

抗旱应急备用水库旱限水位确定及运用规则研究

刘至一^{1,2}, 严子奇², 严登华^{1,2}, 陈刚³, 何胜⁴, 程雅平²

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 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; 3. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021; 4. 宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州 234000)

摘要:针对抗旱应急备用水库的旱限水位确定问题,基于宽浅式破坏原则,以时段平均缺水率和严重缺水时段数最小为目标建立了旱限水位确定模型,提出了抗旱应急备用水库在极端干旱情况下的旱限水位确定方法和运用规则,应用于昆明市的备用水源德泽水库,并分析了不同方案下的供水保障程度。结果表明:该方法能够实现抗旱应急备用水库分期旱限水位的优化设计,有效降低极端干旱对社会经济用水的不利影响;通过设置德泽水库旱限水位可以使昆明市应急供水的严重缺水月数从 229 减少至 34,月均缺水率由 27.58%降低至 12.74%,减少了极端缺水情况的发生;在极端干旱情况下,旱限水位与死库容联合运用可进一步显著提升供水保障程度,严重缺水月数减少至 21,月均缺水率降低至 2.52%。

关键词:抗旱应急备用水库;旱限水位;宽浅式破坏;NSGA-II;德泽水库

中图分类号:TV697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)03-0187-07

Research on determination and application rules of drought-limited water level of emergency drought-resistant backup reservoirs//LIU Zhiyi^{1,2}, YAN Ziqi², YAN Denghua^{1,2}, CHEN Gang³, HE Sheng⁴, CHENG Yaping² (1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China; 4. School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China)

Abstract: Aiming at the problem of determining the drought-limited water level of emergency drought-resistant backup reservoirs, a model for determining the drought-limited water level was established based on the principle of wide and shallow damage with the goal of minimizing the time period average water shortage rate and the number of time periods with severe water shortage. A method and operational rules for determining the drought-limited water level of emergency drought-resistant backup reservoirs under extreme drought conditions were proposed. The proposed method was applied to the Deze Reservoir, a backup water source for Kunming City, and the degree of water supply guarantee under different schemes. The results indicate that the method can realize the optimal design of phased drought-limited water level in emergency drought-resistant backup reservoirs, and effectively reduce the adverse impact of extreme drought on socio-economic water use. By setting the drought-limited water level of the Deze Reservoir, the number of months with severe water shortage for emergency water supply in Kunming City can be reduced from 229 to 34, and the average monthly water shortage rate can be reduced from 27.58% to 12.74%, thereby mitigating the occurrence of extreme water shortages. Under extreme drought conditions, the combined use of the drought-limited water level and dead storage capacity can further significantly enhance the level of water supply guarantee, reducing the number of months with severe water shortages to 21 and the average monthly water shortage rate to 2.52%.

Key words: emergency drought-resistant backup reservoir; drought-limited water level; wide and shallow damage; NSGA-II; the Deze Reservoir

联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告指出,全球气温升高导致水循环加剧,降水与蒸发的强度和变异性增大,极端干旱发生频率将逐渐增加^[1]。干旱也是我国最主要的自然灾害之一,约

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3000205)
作者简介:刘至一(2000—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:2230902210@cnu.edu.cn
通信作者:严子奇(1983—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:yanzq@iwhr.com

占有所有自然灾害的 1/3^[2-3]。为了应对极端干旱,降低旱灾的各类风险和损失,2011 年国家防汛抗旱总指挥部办公室发布了《旱限水位(流量)确定方法》,提出了旱限水位(流量)的概念,将旱限水位作为判别干旱以及启动应急响应的重要条件。随后,有关水库旱限水位的研究不断展开,在理论和方法上都有所突破,逐渐形成了多种旱限水位计算方法,并逐步将旱限水位划分为旱警水位和旱保水位^[4-7]。2022 年,水利部发布了《水利部办公厅关于做好 2022 年旱警水位(流量)确定及应用工作的通知》(以下简称《通知》),明确水库旱警水位是因水库水位持续偏低,供水区域内正常生活生产、重要生态敏感区等面临缺水风险,应当发布干旱预警并启动水库抗旱调度规程的水位指标,是水库调度管理由常态供水管理进入应急限供管理的重要标志。《通知》中总结了水库旱限水位的计算方法,把逆序递推法作为计算旱限水位的主要方法之一,该方法根据设计来水和设计需水,从水文年末逆序叠加应供水量作为确定旱限水位的依据。罗成鑫等^[6]结合枯水季节性特点和水库供水特点,以供水保证率最大和破坏深度最小为目标结合逆序递推法建立模型,确定了清河水库的旱限水位。Zhang 等^[8]根据设计需水和设计来水确定了旱限水位的初始范围,以最大效益为目标建立模型求解了梅山水库的旱限水位。韦瑞深等^[9]结合水库兴利库容的计算方法,系统阐述了逆序递推法计算水库旱限水位的步骤,并计算了张峰水库的旱限水位。Luo 等^[10]通过假设实验结合脆弱性、弹性等指标系统性分析了旱限水位适用的水库类型。韦瑞深等^[11]基于宽浅式破坏原则^[12]和逆序递推法,以枯水年内逐月缺水率均值及标准差最小为目标建立模型,确定了汾河水库的旱限水位。然而,上述方法多针对常规供水水库,我国还有许多应急备用水库,其中既有规划新建的备用水库,也有经过功能调整后成为应急水源的备用水库,这些水库的供水策略、水量调度方式与常规水库有所不同。在当前水旱灾害防御底线思维的要求下,应急备用水源如何充分发挥自身的应急供水能力?在极端干旱情况下,常规水源无水可用的情况下,应急备用水源应当至少储存多少备用水量?死库容是否可以启用,什么时候启用?如何避免水量过快消耗,延长抗旱备用水源起效时间,从而降低极端干旱危害?这些都是应急备用水源在抗旱调度中需要明确的问题。研究确定抗旱应急备用水源的旱限水位正是系统回答这些问题的重要途径。

