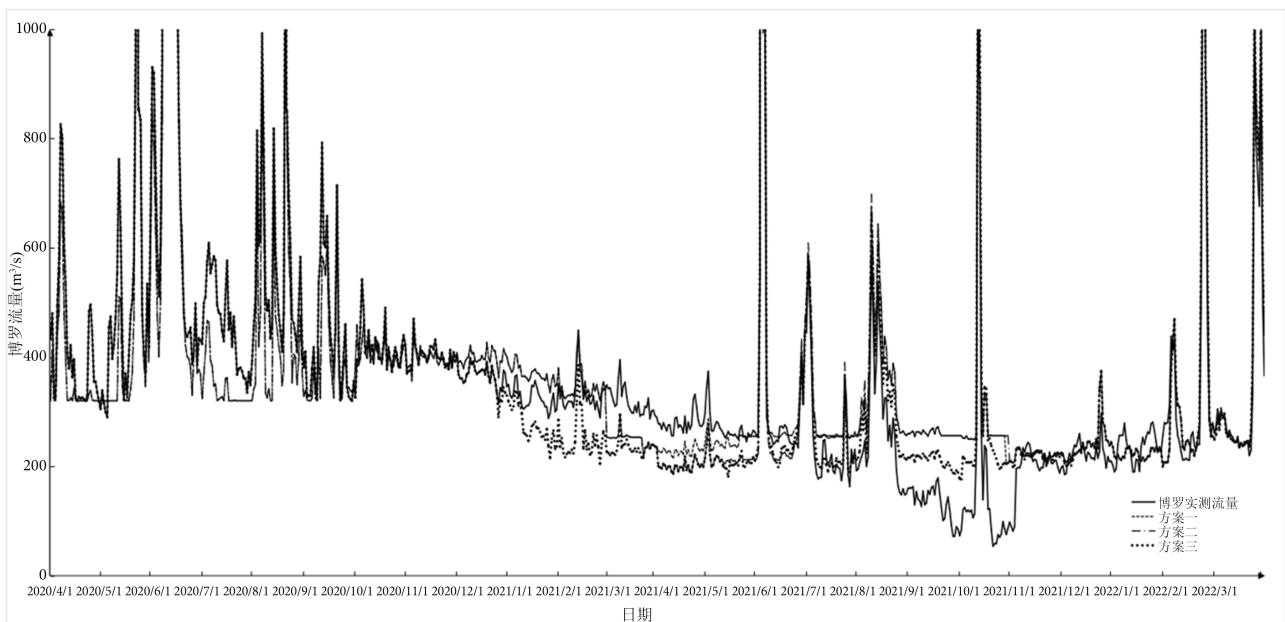


图 3. 东江流域三大水库库容变化过程



注：为清晰展现枯水期流量过程，高于 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量不展示。

图 4. 博罗站流量对比

总体来说，经过基于旱限库容的水库优化调度策略计算后，水资源在时空分布上更加合理，整体抗旱能力明显提高，水资源分配效果更加显著，可保证流域整体抗旱效果。

4. 结论与建议

1) 基于旱限库容的水库优化调度策略能够有效应对干旱“发展缓慢”和“可预见性差”的特点，为水库调度决策提供了科学依据，使得可利用水量时间延长、断面流量更加平稳、水库运行工况更安全，为抗旱调度规则的制定和求解提供了新思路。

2) 流域的日常调度对抗旱过程影响较大,在实际调度过程中应严格按照断面目标控制下泄,以有效延缓旱情的发展。

3) 为降低极端旱情再次出现的不利影响,在实际调度中可考虑适度提高旱限水位。

基金项目

2023 年省科技创新战略专项资金科研项目 gdsky2023-03。

参考文献

[1] 谢育延,涂新军,吴海欧,等. 东江流域干旱等级演变及主要因子影响[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(4): 69-82.

[2] 李芬,于文金,张建新,等. 干旱灾害评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 891-898.

[3] 傅文华,康永辉. 广西社会经济干旱特征及抗旱效益与对策[J]. 人民长江, 2016, 47(S1): 1-8.

[4] 成忠理,陈颖毅,郑亚峰,等. 广东省东江流域 2020-2021 年抗旱管理实践与思考[J/OL]. 中国防汛抗旱, 1-8.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=H1ADs8FciQ8yXlNbf-DBp872lFzYZ0kDQczTlJt8e8maZd7GG8Ofhhr17HSyJu-YTpU5WtgRESEuuaay7vAD6gj7_hjw1SiYRSiRBrr-rITpIPcy2p2DMNGG3HTMAMrh0j0t-OGuWlygfo7Q4W7SjizLZDwV0sqa6oFUo0XaaWcgJHXK0gLrEg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2025-02-24.

[5] 张礼兵,伍露露,金菊良,等. 大型灌区骨干水库分期旱限水位研究[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 757-766.

[6] 张家鸣. 结合旱限水位的多年调节水库兴利调度图改进方法探讨[J]. 广东水利水电, 2019(5): 45-49.

[7] 姜桂花,吴娟,刘敏. 太湖旱警水位确定分析[J/OL]. 中国防汛抗旱, 1-5.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=H1ADs8FciQ9Y3gHmRoyrza5wq2E5AMeGi15l1ZhsSlNaCJ9biBe-IL6mBV6cvQvGh4UI7Qb5h5wXvTW_Udbhp46f_u6BqWkYi1KOplBWMNQNTY9iRoqLYT7KzhSiT-NVDdP_kDIC1M1MRER4C7BKUx4OJ0rCsxMdTf1QgsuHAR7cvXPnDJpZXa==&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2024-07-21.

[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.

[9] 何胜. 水库群条件下旱限水位确定及水资源调控方法研究与应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2024.

[10] 张永永,李福军,彭少明,等. 应对干旱的黄河干流骨干水库群联合调度研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 31-35.