

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.019

基于宽浅式破坏原则的水库旱限水位优化方法

韦瑞深,严子奇,周祖昊,蒋云钟,王 坤

(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:针对旱限水位计算过程中干早期需水多采用经验性调整系数确定存在主观性较强、合理性不足等问题,基于宽浅式破坏原则,以枯水年内月缺水率均值及其标准差最小为目标优化干早期分行业需水,提出了水库旱限水位优化方法。以汾河水库与汾河二库为例进行优化效果分析,验证方法的合理性和可行性,结果表明:以优化后的旱限水位指导水库调度,可降低枯水年内的月缺水率均值及标准差;以50%作为严重缺水率阈值,优化后的旱限水位能够有效降低严重缺水月数;在连枯水年内,优化后旱限水位控制水库调度效果明显优于未优化的旱限水位,优化后旱限水位能够降低严重缺水情况的发生频率,符合枯水年内宽浅式破坏要求;旱限水位的设置保障了枯水年内各行业的用水安全,可减少极端缺水情况的发生,为旱灾防御指挥决策提供依据。

关键词:旱限水位;宽浅式破坏;抗旱调度;NSGA-II;汾河水库

中图分类号:TV697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0152-07

Optimal method of reservoir drought-limited water level based on principle of wide and shallow damage // WEI Ruishen, YAN Ziqi, ZHOU Zuhao, JIANG Yunzhong, WANG Kun (State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In view of the problems such as strong subjectivity and insufficient rationality in determination of water demand according to the empirical adjustment coefficient in calculation of the drought-limited water level in dry periods, this paper proposes a reservoir drought-limited water level optimization method based on the principle of wide and shallow damage, to optimize water demand of different users with the aim of minimum mean monthly water shortage ratio and its standard deviation in dry years. Taking the Fenhe Reservoir and the Fenhe-II Reservoir as examples, optimization effect analysis was carried out to verify the rationality and feasibility of the method. The results show that the mean monthly water shortage ratio and its standard deviation in dry years can be reduced by using the optimized drought-limited water level to guide reservoir operation. Taking 50% as the threshold for severe water shortage ratio, the optimized drought-limited water level can effectively reduce the number of months with severe water shortage. In consecutive dry years, the reservoir scheduling effect under the control of the optimized drought-limited water level is significantly improved, compared with that under the control of the non-optimized drought-limited water level, and the optimized drought-limited water level can reduce the frequency of severe water shortage, meeting the requirements for wide and shallow damage in dry years. The setting of the drought-limited water level can ensure water safety of various users in dry years, reduce the occurrence of extreme water shortage, and provide a basis for drought prevention command and decision-making.

Key words: drought-limited water level; wide and shallow damage; drought operation; NSGA-II; Fenhe Reservoir

随全球气候变化加剧,水循环过程剧烈变化,极端天气频发^[1-2],干旱发生频率相较于以往有所增加,水资源供需关系愈发紧张。水库作为供水系统网络中的重要水利设施,在水资源时空合理配

置中发挥着更加重要的作用^[3]。为了加强干旱预警,指导工程开展抗旱调度,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》(以下简称《方法》),将旱限水位作为江河湖库

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3000205);水利前期计划资助项目(2019-000011-76-01-000983);国家自然科学基金项目(51779270)

作者简介:韦瑞深(1997—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:1605425965@qq.com

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

进行优化效果分析,验证方法的合理性和可行性。

1 旱限水位优化方法

1.1 旱限水位计算方法与抗旱调度策略

水库旱限水位的逆序递推算步骤^[20,30]为:根据水库来水与供水特性,采用 Fisher 分割法^[31]等划分年内干旱分期;根据 SL/T 278—2020《水利水电工程水文计算规范》确定水库干旱年份的设计来水和设计需水,以水文年为调度周期,逆序叠加逐月应供水量,求得水库旱限水量,通过水位-库容关系获得旱限水位。旱限水位计算公式为

$$Z_{hx,t} = f \left[\sum_{i=1}^n N_{it} a_i + W_{loss,t} - W_{in,t} + f'(Z_{hx,t+1}) \right] \quad (1)$$

式中: $Z_{hx,t}$ 为水库第 t 月的旱限水位; $W_{in,t}$ 为干旱年第 t 月的水库设计来水量; f 为水库库容-水位函数; f' 为水库水位-库容函数; $W_{loss,t}$ 为水库第 t 月蒸发、渗漏损失水量; N_{it} 为用户 i 在第 t 月的正常需水量; a_i 为用户 i 在水库水位低于旱限水位时限制需水的调整系数; n 为总用水户数。