在旱限水位的计算中,一般采用典型干旱年设计来水、设计需水和分行业限制供水系数等规划层

面的来、需水作为边界条件,这种方法适用于有较固定供水对象且与供水对象有相近水文气象条件的水库。但是,抗旱应急备用水库与其供水对象可能存在水文气象要素的空间差异性,水库自身的设计来水情况往往与其供水对象的需求并不同步,边界条件的不确定性易导致计算得到的旱限水位及其规则与实际情况不匹配。针对上述问题,本文在区域常规水源配置基础上,通过长系列计算,提出一种抗旱应急备用水库旱限水位优化算法,解决抗旱应急备用水库旱限水位确定问题,完善整个旱限水位确定的技术体系,并应用于昆明市的备用水源德泽水库,以期为我国抗旱应急备用水库的旱限水位确定提供技术参考。

1 研究方法

1.1 技术路线

从水资源配置的角度来看,水库旱限水位是在干旱缺水条件下水库供水系统中的供需关系达到临界平衡时的水位阈值,是规划层面下水资源系统临界阈值指标^[13]。水库旱限水位确定的主要理论基础是面向干旱期有限水资源优化调配的风险对冲规则。按照上述思路,确定抗旱应急备用水库的旱限水位分为以下几步:首先,确定典型历史干旱情景,根据区域常规水源、特大干旱下分行业用水需求建立水资源配置模型,通过模拟计算确定特定干旱情景下常规水源供水量缺口作为应急备用水库应保障的基本用水需求和各行业供水任务的次序;其次,以时段平均缺水率最小和各行业超过严重缺水阈值的缺水时段数总和最小为目标,考虑水量平衡、供水量和水库水位等约束,对水库旱限水位和各行业的限制供水系数进行优化求解;最后,对得到的旱限水位进行合理性分析,分析运用旱限水位之后抗旱应急典型干旱情景下的供水效果。抗旱应急备用水库旱限水位确定的技术路线如图 1 所示。

1.2 应急供水任务确定

抗旱应急备用水库的任务是补充常规水源无法供应的部分来提高供水保证率。水库可采用历史调查法,结合历史上的干旱情景和社会经济发展情况确定供水任务,或者结合历史资料、现有水源条件等,通过水资源综合模拟与调配(water resources comprehensive allocation and simulation, WAS)模型^[14]对特定干旱时期内流域常规水资源调配进行模拟,得到特定情景下供水对象的供水缺口。

1.3 应急备用水库旱限水位优化模型

基于宽浅式破坏原则构建旱限水位优化模型,对水库旱限水位及其配套的分行业限制供水系数进

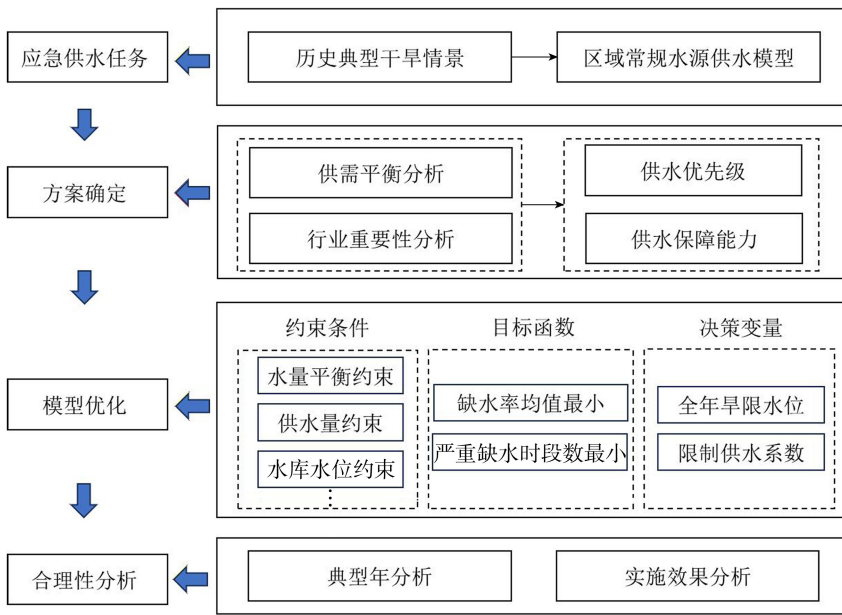


图1 抗旱应急备用水库旱限水位确定的技术路线

Fig.1 Technical route for determining drought-limited water level of emergency backup reservoirs for drought resistance

