

# 考虑生态流量约束的梯级水库分期消落水位多目标优化调度

林凡奇,周研来,薛凯元

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072)

**摘要:**针对如何表征枯水期季节性特征、优化分期消落水位来指导水库群消落调度的科学问题,提出了考虑生态流量约束的梯级水库分期消落水位多目标优化调度模型。以金沙江中下游6座水库与三峡水库为研究对象,综合运用多种数理统计方法划分流域枯水期;采用逐月滑动计算法推求梯级水库分期消落水位;以生态和发电效益最大为目标函数,利用NSGA-II算法求解调度模型,得到不同来水情景下梯级水库枯水期消落调度方案。研究结果表明:不同来水情景下,相较于常规调度方案,选定的优化调度方案可增加梯级水库发电量30.20亿~52.27亿kW·h(增加2.3%~5.0%)和供水量83.15亿~87.14亿m<sup>3</sup>(增加5.8%~7.4%),并提高河道生态流量保证率2.6%~22.9%。研究成果可为协调梯级水库生态和发电调度提供技术支撑。

**关键词:**生态调度;消落调度;分期消落水位;多目标优化;梯级水库

**中图分类号:**TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2024)01-0010-08

多目标优化调度是探究梯级水库枯水期消落运行方式的有效途径之一,不仅能够协调发电、抗旱、生态等多个目标之间的用水冲突,还可促进流域可持续发展。随着生态环境保护意识的不断提高,生态调度逐渐成为梯级水库运行的重要内容,许多学者围绕这一主题开展大量的研究,并取得了丰硕的成果。周颖等(2023)以发电量最大、生态效益最高和供水满足度最大为目标构建了水库群消落期多目标优化调度模型,并利用非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)高效求解,探究了流域水库群生态、发电和供水三目标之间的关系。张松等(2021)耦合四大家鱼产卵保护、湖泊补水和水质防控需求,构建了以洞庭湖生态满足度最大和发电量最大为目标函数的梯级水库消落期多目标优化调度模型,并在金沙江下游-三峡水库群开展了实例研究,获得了三峡水库最优生态调度策略,协同优化了生态与发电调度目标。然而,当前水库消落调度研究都是基于年最低消落水位来展开,缺乏考虑枯水季节性规律,并未开展基于分期消落水位的水库消落调度研究。

枯水期是河流生态脆弱性较高的时期,水库水位变化对电站发电和下游河道生态环境影响较大。例如,水库在枯水期为充分利用水库水头效益增发发电量,往往会保持高水位运行,在汛前才会大幅度消落至枯期消落水位。但由于在枯水期前、中期来水较少,这种消落运行方式会导致水库下泄流量变小、供水量不足以满足下游生态流量需求,进而破坏河道内外生态环境。在我国,为保障枯水期城乡生活、工农业生产、生态环境等用水安全,部分水库会设置水库枯期消落水位,以防止水库水位过低而导致下游干旱风险。但单一的枯期消落水位忽略了枯水季节性规律,全年使用单一消落水位不利于应对变化中的水资源利用(刘攀等,2012)。开展梯级水库分期消落水位多目标优化调度研究,可充分挖掘枯水季节性规律,有助于增加水电站发电量,有利于维护水生态环境的稳定与可持续性,不仅具有巨大的应用价值,而且具有重大的科学意义。

为表征枯水期季节性规律、优化梯级水库分期消落水位,以提升水库生态和发电协同效益,本文提出考虑生态流量约束的梯级水库分期消落水位多目标优化调度模型,在金沙江中下游6座水库与三峡水库开展应用研究,以期为实现水资源可持续利用和生态环境保护提供技术支持和决策参考。