旱限水位对水库抗旱调度的作用体现为:当水库水位低于旱限水位时,启动抗旱响应,对各行业的需水进行不同程度的限制。其中,干旱期需水的确定关系到旱限水位的计算结果,也关系到启动抗旱响应时水库对不同用水供水量的限制程度。旱限水位计算流程与控制技术见图1。

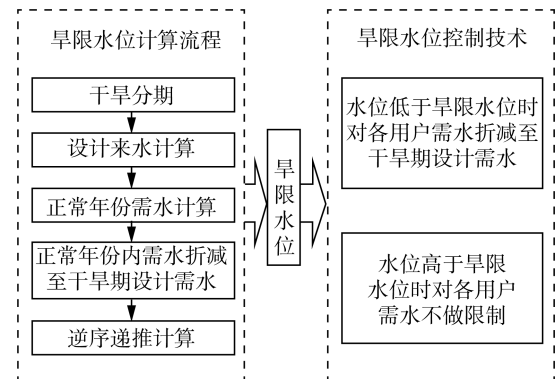


图1 旱限水位计算流程与控制技术

Fig.1 Calculation process and control technology of drought-limited water level

1.2 基于宽浅式破坏原则的旱限水位优化模型

宽浅式破坏原则^[25-26]是指来水不足条件下,在时段之间、地区之间、行业之间尽可能比较均匀地分配缺水量,防止个别时段、个别地区、个别行业出现大范围集中缺水。在该原则下,水库旱限水位确定的核心思想为在干旱初期水位降低至旱限水位时,水库提前限制供水,通过预留水量,保障不发生极端不可恢复的破坏,通过长期多行业的轻度缺水来避

干旱预警重要指标和启动抗旱应急响应的重要依据,并利用水量平衡法计算水库旱限水位。随后,不少学者在此基础上对旱限水位的内涵^[4]、分期特征^[5-6]及确定方法^[7-9]等展开了研究。彭少明等^[10]将旱限水位定义为多年调节水库在年末到达的最低水位,以干旱年份流域供水总收益最大为目标建立多年调节水库旱限水位最优控制模型,对水库下泄流量进行优化,实现多年调节水库年际缺水稳定,并将其应用于黄河流域梯级水库群联合调度^[11-13]。张礼兵等^[14]将旱限水位划分为旱警水位与旱枯水位,当水位低于旱限水位时,对各行业供水进行固定比例的削减,以综合经济效益最大为目标对逐月滑动法求得的旱限水位进行优化。曹润祥等^[15-16]根据水库汛期末存蓄水量对旱限水位动态控制的算法,以累计缺水指数最小为目标,对干旱期总供水的削减比例进行优化。Chang等^[17]根据历史水文气象干旱发生的频率,将干旱分成4个等级,将旱限水位定义为不同等级干旱下出现的最低水位,以总缺水率最小和单次缺水率最小为目标函数,对旱限水位及下泄流量进行优化。

上述旱限水位的研究或将旱限水位定义为水库运行过程中的最低水位,未考虑到水资源供需双侧控制;或是对干旱年份内各行业需水固定削减或仅对总供水的削减比例进行优化,未考虑干旱时期不同行业需水保障程度不同,相应的需水调整比例应有所差异。严子奇等^[18-20]以供需双侧控制为出发点,以在水库调度中广泛应用的对冲理论^[21-24]为基础,提出了基于逆序递推的水库旱限水位确定方法。当水位低至旱限水位时,仅保障基本用水需求,预留水量以备后期使用,依据前期宽浅式破坏原则^[25-26],保障干旱期内各个时段不出现不可恢复的严重缺水,有效缓解干旱期供水不足带来的经济损失。在这一方法中,各行业基本用水需求的确定尤为重要,决定了旱限水位的计算结果和控制策略。为了与抗旱管理实践相结合,目前的算法中参考《国家防汛抗旱应急预案》,采用各行业需水调整系数来确定基本用水需求,所选调整参数具有一定的经验性,可能并非最优解,即存在限制过度或者限制不足的情况,不能保证水资源在时空上的达到最优分配。

本文以宽浅式破坏为干旱期供水原则,基于逆序递推算算法中供水调整系数这一关键参数构建旱限水位多目标优化模型,采用 NSGA (non-dominated sorting genetic algorithm) - II^[27-29]进行模型求解,提升旱限水位在抗旱调度中的效果,以实现水资源在干旱期的合理分配。以汾河水库与汾河二库为例,