行直接优化。宽浅式破坏是指水库来水量偏少无法满足正常供水的情况下,在时间上尽量均匀地分配缺水量,减少整个时间段上的严重缺水情况,避免造成深度破坏。本文依据宽浅式破坏原则确定目标函数。

1.3.1 目标函数

本文采用两个目标函数:时段平均缺水率最小(F_1)和严重缺水时段数最小(F_2)。时段平均缺水率用于表征系统整体的缺水情况,时段平均缺水率越高,则整体缺水情况越严重;严重缺水时段是指缺水率超过严重破坏阈值的时段,严重缺水时段数越多,代表发生严重破坏的次数越多、时间越长,破坏越深。两者同时寻优可以使缺水量在时间和行业分布上更为均匀,达到既减少干旱年份的总体缺水程度,又减少严重缺水的时段,从而实现宽浅式破坏的效果,降低干旱损失,提高供水保障能力。目标函数表达式为

$$F_1 = \min \sum_{t=1}^T (W_{t,\max} - W_t) / W_{t,\max} \quad (1)$$

$$F_2 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T x_{i,t} \quad (2)$$

其中

$$x_{i,t} = \begin{cases} 1 & w_{i,t} > \theta_i \\ 0 & w_{i,t} \leq \theta_i \end{cases}$$

式中: $W_{t,\max}$ 为 t 时段的最大供水量,一般等于 t 时段所有用户的需水量之和; W_t 为 t 时段实际供水量; T 为总时段数; n 为总用户数; $x_{i,t}$ 为第 i 个用户在 t 时段的缺水率超过严重破坏阈值的时段数; $w_{i,t}$ 为第 i 个用户在 t 时段的缺水率; θ_i 为第 i 个用户的严重破坏阈值,可根据国家规范、水库调度规程以及历史资料确定。

1.3.2 约束条件

水库在调度运行模拟的过程中需要满足包括水量平衡约束、供水量约束、水库水位约束、下泄流量约束、变量非负约束等。

a. 水量平衡约束:

$$V_{t+1} = V_t + Q_t - \sum_{i=1}^n W_{i,t} - W_{l,t} - W_{q,t} \quad (3)$$

式中: V_t 为 t 时段初的水库蓄水量; V_{t+1} 为 t 时段末和 $t+1$ 时段初的水库蓄水量; Q_t 为 t 时段水库的入库水量; $W_{i,t}$ 为 t 时段水库给第 i 个用户的供水量; $W_{l,t}$ 为 t 时段水库蒸发、渗漏损失水量; $W_{q,t}$ 为 t 时段水库弃水量。

b. 水库水位约束:

$$Z_{t,\min} \leq Z_t \leq Z_{t,\max} \quad (4)$$

式中: Z_t 为水库在 t 时段的水位; $Z_{t,\min}$ 为水库在 t 时段的最小限制水位; $Z_{t,\max}$ 为水库在 t 时段的最大限制水位。

c. 供水量约束:

$$0 \leq W_{i,t} \leq W_{i,t,\max} \quad (5)$$

式中: $W_{i,t,\max}$ 为水库在 t 时段给第 i 个用户的最大供水量,一般等于 t 时段第 i 个用户的需水量。

d. 下泄流量约束:

$$q_{t,\min} \leq q_t \leq q_{t,\max} \quad (6)$$

式中: q_t 为水库在 t 时段的下泄流量; $q_{t,\min}$ 为水库在 t 时段的最小下泄流量; $q_{t,\max}$ 为水库在 t 时段的最大下泄流量。

1.3.3 决策变量

当水库时段初水位低于旱限水位时,时段内水库由正常供水状态转为限制供水状态,此时将水库

在 t 时段的早限水位 $Z_{hx,t}$ 和限制供水状态下第 i 个用户的限制供水系数 α_i 作为决策变量,需满足:

$$Z_{t,\min} \leq Z_{hx,t} \leq Z_{t,\max} \tag{7}$$

$$0 \leq \alpha_i \leq 1 \tag{8}$$

1.4 模型求解

采用非支配遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II) ^[15] 求解多目标优化模型,通过不断迭代寻优得到早限水位及其对应的行业限制供水系数的非劣解集;之后采用熵权法和 TOPSIS 法 ^[16] 求解最优方案,先根据指标非劣解集中不同方案指标离散程度计算指标熵值,客观确定指标变量权重,再采用 TOPSIS 法对比不同方案与理想解的相对接近度,相对接近度最大的方案即为最优的早限水位方案。