## 1 研究对象

### 1.1 区域概况

三峡水库于2009年和2011年对下游实施生态补水调度,在长江中下游抗旱减灾和生态环境保护

收稿日期:2023-10-25

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200303)。

作者简介:林凡奇,2002年生,男,博士研究生,主要从事水库抗旱调度研究。E-mail: linfanqi@whu.edu.cn

通信作者:周研来,1985年生,男,教授,博导,主要从事水库调度研究。E-mail: yanlai.zhou@whu.edu.cn

中发挥了重要作用,但其调度方式基本上以控制枯水期下泄流量为要求。当长江中下游发生较严重枯水时,仅有“需实施水资源应急调度”的原则性要求,尚无明确的、指导性的流域层面调度规则(郑静和张虎,2023)。此外,目前仅有三峡水库承担了下游抗旱与生态保障任务,未考虑上游水库的调蓄作用。因此,本研究选取金沙江中下游鲁地拉水库、观音岩水库、乌东德水库、白鹤滩水库、溪洛渡水库、向家坝水库以及长江干流三峡水库作为研究对象(图1),开展梯级水库分期消落水位多目标优化调度研究,以指导枯水期水库群消落调度,保障水库发电、生态和供水等用水需求。

综合考虑梯级水库运行特点、年最小入库流量分布特征、流域降雨径流特征和三峡水库消落调度规则,本研究将12月1日至次年6月10日定义为金沙江中下游及长江上游流域的枯水期(郭崇炎,2022)。

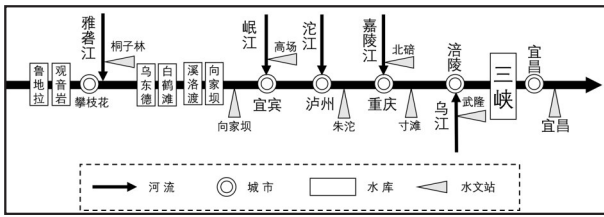


图1 研究区域概化

Fig.1 Schematic map of the study area

### 1.2 梯级水库调度规则

综合考虑水利部批复的《2022年长江流域水工程联合调度运用计划》以及《三峡工程泥沙原型观测分析年报》,金沙江中下游6座水库与三峡水库的消落调度规则与约束如表1和表2。以上7座水库枯水期常规调度方案均按照表1调度规则进行均匀消落。

## 2 研究方法

综合运用数理统计、聚类分析等方法划分流域枯水期,以表征枯水季节性规律;采用逐月滑动计算法推求梯级水库分期消落水位,并将其作为模型约束条件;以生态流量保证率最大和发电量最大为目标函数,利用智能算法高效求解调度模型,获取不同来水情景下梯级水库枯水期消落调度方案。

### 2.1 枯水期分期

有序聚类法、信息熵法和灰色关联分析是数据挖掘的常用方法,被广泛用于解决图像分类、降维和汛期分割等问题(Jiang et al, 2019)。为表征枯水期入库流量的季节性,本研究基于日最小值取样方法

得到的数据,通过应用这3种数理统计分析方法,将整个流域枯水期划分为 $k$ 个子枯水期。

表1 金沙江中下游6座水库与三峡水库枯水期消落调度规则

Tab.1 Drawdown operation rules for six reservoirs in the middle and lower Jinsha River and Three Gorges Reservoir during the dry season

水库	枯水期调度规则
鲁地拉	①非汛期水库根据兴利需求进行调度; ②当坝下水位低于1 132.5 m时,按照瞬时流量控制; ③当坝下水位高于1 132.5 m时,按照日均流量控制。
观音岩	①非汛期水库根据兴利需求进行调度; ②最小下泄流量不小于350 m <sup>3</sup> /s;日均流量不小于439 m <sup>3</sup> /s控制。
乌东德	非汛期水库根据兴利需求进行调度。
白鹤滩	非汛期水库根据兴利需求进行调度。
溪洛渡	非汛期水库根据兴利需求进行调度。
向家坝	非汛期水库根据兴利需求进行调度。
三峡	①蓄满年份,1-2月水库下泄流量按不小于6 000 m <sup>3</sup> /s控制,3-5月的最小下泄流量应满足葛洲坝下游庙嘴水位不低于39 m。未蓄满年份,根据水库蓄水和来水情况合理调配下泄流量。 ②汛前,三峡水库水位根据长江来水情况均匀消落,5月25日水库水位一般不高于155 m,至6月10日水库水位消落至防洪限制水位145 m。