免后期重要时段重要行业出现不可恢复的严重缺水。在此基础上确定旱限水位的优化目标、决策变量与约束条件。

1.2.1 目标函数

a. 以枯水年内月缺水率均值最小为目标,即各用户总缺水率越小,破坏程度越浅,供水情况越好。枯水年内逐月缺水率均值计算公式为

$$R_t = \left(\sum_{i=1}^n N_{it} - \sum_{i=1}^n W_{it} \right) / \sum_{i=1}^n N_{it} \quad (2)$$

$$\bar{R} = \sum_{t=1}^T R_t / T \quad (3)$$

式中: W_{it} 为第 t 月用户 i 的供水量; R_t 为所有用户枯水年内第 t 月的总缺水率; T 为枯水年内总月数; $\bar{R}$ 为枯水年内月缺水率均值。

b. 以枯水年内月缺水率标准差最小为目标,标准差越小,说明枯水年内缺水过程越稳定,能够减少极端缺水情况的发生。枯水年内月缺水率标准差计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{t=1}^T (R_t - \bar{R})^2 / T} \quad (4)$$

式中 σ 为枯水年内月缺水率标准差。

目标函数中的月缺水率均值用来衡量缺水的严重程度,月缺水率标准差用来衡量月缺水率的变化程度。对二者同时寻优,可保证在多时段普遍轻度缺水的情况下,整个干旱期缺水较少,且不发生严重缺水,实现宽浅式破坏原则下的抗旱供水优化。

1.2.2 决策变量

在水库调度过程中,当水库水位低于旱限水位时,对各行业的需水进行不同程度的限制,在水库中存蓄水量,以备后续时段使用。将式(1)中各行业限制需水的比例设置为决策变量,这样不仅优化了旱限水位,而且配套生成了优化的供水规则。各决策变量的取值范围为

$$0 \leq a_{\text{ind}}, a_{\text{eco}}, a_{\text{irr}} \leq 1 \quad (5)$$

$$0.7 \leq a_{\text{live}} \leq 1 \quad (6)$$

式中 a_{live} 、 a_{ind} 、 a_{eco} 、 a_{irr} 分别为水库水位低于旱限水位时,生活、工业、生态与农业限制需水的调整系数。

1.2.3 约束条件

a. 旱限水位控制需水约束:

$$N_{L,it} = \begin{cases} N_{it} a_i & Z_t \leq Z_{\text{hx},t} \\ N_{it} & Z_t > Z_{\text{hx},t} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $N_{L,it}$ 为旱限水位控制水库调度时,第 t 月用户 i 的需水量; Z_t 为水库在第 t 月的水位。

b. 旱限水位控制供水约束:

$$W_{it} = \begin{cases} \min(N_{L,it}, Q_t + V_t) & i = 1 \\ \min(N_{L,it}, Q_t + V_t - \sum_{m=1}^{i-1} W_{mt}) & i \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: Q_t 为水库在第 t 月的来水量; V_t 为水库在第 t 月的月初库容; W_{mt} 为第 t 月用户 m 的供水量。

c. 死水位、正常蓄水位与汛限水位约束:

$$Z_{\min,t} \leq Z_t \leq Z_{\max,t} \quad (9)$$

式中: $Z_{\max,t}$ 为水库在第 t 月的上限水位,汛期为防洪限制水位,非汛期为正常蓄水位; $Z_{\min,t}$ 为水库死水位或者所能保证水质的最低水位。

d. 水量平衡约束:

$$V_{t+1} = V_t + Q_t - \sum_{i=1}^n W_{it} - W_{\text{loss},t} \quad (10)$$

e. 其他非负约束。

1.3 模型优化求解

通过构建水库优化调度模型,以各行业需水在枯水年内的调整系数作为决策变量,遍历长系列来水年份中的枯水年,以枯水年内月缺水率均值及标准差最小作为目标函数,根据调度结果中枯水年内月缺水率均值及标准差结果对各行业的调整系数进行反馈修正,运用 NSGA-II^[27-29] 对旱限水位进行优化,降低枯水年内的缺水率及波动幅度。对优化得到的任意两个解,若 $f_1(x_i) > f_1(x_j)$ 、 $f_2(x_i) > f_2(x_j)$, 则解 x_i 支配解 x_j , 解 x_i 优于解 x_j ; 若 $f_1(x_i) < f_1(x_j)$ 、 $f_2(x_i) > f_2(x_j)$ 或者 $f_1(x_i) > f_1(x_j)$ 、 $f_2(x_i) < f_2(x_j)$, 则解 x_i 与解 x_j 不构成支配关系,解 x_i 并不优于解 x_j 。其中 $f_1(x_i)$ 为解 x_i 对应的第 1 个目标函数值, $f_2(x_i)$ 为解 x_i 对应的第 2 个目标函数值。

对位于同一支配层中的解,拥挤度计算公式为

$$I_i = \sum_{m=1}^{n'} |f_m(x_{i+1}) - f_m(x_{i-1})| \quad (11)$$

式中: I_i 为解 x_i 的拥挤度; $f_m(x_i)$ 为解 x_i 对应的第 m 个目标函数值; n' 为目标函数的个数。对于位于解集中左右边界的两个解,其拥挤度为无穷大。