1.5 应急备用水库早限水位与死库容的运用规则

早限水位作为水库的干旱预警指标,其常规运用规则为:当水库水位低于早限水位时,应采取相应的抗旱应急措施,对各行业的供水进行不同程度的限制,其目的是适当减少非必要行业供水量,使有限的水资源尽量满足重要行业的需求。此时,水库对各行业的供水量为设计供水量与限制供水系数的乘积。通过对各行业供水进行不同程度的限制,可以延长供水时间,减少极端缺水情况,降低干旱损失。同时,极端干旱发生期间,抗旱应急备用水库作为供水侧的最后底限,在死水位以上水量很可能无法满足基本用水需求。在这种情况下,应充分考虑使用死库容继续进行补充供水。将死库容与早限水位联动,在水库水位低于早限水位且显著偏低的情况下做好启动死库容的准备,可以合理使用挖掘抗旱应

急备用水源的供水潜力,进一步提高水库应对特大干旱的能力。

2 案例应用

2.1 研究区概况

德泽水库位于云南曲靖市沾益县境内的牛栏江干流上,控制径流面积 4 551 km²,正常蓄水位 1 790 m,正常库容 41 597 万 m³,死水位 1 752 m,对应死库容 18 902 万 m³。德泽水库的供水任务是向滇池补水,改善滇池水环境和水资源条件,并作为昆明市的应急备用水源,在极端干旱时期向昆明市应急供水。受气候和地理位置影响,昆明市所处的滇中地区降水时空分布不均,干旱频发 ^[17],水资源供需矛盾突出。2009—2012 年云南连续出现严重干旱,除冬春季外,夏季也出现严重旱情。这场干旱影响范围大,历时长,农作物受灾严重,导致大量湖泊水库干涸和人畜饮水困难,给云南造成直接经济损失约 458 亿元 ^[18]。昆明主城区常规水源呈“七库一站”的供水格局(图 2),包括云龙水库、松华坝水库、清水海水库 3 座大型水库,宝象河水库、大河水库、柴河水库、红坡-自卫村水库等 4 座中小型水库及天生桥抽水泵站 ^[19],德泽水库通过牛栏江—滇池补水工程为昆明主城区应急供水。目前,德泽水库向滇池多年平均补水量为 5.72 亿 m³,多年平均基础生态下泄量为 3.41 亿 m³。

2.2 德泽水库供水任务

2.2.1 应急供水任务

考虑到云南干旱常态化的趋势,以历史上的极端特大干旱情景为研究背景,确定极端干旱情景下

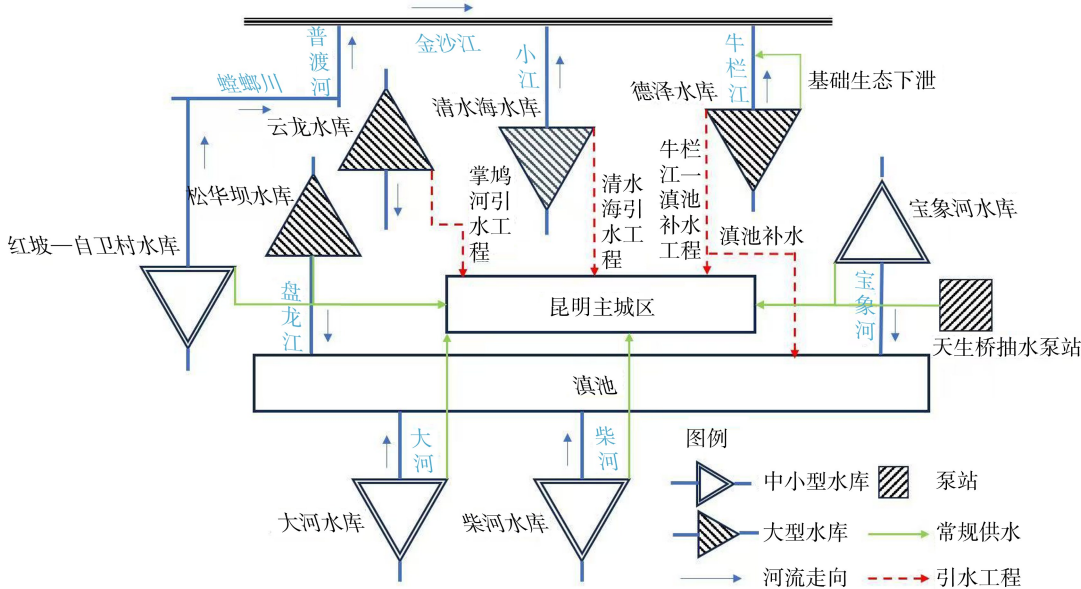


图 2 昆明主城区供水格局

Fig. 2 Water supply pattern in main urban area of Kunming

德泽水库的旱限水位。采用 WAS 模型开展昆明市常规水资源配置计算^[20]。2009—2012 年昆明市发生连续干旱,昆明主城区常规供水中基本生活、生态、工业等行业总缺水量为 4.66 亿 m³,平均每年缺水量为 1.17 亿 m³,各月平均缺水量见表 1。同时,根据《云南省水资源公报》《滇中引水二期配套工程可行性研究报告》,2009—2012 年连续干旱之中,2011 年干旱场景缺水最大。昆明市 2011 年特枯情景时,各供水水源总可供水量为 6.31 亿 m³,缺水量为 1.31 亿 m³。考虑到当前工程条件与水资源条件,采用表 1 中的缺水量作为德泽水库需为昆明市提供的应急供水任务。