表2 金沙江中下游6座水库与三峡水库枯水期消落调度约束

Tab.2 Drawdown operation constraints of six reservoirs in the middle and lower Jinsha River and Three Gorges Reservoir during the dry season

水库	生态流量 /m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	最大下泄流量/m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	水位变幅约束/m·d <sup>-1</sup>	枯期极限消落水位/m
鲁地拉	400	16500	≤2.0	-
观音岩	350	17100	≤2.0	-
乌东德	1200	49400	≤2.0	-
白鹤滩	1200	49700	≤2.0	-
溪洛渡	1200	43700	≤2.0	-
向家坝	1200	49800	≤2.0	-
三峡	5500	98800	≤0.6 (12月-次年4月); ≥0.4且≤1.0(5月)	155

其中,有序聚类法是通过最小化同一分段中数据点的离差平方和来确定枯水期时间序列的最佳分割点;信息熵法的原理是通过追求各子枯水期的同质性和各子枯水期之间的异质性,将整个枯水期划分为若干个分期;灰色关系分析的本质是通过最大限度地提高参考时间序列和比较时间序列之间的关联度来实现枯水期的最优划分。前两者的分期依据是离差平方和与信息熵对时间序列离散特征

的定量描述,最终分期结果基本一致。而灰色关联分析反映了参考序列和若干个比较序列的几何形状相似程度,相对整体关联度最大的时间节点即为改变点(Hu et al, 2022)。这 3 种分期方法的原理具体见参考文献(王声扬等,2022;张霞等,2019),在此不作赘述。

通过多种枯水期分期方法比较分析,不仅可以减少主观因素对分期结果造成的影响,也能平衡各分期方法的优劣。本研究综合 3 种分期方法,遵循主枯水期取外包的原则得到最终枯水期分期结果,提高枯水期分期的可靠性。

## 2.2 分期消落水位推求

水库消落水位采用逐月滑动算法计算,并考虑取水高程等因素来最终确定。分期消落水位是根据划分好的枯水期分期特征,计算各分期内水库应供水量与死库容之和所对应的水库水位,取分期内最大值来确定。

$$Z_{m,j} = \varphi(W_{m,j} + V_{m,0}) \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (1)$$

式中: $Z_{m,j}$ 为第  $m$  水库在第  $j$  枯水期的消落水位; $W_{m,j}$ 为第  $m$  水库在第  $j$  枯水期的最大月供水量; $\varphi(\cdot)$ 为水库水位库容关系; $V_{m,0}$ 为第  $m$  个水库的死库容。

枯水期分期与分期消落水位计算可为考虑生态流量约束的梯级水库分期消落水位多目标优化调度模型提供  $k$  个子枯水期消落水位约束条件。

## 2.3 枯水期多目标优化调度模型

为了在水资源管理和水电开发中更好地平衡河流生态环境和经济效益,本研究以梯级水库群下游河道生态流量保证率最大和发电量最大为目标函数构建枯水期梯级水库多目标优化调度模型,考虑流量、分期消落水位、水位变幅等约束,并采用 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) 算法对优化调度模型进行求解。

2.3.1 目标函数 (1)生态目标 以枯水期内流域生态流量保证率最大为目标,按下式计算:

$$f_1 = \min \frac{\sum_{t=1}^T T_t}{T} \times 100\% \quad (2)$$

$$T_t = \begin{cases} 1, & \text{if } [Q_n(t) \geq Q_n^{\min}(t)] \\ 0, & \text{if } [Q_n(t) < Q_n^{\min}(t)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $n$ 为流域内各控制站点个数; $T_t$ 为第  $t$  时段的计数器; $Q_n(t)$ 为经梯级水库群调度后第  $n$  个控制