2 实例验证

2.1 研究区概况和数据来源

汾河水库是山西省的第一座大型水库,位于汾河干流上游,以防洪、供水、灌溉为主,是兼顾生态修复、发电、养殖、旅游的大(II)型综合利用水利枢纽工程。汾河水库总库容为 7.33 亿 m^3 ,死库容为 7000 万 m^3 ,兴利库容为 2.26 亿 m^3 。汾河二库位于太原市西北 30 km 的汾河干流上,距其上游汾河水库约 80 km,总库容为 1.33 亿 m^3 ,死库容为 3500 万 m^3 ,兴利库容为 4750 万 m^3 。汾河水库与汾河二库在实际应用过程中联合调度。

来水数据采用汾河水库 1961—2016 年入库流量资料,汾河水库及区间 75% 来水频率的逐月来水量见表 1。生活、工业和农业需水数据来源于 2011—2020 年汾河水库、汾河二库、汾河流域灌区管理局、汾河一坝管理局供用水统计资料,生态需水数据参考汾河二库调度规程设置。各行业逐月需水量见表 2,水资源系统配置网络见图 2,供水优先顺序为生活、生态、工业、农业。根据汾河水库与汾河二库多年平均月入库流量和月供水量,参考汾河水库与汾河二库调度规程,并结合 Fisher 最优分割法,将一个水文年划分为 3 个分期,其中 6—9 月为汛期,10 月至次年 2 月为枯水期,3—5 月为灌溉高峰期。

表 1 干旱年份逐月来水量

Table 1 Monthly water inflow in dry years

月份	来水量/万 m ³		月份	来水量/万 m ³	
	汾河水库	区间		汾河水库	区间
6	738	184	12	496	124
7	1920	480	1	543	136
8	2444	611	2	499	125
9	1376	344	3	1201	300
10	897	224	4	1126	281
11	1205	301	5	585	146

表 2 各行业逐月需水量

Table 2 Monthly water demand of different users

月份	需水量/万 m ³			
	生活需水	生态需水	工业需水	农业需水
6	1000	518	609	104
7	1000	536	278	117
8	1000	536	176	4
9	1000	518	455	64
10	1000	268	317	67
11	1000	259	355	507
12	1000	268	419	444
1	1000	268	142	664
2	1000	242	116	875
3	1000	268	358	6239
4	1000	259	483	2329
5	1000	268	137	57
总和	12000	4208	3847	11472

2.2 旱限水位优化结果

构建汾河水库与汾河二库的联合调度模型,其中,两座水库的运行规则为:①结合实际情况,将汾河水库上游来水优先存放在汾河水库,汾河水库使用上游来水与自身蓄水对用户供水,当达到汾河水库上限库容时,汾河水库会下泄多余水量保障自身防洪安全。汾河二库的供水对象优先使用区间来水和汾河水库的下泄水量,当区间来水和汾河水库下泄水量无法满足汾河二库的供水对象需水时,从汾河水库调水以满足汾河二库的

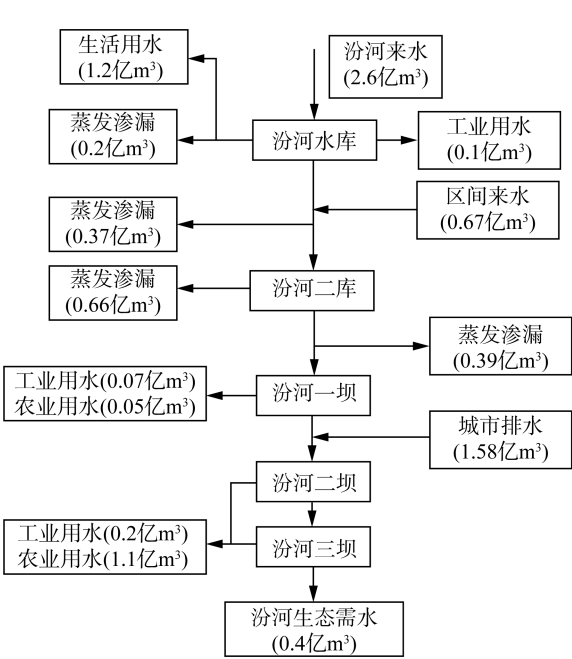


图 2 水资源系统配置网络

Fig. 2 Water resources system allocation network

用水需求。②以优化后的逐月旱限水量作为指标控制水库调度,当两座水库的可用水量之和低于旱限水量时,启动水库抗旱调度,对不同用户的需水进行相应折减。

以枯水年内月缺水率均值及标准差最小为目标函数,运用 NSGA- II 对旱限水位进行优化,迭代次数设置为 500,种群数设置为 100。通过寻优迭代得到 Pareto 解集。Pareto 解集中不同解对应的枯水年内的月缺水率均值与标准差的关系见图 3,两者呈现一种竞争的关系。在 Pareto 解集中,将月缺水率均值及标准差赋予相同权重,选出旱限水位各行业需水调整系数最优解,此时枯水年内月缺水率均值为 35%,月缺水率标准差为 0.24。最优解对应的生活需水、生态需水、工业需水、农业需水的调整系数分别为 0.80、0.41、0.58 和 0.49。逐月旱限水量最优解见表 3。