表 1 昆明主城区逐月缺水量

Table 1 Monthly water shortage in main urban area of Kunming			
月份	缺水量/万 m ³	月份	缺水量/万 m ³
1	955	7	304
2	1568	8	520
3	1538	9	306
4	1748	10	411
5	1876	11	557
6	1210	12	659

2.2.2 常规供水任务

德泽水库的常规供水任务包括为下游提供基本生态下泄量以及为滇池补水。基本生态下泄量是维持下游河流水生态系统结构和功能的重要保证,避免下游生态出现不可恢复的破坏。滇池位于云贵高原中部,是云南面积最大的淡水湖,具有很高的生态价值。由于地形复杂、立体气候突出等原因,滇池湖滨生态系统十分脆弱^[21]。过去无序的工业发展对滇池生态环境造成了一定破坏,滇池补水对滇池水生态恢复具有重要意义。进行补水之后,昆明城市尾水可以外排至下游作为工业用水,而不是进入滇池加重入湖污染负荷,从而加速滇池环境修复^[22]。确定德泽水库旱限水位方案时,需考虑德泽水库常规供水任务的重要性以及水源条件,优先压缩少量基本生态下泄量和一定的滇池补水量,在不改变供

水顺序的前提下为昆明主城区应急供水。

2.3 旱限水位多情景优化确定

由于德泽水库具备死库容供水条件,以未设置旱限水位为基准情景,两种设置旱限水位的方案为调度情景。方案 1 为常规旱限水位方案;方案 2 为考虑旱限水位与死库容联合运用的方案,德泽水库死库容可用量为 6348 万 m³。方案 1 中,当水库月初水位低于旱限水位时,对月内供水进行限制,水库水量达到死库容时停止供水;方案 2 中,当水库月初水位低于旱限水位时,对月内供水进行限制,水库水量达到死库容后可继续使用死库容进行供水。

基于德泽水库 1954—2020 年水文序列资料,以年为调度周期,以月为计算时段长度,供水顺序为:生态下泄、滇池补水、城市供水,在此基础上建立旱限水位优化确定模型。运用 NSGA- II 对德泽水库的旱限水位进行优化,优化目标为月均缺水率和严重缺水月数最小,设置种群规模为 500,进化次数为 200,求解获取德泽水库旱限水位的非劣解集。其中,严重缺水月数是各行业超过严重缺水阈值的总月数,参考《国家防汛抗旱应急预案》、SL627—2014《城市供水水源规划导则》、GB/T 32135—2015《区域旱情等级》,并结合昆明主城区和滇中历史实际情况,设置生态下泄、滇池补水、城市应急供水的严重缺水阈值分别为 30%、60%、30%。利用熵权法确定月均缺水率和严重缺水月数的权重,并用 TOPSIS 法计算相对接近度 S,相对接近度最大的旱限水位方案即为旱限水位和各行业限制供水系数最优解,结果如图 3 所示。方案 1 最优解位置见图 3(a),最优解对应的生态下泄、滇池补水、城市应急供水的限制供水系数分别为 0.71、0.41、0.70,方案 1 的逐月旱限水位见图 4(a)。方案 2 最优解位置见图 3(b),最优解对应的生态下泄、滇池补水、城市应急供水的限制供水系数分别为 0.70、0.43、1,方案 2 的逐月旱限水位见图 4(b)。可见,方案 2 的