站点第  $t$  时段的流量; $Q_n^{\min}(t)$ 为第  $n$  个控制站点第  $t$  时段河道所需的生态流量;当  $Q_n(t) < Q_n^{\min}(t)$ ,河道内生态流量不能得到保障,流域生态遭到破坏, $T_t = 0$ ;反之, $T_t = 1$ 。

生态流量是为维系河流、湖泊、沼泽等水生态系统的结构与功能,需要保留在河流、湖泊、沼泽内符合水质要求的流量,包括基本生态流量和目标生态流量(中华人民共和国水利部,2021)。河流控制断面基本生态流量的计算应按生态基流、年内不同时段流量、全年流量等表述。为了确保河流生态的健康,并避免其长期处于干旱的极限情况,本研究梯级水库下游河道生态流量采用《水利部关于印发第一批重点河湖生态流量保障目标的函》的成果,选择 90% 保证率下的流量作为生态基流(中华人民共和国水利部,2020)。

(2)发电目标 以枯水期内水库群水电站总发电量最大为目标函数,按下式计算:

$$f_2 = \max \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T k_m Q_m^{\text{fd}}(t) H_m(t) \Delta t \quad (4)$$

式中: $M$ 为水库个数; $k_m$ 为第  $m$  水库出力系数; $Q_m^{\text{fd}}(t)$ 为第  $m$  水库第  $t$  时段的发电流量; $H_m(t)$ 为第  $m$  水库第  $t$  时段的发电水头; $\Delta t$ 为计算时段长。

2.3.2 约束条件 在枯水期,为满足水库生态、供水、下游航运等需求,模型应考虑以下约束。

(1)各水库水量平衡约束

$$[Q_m^{\text{in}}(t) - Q_m^{\text{out}}(t)] \cdot \Delta t - L_m(t) = V_m(t) - V_m(t-1) \quad (5)$$

式中: $Q_m^{\text{in}}(t)$ 和  $Q_m^{\text{out}}(t)$ 分别为第  $m$  水库第  $t$  时段的入库流量和出库流量; $\Delta t$ 为计算时段长; $L_m(t)$ 为第  $m$  水库第  $t$  时段的水量损失; $V_m(t)$ 和  $V_m(t-1)$ 分别为第  $m$  水库第  $t$  时段和第  $t-1$  时段的库容。

(2)各水库水位约束

$$Z_{m,j} \leq Z_m(t) \leq Z_m^{\text{max}} \quad (6)$$

$$|Z_m(t) - Z_m(t-1)| \leq \xi_m \quad (7)$$

$$Z_m(0) = Z_m^{\text{start}}, Z_m(T) = Z_m^{\text{end}} \quad (8)$$

式中: $Z_m(t)$ 和  $Z_m(t-1)$ 分别为第  $m$  水库第  $t$  时段和第  $t-1$  时段的水位; $Z_{m,j}$ 为第  $m$  水库第  $j$  分期内的旱限水位; $Z_m^{\text{max}}$ 为第  $m$  水库在调度期内所能达到的最高水位; $\xi_m$ 为第  $m$  水库水位变幅最大值; $Z_m(0)$ 和  $Z_m(T)$ 分别为第  $m$  水库第 0 时刻和第  $T$  时刻的水位; $Z_m^{\text{start}}$ 和  $Z_m^{\text{end}}$ 分别为第  $m$  水库调度期的初始水位和结束水位。

## (3)各水库流量约束

$$Q_m^{\min} \leq Q_m^{\text{out}}(t) \leq Q_m^{\max} \quad (9)$$

式中: $Q_m^{\text{out}}(t)$ 为第 $m$ 水库第 $t$ 时段的出库流量; $Q_m^{\min}$ 和 $Q_m^{\max}$ 分别为第 $m$ 水库调度期内最小出库流量和最大出库流量。