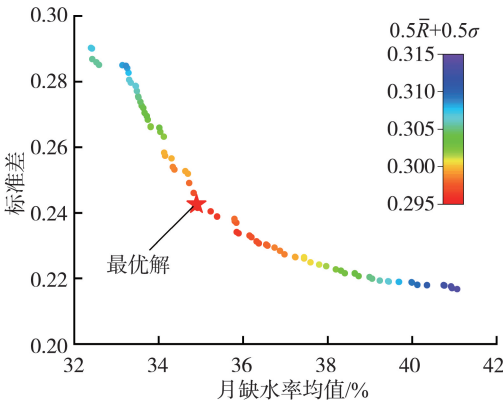


图 3 Pareto 解集

Fig. 3 Pareto solution set

表 3 逐月早限水量最优解 单位:万 m³

Table 3 Optimal drought-limited water volume in different months unit: 10⁴ m³

月份	早限水量	月份	早限水量	月份	早限水量
6	11 773	10	12 406	2	10 208
7	10 899	11	11 959	3	9 500
8	11 427	12	11 814	4	6 966
9	12 544	1	10 903	5	6 209

2.3 优化效果分析

通过比较早限水位设置前后各行业在枯水年内的月缺水率均值及标准差来分析早限水位的作用。设置早限水位后,若月缺水率标准差减小且月缺水率均值波动幅度不大,即可认为所设置的早限水位合理有效,通过实现宽浅式破坏,能够减少干旱情况下严重缺水的次数,降低极端干旱情况造成的经济损失。

本文设置 3 个情景进行对比分析:情景 1 为无早限水位下水库调度,情景 2 为参考《国家防汛抗旱应急预案》设置调整系数的早限水位控制水库调度,情景 3 为运用 NSGA-Ⅱ 优化后的早限水位控制水库调度。遍历长系列来水过程中来水频率大于 75% 的枯水年,共计 14 个年份。以下对不同情景下枯水年内月缺水率均值及标准差进行分析。

情景 2 下的生活需水、生态需水、工业需水、农业需水调整系数分别为 0.95、0.95、0.90 和 0.50。逐月早限水量见表 4。为便于实际应用中管理,可将各干旱分期内的早限水量取外包线得到分期早限水量,情景 2 下汛期(6—9 月)、枯水期(10 月至次年 2 月)、灌溉高峰期(3—5 月)的分期早限水量分别为 16 499 万 m³、15 208 万 m³、10 601 万 m³;情景 3 下相应的分期早限水量分别为 12 544 万 m³、12 406 万 m³、9 500 万 m³。情景 3 下的早限水位与情景 2

表 4 情景 2 下逐月早限水量 单位:万 m³

Table 4 Drought-limited water volume in different months in scenario 2 unit: 10⁴ m³

月份	早限水量	月份	早限水量	月份	早限水量
6	16 499	10	15 208	2	11 588
7	15 068	11	14 398	3	10 601
8	15 143	12	13 883	4	7 657
9	15 843	1	12 582	5	6 494

表 5 3 个情景下月缺水率均值及其标准差

Table 5 Monthly mean water shortage ratio and its standard deviation in three scenarios

情景	月缺水率均值/%					标准差					枯水年内严重缺水月数
	生活	生态	工业	农业	总体	生活	生态	工业	农业	总体	
1	25	37	56	86	38	0.29	0.38	0.49	0.35	0.35	79
2	22	41	45	84	35	0.26	0.25	0.43	0.22	0.30	55
3	23	53	47	67	35	0.18	0.25	0.31	0.35	0.24	32

相比,各月内的早限水量更低,情景 3 下的需水调整系数更低,在启动早限水位控制水库调度时,对各个行业的限制程度更高。将情景 3 应用于水库实际调度过程中,启动早限水位的响应次数也会更少。将早限水量分配至汾河水库与汾河二库时,会有多种组合。在两座水库联合调度过程中,建议以两座水库的可用水量之和低于早限水量作为启动的依据。