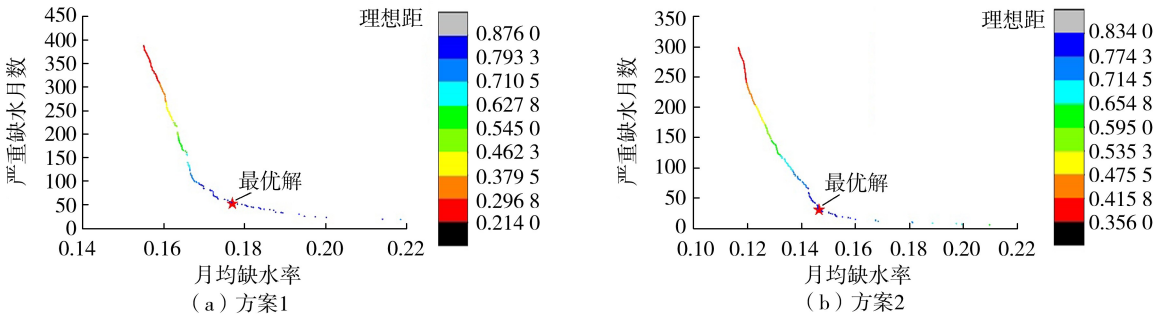


图 3 德泽水库旱限水位最优解求解结果

Fig.3 Optimal solution for drought-limited water level of the Deze Reservoir

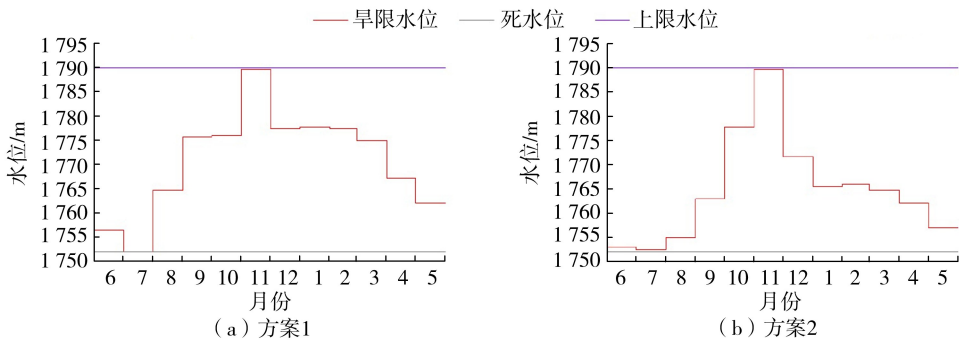


图 4 不同方案下德泽水库的早限水位

Fig. 4 Drought-limited water level of the Deze Reservoir under different schemes

早限水位整体较方案 1 更低。

2.4 设置早限水位效果分析

2.4.1 月均缺水率及严重缺水月数分析

表 2 为各情景下月均缺水率及严重缺水月数。由表 2 可见,基准情景下,滇池补水和城市供水严重缺水月数较大。方案 1 中,设置早限水位之后,总体月均缺水率有一定上升,但滇池补水严重缺水月数大幅下降,城市供水月均缺水率降低且严重缺水月数显著下降,符合宽浅式破坏原则,证明早限水位的设置有一定效果。方案 2 与方案 1 相比,严重缺水月数和月均缺水率继续有所下降,城市供水的月均缺水率降低到 2.52%,应急供水保障能力更好。

表 2 各情景下月均缺水率和严重缺水月数

Table 2 Monthly average water shortage rate and number of severe water shortage months under different scenarios

情景	月均缺水率/%			
	生态下泄	滇池补水	城市供水	总体
基准情景	1.28	18.06	27.58	15.50
方案 1	10.81	22.47	12.74	17.69
方案 2	10.20	20.03	2.52	14.58

情景	严重缺水月数			
	生态下泄	滇池补水	城市供水	总体
基准情景	16	143	229	388
方案 1	3	16	34	53
方案 2	2	8	21	31

2.4.2 供水均衡程度分析

统计长系列计算结果中逐月的缺水率,得到缺水率的标准差,标准差越小,则缺水过程越平稳,供水均衡程度越高,越符合宽浅式破坏原则,各情景下的缺水率标准差如表 3 所示。由表 3 可见,基准情景中滇池补水和城市供水的缺水率标准差相对较高,缺水过程波动较大,供水均衡程度差。方案 1 设置早限水位之后,滇池补水和城市供水的缺水率标准差明显下降,总体的缺水率标准差也有所下降,缺水过程更加平稳,即通过早限水位的调度规则协调了极端干旱下重要湖泊的生态需水和基本的民生用

水,实现了宽浅式破坏。方案 2 的情境下各行业的缺水率标准差均有所下降,城市供水的缺水率标准差下降较多,说明死库容启用之后,城市供水的均衡程度更高,保障程度更好。

表 3 各情景下缺水率标准差

Table 3 Standard deviation of water shortage rate under different scenarios

情景	生态下泄	滇池补水	城市供水	总体
基准情景	0.067	0.339	0.441	0.277
方案 1	0.142	0.296	0.203	0.230
方案 2	0.141	0.276	0.145	0.202

2.4.3 典型连续干旱年效果分析

分析各情景下 2009—2012 水文年滇池补水和城市供水的保障程度,结果如图 5 所示。由图 5(a)可见,未设置早限水位时,有多个月份滇池补水的保障程度低于 40%,缺水率超过严重缺水阈值,出现严重缺水,时间集中在 2011 水文年和其他水文年末。方案 1 设置早限水位之后,严重缺水情况有所缓解,且 2011 水文年滇池补水的整体供水保障程度更高,缺水过程更加平稳,供水均衡度更高,符合宽浅式破坏原则。相比于方案 1,方案 2 中滇池补水的整体保障程度更高,严重缺水月数进一步减少。图 5(b)为城市供水的保障程度,未设置早限水位时,连续干旱年内出现较多严重缺水月,且 2011 水文年严重缺水月连续出现。设置早限水位后,方案 1 的城市供水保障程度明显好转,连续严重缺水有所改善,整体缺水过程更加平缓,符合宽浅式破坏原则;方案 2 的城市供水整体保障程度更好,供水保证率显著提升。