## (4)河道洪水演进约束

$$Q_i'(t) = \varphi_i [Q_m^{\text{out}}(t), Q_m^{\text{out}}(t-1), \dots, Q_m^{\text{out}}(t-\tau_i)] + \Delta q_i(t) \quad (10)$$

式中: $Q_i'(t)$ 为第 $i$ 河段 $t$ 时段流量; $\varphi_i(\cdot)$ 为第 $m$ 水库至第 $i$ 河段间洪水演进函数; $\tau_i$ 为洪水演进的滞时; $\Delta q_i(t)$ 为第 $i$ 个河段 $t$ 时段区间支流。

## (5)水电站出力约束

$$P_m^{\min} \leq P_m(t) \leq P_m^{\max} \quad (11)$$

式中: $P_m(t)$ 为第 $m$ 水电站第 $t$ 时段的出力; $P_m^{\min}$ 和 $P_m^{\max}$ 分别为第 $m$ 水电站的最小出力和最大出力。

(6)非负约束 水库调度主要通过控制下泄流量和改变下游水位来满足下游供水、河道航运等用水需求(丁胜祥等,2023;任玉峰等,2020)。因此,本研究在构建枯水期多目标优化调度模型时将航运等因素作为硬性约束条件,以保证调度期内下游流量变化、水位变幅在水库调度规程运行的范围内。具体约束见表1和表2。

2.3.3 求解方法 本研究构建的梯级水库分期消落水位多目标优化调度模型,以发电量最大与生态流量保证率最大为目标,是典型的多目标优化问题。因此,本文采用经典的多目标优化算法——NSGA-II算法对上述模型进行求解。该算法由Deb等(2002)提出,相较于NSGA算法的改进之处在于引入了精

英策略,即将每一代中的最优个体(非劣解)直接复制到下一代,以确保最好的解能够保持在种群中,这样可以提高算法的收敛性和全局搜索能力。NSGA-II算法具体求解步骤见马永胜(2022)文献。

## 3 结果与分析

## 3.1 枯水期分期与分期消落水位

本研究分别采用有序聚类法、信息熵法和灰色关联分析方法将金沙江中下游-长江上游流域的枯水期分为3期(即前枯水期、主枯水期和后枯水期)。枯水期分期计算结果如表3。综合以上3种分期方法对金沙江中下游-长江上游流域枯水期进行划分,遵循主枯水期取外包的原则,得到枯水期分期结果:前枯水期为12月,主枯水期为1-4月,后枯水期为5月1日-6月10日。

以严重干旱情景下设计来水过程作为水库消落水位计算的枯水期来水系列,可保障城乡生活、重要工农业、河道基本生态环境需水量要求(罗成鑫等,2022)。由于《气象干旱等级》(GB/T 20481-2017)中指出严重干旱年来水频率不应小于90%,因此本研究选择特枯水年( $P=95\%$ )枯水期设计来水来确定水库分期消落水位(全国气候与气候变化标准化技术委员会,2017)。本研究结合梯级水库流域水文气象特点,对各水库1966-2022年径流数据进行P-III型理论频率曲线分析,分别获取特枯水年( $P=95\%$ ,典型年为1966年)设计年径流,并按照其典型年进行年内月径流过程缩放,得到梯级水库特枯水年枯水期的入库设计月径流过程。考虑水库特枯水年入库径流过程以及不同用户需水特性,经用水分析计算枯水期各分期内最大应供水量与死库容之和,再由水库水位-库容关系得出其相应的水位,即为各分期消落

表3 金沙江中下游-长江上游流域枯水期分期计算结果

Tab.3 Phase division of the dry season in the middle and lower Jinsha River-upper Yangtze River basin