2.3.1 枯水年内效果分析

进行不同情景下的水库供水调度模拟,得到各行业在枯水年内的月缺水率均值及标准差,见表 5。以缺水率 50% 作为严重缺水阈值,统计分析 3 种情景下枯水年内严重缺水的月数。情景 2 相较于情景 1,总体月缺水率均值和标准差都有所降低;情景 1 总体月缺水率均值在枯水年内突破 50% 的月数为 79,情景 2 总体月缺水率均值突破 50% 的月数为 55,设置早限水位后,枯水年内的缺水情况有一定程度的改善。对各行业缺水情况进行分析,除生态月缺水率均值有所增大,各行业在枯水年内的月缺水率均值均有减小,总体上各行业缺水情况改善幅度不大,仍需进一步运用 NSGA-Ⅱ 对早限水位的调整系数进行优化。

运用 NSGA-Ⅱ 优化早限水位后,总体月缺水率均值仍保持在 35%,但相较于情景 2,标准差从 0.30 降低至 0.24,说明缺水率波动幅度进一步减小,枯水年内月缺水率均值更多维持在 35% 左右,减少了极端缺水情况发生的次数;相较于情景 2,严重缺水月数从 55 减少至 32,严重缺水月份更多转化为轻微缺水月份,实现了宽浅式破坏,减少了极端缺水情况的发生,降低了损失。从各行业缺水率分析,生活月缺水率的标准差进一步降低至 0.18,工业月缺水率的标准差从 0.43 降低至 0.31,农业的月缺水率均值从 84% 降低至 67%。生活用水在水资源配置系统中具有高优先级,即高保障要求,情景 3 相较于情景 2,生活和工业缺水率的标准差进一步降低,保障了社会稳定;农业缺水率均值有所降低,可通过增加枯水年内的农业灌溉水量,缓解作物减产程度。

2.3.2 典型连续枯水年效果分析

在所有枯水年内,选取典型枯水年(2004—

2006 水文年) 系列进行分析, 分别进行 3 个情景下的水库调度, 月缺水率过程见图 4。水文年内, 未设置早限水位情况下, 缺水情况严重, 在情景 2 下, 缺水情况相较于情景 1 有了一定程度的改善, 但幅度不大, 且 2005 年情景 2 缺水情况仍然较为严重; 而经过 NSGA-II 优化后, 连续特枯水文年内的各行业供水情况更好, 缺水率的减小幅度更大, 保障了连枯水文年内的供水情况, 情景 3 下月缺水率变化更为稳定, 极端缺水情况发生次数较少。

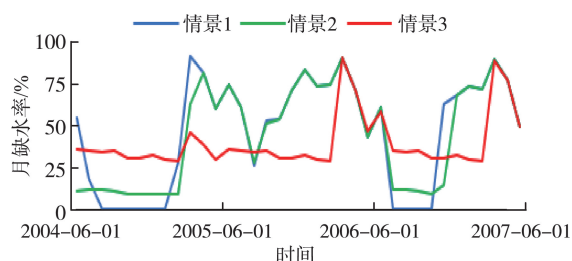


图 4 2004—2006 连枯水文年内月缺水率变化

Fig. 4 Variations of monthly water shortage ratio in consecutive dry hydrological years from 2004 to 2006

总体上看, 在水资源总量有限的情况下, 与无早限水量下的水库常规调度和依据未优化的早限水量进行水库抗旱调度相比, 依据优化后的早限水量进行水库抗旱调度进一步优化了水资源的配置, 降低了枯水文年内总体缺水率, 极度缺水的时段大幅度减少, 改善了生活、工业和农业的缺水情况, 从而保障社会稳定。

3 结 语

本文提出了一种早限水位优化方法, 以枯水文年内月缺水率均值及标准差最小为目标函数, 以各行业启动早限水位后的需求调整系数作为决策变量, 构建早限水位优化控制模型, 并运用 NSGA-II 进行优化求解。以汾河水库与汾河二库为研究对象, 对提出的方法进行验证。构建了两座水库的联合调度模型, 赋予月缺水率均值和标准差同等权重, 从优化得到的 Pareto 解集中选取最优解, 获得汾河水库与汾河二库的早限水量。以两座水库的水量之和低于早限水量作为水库抗旱调度的启动条件, 进行水库优化控制调度。与经验性参数求得的早限水量相比, 优化求解的早限水量低于未优化情景; 依据优化后的早限水位进行水库抗旱调度, 在实际调度过程中抗旱调度启动次数更少, 但单次限供程度更高; 在枯水文年内, 优化后的早限水位控制水库调度结果优于未优化的早限水位, 缺水情况得到较好改善, 符合宽浅式破坏的要求, 验证了该优化方法的合理性与可行性, 可为枯水文年内水库抗旱调度提供科学依据。

参考文献:

- [1] 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))
- [2] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 17-22. (in Chinese))
- [3] 董增川, 陈牧风, 倪效宽, 等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))
- [4] 刘宁. 中国干旱预警水文方法探析[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 444-450. (LIU Ning. Studies on hydrologic drought warning in China[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 444-450. (in Chinese))
- [5] 王义民, 屠子倩, 畅建霞, 等. 水库抗旱调度分期特征确定方法研究[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(1): 112-120. (WANG Yiming, TU Ziqian, CHANG Jianxia, et al. Study on the method of determining the staging characteristics of reservoir drought control[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(1): 112-120. (in Chinese))
- [6] 宋树东, 朱文才. 水库早限水位分期确定的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 160-163. (SONG Shudong, ZHU Wencai. Research on identifying the limited water level of reservoir drought phases[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 37(3): 160-163. (in Chinese))
- [7] 刘攀, 李立平, 吴荣飞, 等. 论水库早限水位分期控制的必要性与计算方法探讨[J]. 水资源研究, 2012, 33(1): 51-55. (LIU Pan, LI Liping, WU Rongfei, et al. Necessity and methods for reservoir seasonal drought control water level[J]. Journal of Water Resources Research, 2012, 33(1): 51-55. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 周建中,刘志明,娄思静,等. 一种湖泊分级分期旱限水位确定与动态控制方法[J]. 水利学报,2022,53(2): 127-138. (ZHOU Jianzhong, LIU Zhiming, LOU Sijing, et al. A method for determining and dynamic controlling the limit water level of lakes by classification and stages [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(2):127-138. (in Chinese))
 - [10] 彭少明,王煜,张永永,等. 多年调节水库旱限水位优化控制研究[J]. 水利学报,2016,47(4):552-559. (PENG Shaoming, WANG Yu, ZHANG Yongyong, et al. Optimal control of drought limit water level for multi-year regulating storage reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(4):552-559. (in Chinese))
 - [11] 张永永,彭少明,白海涛. 基于改进人工鱼群算法的旱限水位优化控制[J]. 人民黄河,2017,39(11):38-41. (ZHANG Yongyong, PENG Shaoming, BAI Haitao. Optimal control of drought limit water level based on improved artificial fish swarm algorithm[J]. Yellow River, 2017,39(11): 38-41. (in Chinese))
 - [12] 彭少明,王煜,尚文绣,等. 应对干旱的黄河干流梯级水库群协同调度[J]. 水科学进展,2020,31(2):172-183. (PENG Shaoming, WANG Yu, SHANG Wenxiu, et al. Response of synergetic optimal operation of cascade reservoirs to drought in the main stream of the Yellow River[J]. Advances in Water Science,2020,31(2):172-183. (in Chinese))
 - [13] 王煜,尚文绣,彭少明. 基于水库群预报调度的黄河流域干旱应对系统[J]. 水科学进展,2019,30(2):175-185. (WANG Yu, SHANG Wenxiu, PENG Shaoming. Yellow River Basin drought response system based on the prediction and operation of cascade reservoirs[J]. Advances in Water Science,2019,30(2):175-185. (in Chinese))
 - [14] 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. (ZHANG Libing, WU Lulu, JIN Juliang, et al. Study of staged drought-limited water level of the main reservoir in the large-scale irrigation district[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,49(6):757-766. (in Chinese))
 - [15] 曹润祥,李发文,冯平. 基于水库旱限水位动态控制的供水策略研究[J]. 安全与环境学报,2019,19(3):916-922. (CAO Runxiang, LI Fawen, FENG Ping. Water supply strategy based on dynamic control of drought limit water level [J]. Journal of Safety and Environment, 2019,19(3):916-922. (in Chinese))
 - [16] CAO Runxiang, LI Fawen, ZHAO Yong. Dynamic regulation of reservoir drought-limit water level[J]. Water Resources, 2021,48(2):194-203.
 - [17] 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.
 - [18] 严子奇,郑金丽,周祖昊,等. 一种梯级水库分级分期旱限库容的计算方法:CN202110551122.X[P]. 2022-02-01.
 - [19] 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))
 - [20] 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))
 - [21] YOU J Y, CAI Ximing. Hedging rule for reservoir operations: 1. a theoretical analysis[J]. Water Resources Research, 2008,44(1):W01415.
 - [22] YOU J Y, CAI Ximing. Hedging rule for reservoir operations: 2. a numerical model [J]. Water Resources Research, 2008,44(1):W01416.
 - [23] 门宝辉,吴智健,刘焕龙,等. 对冲理论在密云调蓄工程中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报,2021,29(6):1440-1449. (MEN Baohui, WU Zhijian, LIU Huanlong, et al. Application of hedging theory in Miyun Reservoir[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021,29(6):1440-1449. (in Chinese))
 - [24] 曹瑞,程春田,申建建,等. 考虑蓄水期弃水风险的水库长期发电调度方法[J]. 水利学报,2021,52(10):1193-1203. (CAO Rui, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, et al. Long-term optimal operation of reservoir considering the water spillage risk during the impoundment period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (10):1193-1203. (in Chinese))
 - [25] 马兴华,左其亭. 区域尺度初始水权分配模型及应用研究[C]//环境变化与水安全:第五届中国水论坛论文集. 北京:中国水利水电出版社,2007:681-685.
 - [26] 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.
 - [27] 李伶杰,王银堂,马敬梅,等. 基于改进 NSGA-II 的龙江和瑞丽江梯级水电站联合优化调度[J]. 水资源保护, 2022,38(2):83-90. (LI Lingjie, WANG Yintang, MA Jingmei, et al. Joint optimal scheduling of Longjiang and Ruilijiang cascade hydropower stations based on improved NSGA-II[J]. Water Resources Protection,2022,38(2): 83-90. (in Chinese))