3 结 论

a. 针对特大干旱下抗旱应急备用水库调度问题,提出了抗旱应急备用水库早限水位确定方法,建立了早限水位及其运用规则的优化确定模型,求解获得的早限水位可以用于特大干旱情况下精细化指导备用水库进行供水,并针对应急水源提出了特大

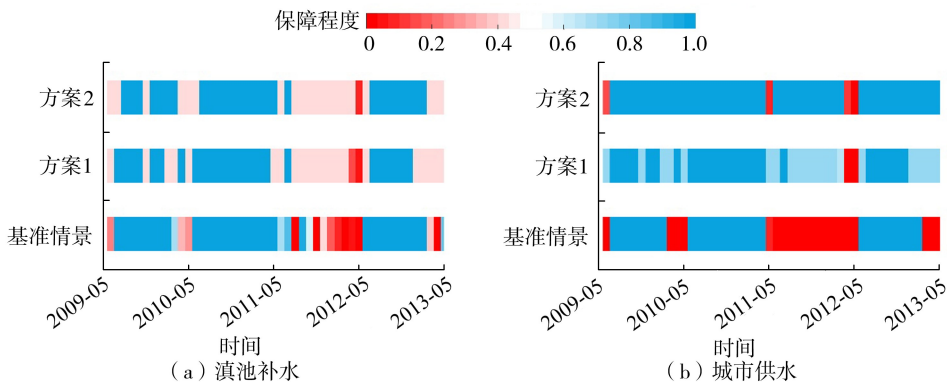


图 5 2009—2012 年滇池补水和城市供水的保障程度

Fig. 5 Guarantee level of Dianchi Lake water replenishment and urban water supply from 2009 to 2012

干旱情况下旱限水位联合死库容启动的机制。

b. 以时段平均缺水率和严重缺水时段数为目标,利用遗传算法优化水库各时段旱限水位和各行业限制供水系数,相比传统的逆序递推法在计算上更为灵活直接,也避免了采用传统逆序递推法时由于应急水源与供水对象水文气象条件丰枯不同步导致的计算边界不确定性问题。

c. 优化确定了德泽水库作为应急备用水源为昆明主城区供水时的旱限水位。结果显示,使用旱限水位指导抗旱调度后,德泽水库应急供水能力有所提升且能够较好地保障水库正常功能。昆明主城区应急供水的严重缺水月数由 229 减少到 31,月均缺水率由 27.58%降至 12.74%。旱限水位与死库容联合应用的情景下城市供水的保障程度进一步提高,严重缺水月数减少到 21,月均缺水率降至 2.52%。

参考文献:

[1] IPCC. AR6 climate change 2021: the physical science basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2021.

[2] 蒋云钟,严子奇,贾绍凤,等. 全球变化背景下特大干旱综合应对研究框架[J]. 水利学报,2023,54(3):347-357. (JIANG Yunzhong, YAN Ziqi, JIA Shaofeng, et al. Initiatives on comprehensive response to severe drought in the context of global changes[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(3):347-357. (in Chinese))

[3] 张长征,沈婷,徐慎晖,等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. 水利经济,2023,41(1):55-61. (ZHANG Changzheng, SHEN Ting, XU Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 55-61. (in Chinese))

[4] 刘永鹏. 水库干旱分级预警水位确定方法[J]. 水电能源科学, 2017, 35 (7): 40-42. (LIU Yongpeng. Determination of graded warning water level of reservoir drought[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(7):

40-42. (in Chinese))

[5] CHANG Jianxia, GUO Aijun, WANG Yimin, et al. Reservoir operations to mitigate drought effects with a hedging policy triggered by the drought prevention limiting water level[J]. Water Resources Research, 2019, 55(2): 904-922.

[6] 罗成鑫,丁伟,张弛,等. 水库分级分期旱限水位设计与控制研究[J]. 水利学报,2022,53(3):348-357. (LUO Chengxin, DING Wei, ZHANG Chi, et al. Research on the design and control of grading and staged drought-limited water level for reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 348-357. (in Chinese))

[7] 张礼兵,白亚超,金菊良,等. 基于模糊集对分析的灌区水库旱限水位及供水策略优化研究[J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1154-1167. (ZHANG Libing, BAI Yachao, JIN Juliang, et al. Optimization study of drought-limited water level and water supply strategy of the reservoir in the irrigation district based on fuzzy set pair analysis method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1154-1167. (in Chinese))

[8] ZHANG Libing, KANG Chuanyu, WU Chengguo, et al. Optimization of drought limited water level and operation benefit analysis of large reservoir [J]. Water Resources Management, 2022, 36(12): 4677-4696.