枯水期分期方法		前枯水期	主枯水期	后枯水期
有序聚类法	起止日期	12月1日-12月31日	1月1日-4月26日	4月27日-6月10日
	离差平方和	4.57	6.16	22.21
信息熵法	起止日期	12月1日-12月31日	1月1日-4月27日	4月28日-6月10日
	熵	3.69	4.69	3.53
灰色关联分析	起止日期	12月1日-1月3日	1月4日-4月30日	5月1日-6月10日
	改变点相对T-整体关联度	2.52(前-主枯水期)		1.31(主-后枯水期)
最终分期结果 (主枯水期取外包线)		12月1日-12月31日	1月1日-4月30日	5月1日-6月10日

水位。表 4 展示了金沙江中下游 6 座水库群和三峡水库的分期消落水位计算结果。

表 4 金沙江中下游水库群和三峡水库各分期内消落水位 m

Tab.4 Seasonally drawdown-limited water levels (DLWLs) of six reservoirs in the middle and lower Jinsha River and Three Gorges Reservoir

水库	前枯水期	主枯水期	后枯水期
鲁地拉	1217.8	1218.6	1216.3
观音岩	1124.4	1125.0	1123.4
乌东德	957.1	970.0	953.9
白鹤滩	779.4	784.7	776.7
溪洛渡	547.2	551.7	546.5
向家坝	372.4	374.2	371.4
三峡	152.0	158.6	145.0

由表 4 可知,各水库主枯水期消落水位最高,前枯水期次之,后枯水期最低。这说明各水库前、后枯水期来水较多,下游需水量较小,发生缺水事件的概率小;而在主枯水期来水较少,下游需水量大,消落水位的提高可以为下游未来缺水事件预留出足够的水量,有效降低缺水事件发生的几率。其中,三峡水库调度规则规定一般年份库水位不得低于枯期消落低水位 155.0 m,而单一水位控制忽略了枯水季节性规律,不利于应对变化环境下水资源利用问题。因此,在主枯水期将消落水位设置在 155.0 m 以上,前、后枯水期消落水位设置在 155.0 m 以下,可以提高三

峡水库抗旱与生态补偿能力,同时也为进入汛期提前消落至死水位(145.0 m)做好准备。

### 3.2 多目标优化调度结果

宜昌站为长江上游与中游分界点,控制流域面积约 100.55 km<sup>2</sup>,涵盖金沙江中下游 6 座水库和三峡水库坝址以上控制流域,且水文观测数据丰富、长期稳定,经过多年的观测和验证,数据质量和可靠性得到了广泛认可。因此,本研究选择宜昌站水文数据作为典型年选取依据,对 1966–2022 年宜昌站径流资料排频后,选取典型年 2002 年为丰水年( $P=25\%$ )、1971 年为平水年( $P=50\%$ )、1991 年为枯水年( $P=75\%$ )、1966 年为特枯年( $P=95\%$ ),经过以生态流量保证率最大和发电量最大为目标函数的多目标优化调度模型求解,得到不同典型年枯水期梯级水库群多目标优化调度 Pareto 前沿解集、综合效益和相应调度过程。

3.2.1 多目标 Pareto 解集 图 2 为不同来水情景下金沙江中下游 6 座水库及三峡水库多目标优化调度的 Pareto 最优解分布与常规调度方案对比。其中,A 点为河道生态流量保证率最大方案,C 点为梯级水库总发电量最大方案,D 点为常规调度方案,而 B 点兼顾了生态和发电效益,为协调方案。