(下转第 166 页)

- 与大尺度环流因子关系研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 840-852. (TANG Jian, CAO Huiqun, CHEN Jin. Changes of hydro-meteorological factors and the relationships with large-scale circulation factors in the source region of the Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 840-852. (in Chinese))
- [13] 王卫光,李进兴,魏建德,等. 基于蒸散发数据同化的径流过程模拟[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 159-168. (WANG Weiguang, LI Jinxing, WEI Jiande, et al. Runoff simulation by hydrological model based on the assimilated evapotranspiration[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 159-168. (in Chinese))
- [14] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. Science, 2004, 305(5683): 503-505.
- [15] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381-394.
- [16] WAN Zhanming, ZHANG Ke, XUE Xianwu, et al. Water balance-based actual evapotranspiration reconstruction from ground and satellite observations over the conterminous United States [J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6485-6499.
- [17] 唐红元,贾益纲. 基于 LHS 的混凝土时效不确定性模拟研究[J]. 南昌大学学报(工科版), 2007, 29(1): 83-86. (TANG Hongyuan, JIA Yigang. Latin hypercube sampling based uncertainty simulation of concrete time effects[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2007, 29(1): 83-86. (in Chinese))
- [18] RODELL M, FAMIGLIETTI J S, CHEN Jianli, et al. Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observations [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(20): L20504.
- [19] SCANLON B R, ZHANG Zizhan, SAVE H, et al. Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(6): E1080-E1089.
- [20] CHANG Zhenbo, LU Wenxi, WANG Han, et al. Simultaneous identification of groundwater contaminant sources and simulation of model parameters based on an improved single-component adaptive metropolis algorithm [J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(2): 859-873.
- [21] LI Junru, WU Zhenyu, CHEN Jiankang. An advanced Bayesian parameter estimation methodology for concrete dams combining an improved extraction technique of hydrostatic component and hybrid response surface method [J]. Engineering Structures, 2022, 267: 114687.
- [22] 刘毅斌. 基于 Bayesian-MCMC 方法的深受弯构件受剪承载力分析[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [23] 谢悦波. 水信息技术课程指导书[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [24] 钟建军, 宋健, 由长喜, 等. 基于信噪比评价的阈值优选小波去噪法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2014, 54(2): 259-263. (ZHANG Jianjun, SONG Jian, YOU Changxi, et al. Wavelet de-noising method with threshold selection rules based on SNR evaluations[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(2): 259-263. (in Chinese))
- [25] 鞠艳, 张珂, 李炳锋, 等. 金沙江流域实际蒸散发时空分布特征及其影响因子[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 104-110. (JU Yan, ZHANG Ke, LI Bingfeng, et al. Spatiotemporal distribution of actual evapotranspiration and its influencing factors in Jinsha River Basing [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 104-110. (in Chinese))
- [26] 张桀漓. 长江流域土地覆被变化对碳水通量的影响及其机制研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.

(收稿日期: 2022-07-20 编辑: 施业)

(上接第 158 页)

- [28] 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 Ru'an, 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))
- [29] 王学斌, 畅建霞, 孟雪皎, 等. 基于改进 NSGA-II 的黄河下游水库多目标调度研究[J]. 水利学报, 2017, 48(2): 135-145. (WANG Xuebin, CHANG Jianxia, MENG Xuejiao, et al. Research on multi-objective operation based on improved NSGA-II for the lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(2): 135-145. (in Chinese))
- [30] 水利部水旱灾害防御司, 中国水利水电科学研究院. 江河湖库水文干旱预警水位(流量)确定技术指南(征求意见稿)[Z]. 北京: 水利部水旱灾害防御司, 2021.
- [31] 刘克琳, 王银堂, 胡四一, 等. Fisher 最优分割法在汛期分期中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 14-16. (LIU Kelin, WANG Yintang, HU Siyi, et al. Application of fisher optimal dissection method to flood season division[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3): 14-16. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-06-10 编辑: 施业)