[9] 韦瑞深,严子奇,周祖昊,等. 基于逆序递推的水库分级分期旱限水位确定方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20 (4): 343-351. (WEI Ruishen, YAN Ziqi, ZHOU Zuhao, et al. Study on the method of determining the graded and staged drought limited water level of reservoir based on the reverse order recursive algorithm[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(4): 343-351. (in Chinese))

[10] LUO Chengxin, XU Bo, DING Wei, et al. Characteristics of reservoirs to mitigate drought effects with a hedging rule triggered by drought limited water level[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 129106.

(下转第 203 页)

[36] SUN X, CROKE B, JAKEMAN A, et al. Benchmarking active subspace methods of global sensitivity analysis against variance-based Sobol' and Morris methods with established test functions[J]. Environmental Modelling & Software, 2022, 149: 105310.

[37] AZZINI I, MARA T A, ROSATI R. Comparison of two sets of Monte Carlo estimators of Sobol' indices [J]. Environmental Modelling & Software, 2021, 144: 105167.

[38] 甘春娟, 段玲红, 陈垚, 等. 城市排水系统水力分析与改造策略: 以秀山县为例[J]. 净水技术, 2018, 37(10): 111-117. (GAN Chunjuan, DUAN Linghong, CHEN Yao, et al. Hydraulic analysis and reconstruction strategy of urban drainage system in Xiushan County [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(10): 111-117. (in Chinese))

[39] WEI P, LU Z, SONG J. Regional and parametric sensitivity analysis of Sobol' indices[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 137: 87-100.

(收稿日期: 2024-08-13 编辑: 王芳)

+++++

(上接第 193 页)

[11] 韦瑞深, 严子奇, 周祖昊, 等. 基于宽浅式破坏原则的水库早限水位优化方法[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 152-158. (WEI Ruishen, YAN Ziqi, ZHOU Zuhao, et al. Optimal method of reservoir drought-limited water level based on principle of wide and shallow damage[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 152-158. (in Chinese))

[12] 李景海. 基于规则的水资源配置模型研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005.

[13] 严子奇, 周祖昊, 韦瑞深, 等. 基于双层滑动的水库早限水位确定算法[J]. 水科学进展, 2022, 33(6): 914-923. (YAN Ziqi, ZHOU Zuhao, WEI Ruishen, et al. A double-layer sliding algorithm for determining drought-limited water level of reservoirs[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(6): 914-923. (in Chinese))

[14] 桑学锋, 王浩, 王建华, 等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS(I): 模型原理与构建[J]. 水利学报, 2018, 49(12): 1451-1459. (SANG Xuefeng, WANG Hao, WANG Jianhua, et al. Water resources comprehensive allocation and simulation model (WAS), part I : theory and development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(12): 1451-1459. (in Chinese))

[15] 谢云东, 章四龙, 王红瑞, 等. 基于 NSGA- II 算法的磬硐水电站多目标调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 207-211. (XIE Yundong, ZHANG Silong, WANG Hongrui, et al. Research on the multi-objective dispatching of Qiaoqi Hydropower Station based on NSGA- II algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3): 207-211. (in Chinese))

[16] 陈强, 杨晓华. 基于熵权的 TOPSIS 法及其在水环境质量综合评价中的应用[J]. 环境工程, 2007(4): 75-77. (CHEN Qiang, YANG Xiaohua. Comprehensive assessment of water environment quality by TOPSIS method based on entropy weight [J]. Environmental Engineering, 2007, 25(4): 75-77. (in Chinese))

[17] 陈晶, 张天力. 滇中高原地区干旱特性及风险分析[J]. 人民长江, 2024, 55(6): 114-121. (CHEN Jing, ZHANG Tianli. Analysis of drought characteristics and risks in Central Yunnan Plateau region[J]. Yangtze River, 2024, 55(6): 114-121. (in Chinese))

[18] 陶云, 张万诚, 段长春, 等. 云南 2009—2012 年 4 年连旱的气候成因研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2014, 36(6): 866-874. (TAO Yun, ZHANG Wancheng, DUAN Changchun, et al. Climatic causes of continuous drought over Yunnan Province from 2009 to 2012 [J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences), 2014, 36(6): 866-874. (in Chinese))

[19] 水利部长江水利委员会. 滇中引水工程通水前昆明市主城区应急供水启动条件(试行)[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2023.

[20] 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]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2024.

[21] 严长安, 杨汝兰, 付潇华, 等. 土地利用变化对滇池流域生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6194-6202. (YAN Changan, YANG Rulan, FU Xiaohua, et al. Impact of land-use change on ecosystem services value in Dianchi Lake Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6194-6202. (in Chinese))

[22] 陈刚, 桑学锋, 顾世祥, 等. 多源水联合调度重构滇池流域健康水循环模式[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 57-69. (CHEN Gang, SANG Xuefeng, GU Shixiang, et al. Joint disposals of multi-source water resources for rehabilitating healthy water cycle in Lake Dianchi Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 57-69. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-08-06 编辑: 王芳)