由图 2 可以看出,生态流量保证率随着水库群总发电量的增大而减小,这是由于为达到更高的发电量,水库需在前枯水期与主枯水期持续高水位运行,

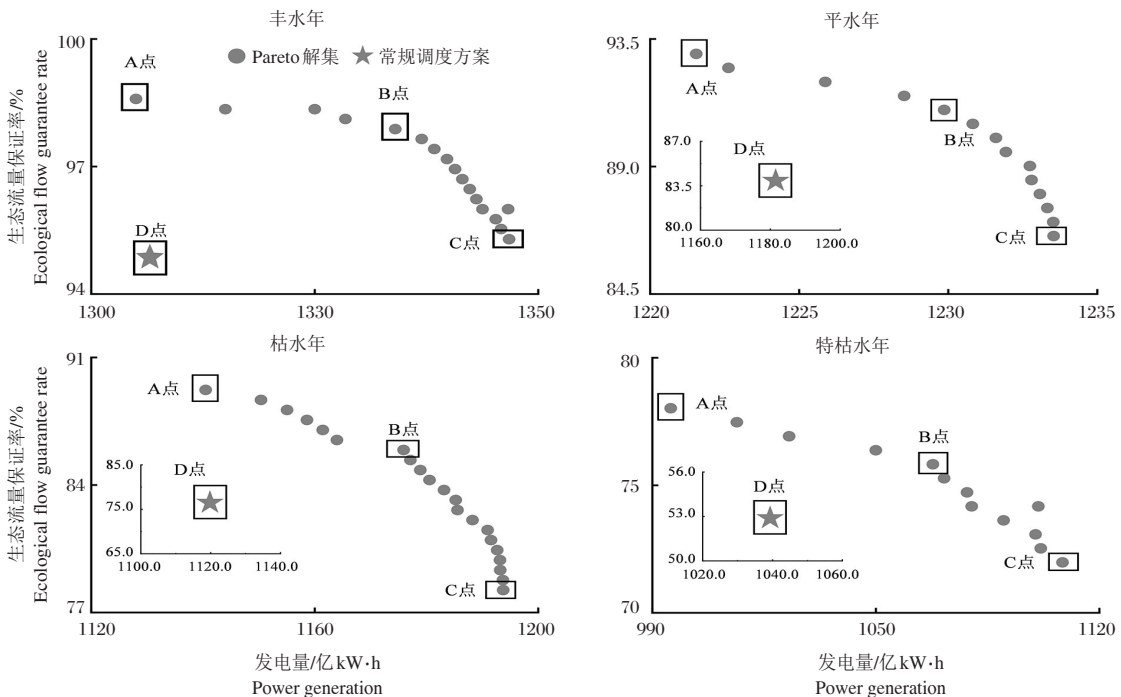


图 2 各典型年 Pareto 最优解分布与常规调度对比

Fig.2 Comparison plots between Pareto front and conventional operation scheme of different typical years

在来水较丰的后枯水期集中消落,此时发电流量和发电水头均较大,水库群总发电量更大(公式④)。梯级水库这种运行方式虽然可以提高发电量,但由于前、主枯水期来水较枯,该时期水库水位消落幅度较缓,出库流量小,下游流域不能满足生态流量约束,生态流量保证率变小。因此,生态与发电目标呈现竞争关系。

**3.2.2 综合效益** 由于选定的协调调度方案对应的目标解分布在Pareto解集的拐点左右,兼顾了生态目标与发电目标,因此本文选取不同来水情景下协调调度方案和常规调度方案进行综合效益的对比分析。评价指标除生态流量保证率和发电量外,还引入了供水量指标(李建龙,2022),反映各方案梯级水库的水资源利用程度。计算结果见表5。

由表5可知:相较于常规调度方案,(1)协调调度方案可使梯级水库下游河道生态流量保证率提升2.6%~22.9%;(2)协调调度方案可使金沙江中下游6座水库与三峡水库总发电量增加30.20亿~52.27亿kW·h,相应的发电量增幅为2.3%~5.0%,且来水越枯,可增发电量和发电量增幅越大,这是因为来水减少,导致水库发电水头减小,进而会影响水库发电量;(3)协调调度方案可使梯级水库供水量增加83.15亿~87.14亿m<sup>3</sup>,相应供水量增幅为5.8%~7.4%,

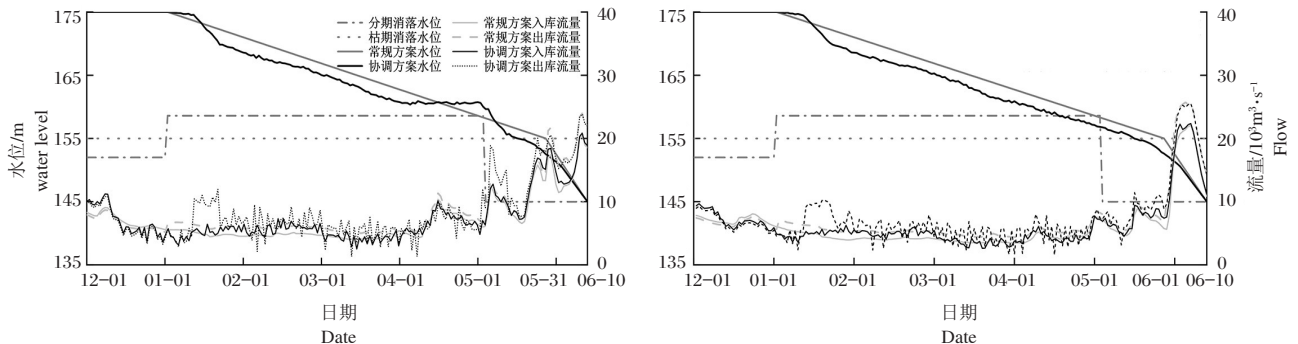
这是由于在分期消落水位控制下梯级水库消落调度的末水位更低,可保障下游供水,充分利用变化环境下的水资源。

**表5 各典型年协调调度与常规调度综合效益对比分析**  
**Tab.5 Comparative analysis of the comprehensive benefits between coordinated operation scheme and conventional operation scheme for different typical years**

评价指标		丰水年 (2002年)	平水年 (1971年)	枯水年 (1991年)	特枯水年 (1966年)
生态流量 保证率/%	协调调度	97.4	91.1	85.9	75.5
	常规调度	94.8	83.8	75.5	52.6
发电量 /亿kW·h	协调调度	1340.95 (+2.3%)	1229.92 (+4.0%)	1176.05 (+4.5%)	1096.12 (+5.0%)
	常规调度	1310.75	1182.32	1125.38	1043.85
供水量 /亿m <sup>3</sup>	协调调度	1562.52 (+5.8%)	1418.37 (+6.2%)	1347.51 (+6.7%)	1262.70 (+7.4%)
	常规调度	1477.19	1335.22	1262.70	1175.57

整体来看,多目标优化调度模型求解得到的协调调度方案与常规调度方案相比,均可显著提升梯级水库的发电、生态和供水效益。

**3.2.3 调度实例** 通过上述对协调方案和常规调度方案的效益对比分析,可知协调方案可同时实现生态和发电2个目标的优化。由于丰、平、枯水年下调



**图3 平水年和特枯水年三峡水库各方案调度过程对比**

**Fig.3 Comparison of the operating process of Three Gorges Reservoir under different schemes in a normal year and an extraordinarily dry year**

度过程较为相似,限于篇幅,本文仅选择平水年(1971年)和特枯水年(1966年)对常规调度方案和选定协调方案下的三峡水库调度过程进行展示(如图3所示)。通过分析金沙江中下游6座水库与三峡水库各方案调度后水位-流量过程可以得出以下结论:

(1)由平水年(1971年)情景下梯级水库调度过程可以发现:1)在前枯水期,金沙江中下游部分水库提前消落可以增大三峡水库入库流量,结合图3可以

发现,三峡水库维持高水位运行,但依旧可以增加宜昌站流量,避免下游缺水而破坏河道生态;2)在主枯水期,金沙江中下游梯级水库水位消落幅度较缓,三峡水库入库流量减少,因此加大三峡水库出力,提高宜昌站流量过程,可以进一步提高生态流量保证率;3)枯水期末,上游6座水库协调调度方案的极限消落水位比常规调度方案更低,可提升梯级水库群供水量与发电量,同时,也可为提前进入汛期消落至汛限

水位做好准备;4)在 7 座水库中,三峡水库的装机容量最大,上游梯级水库牺牲发电水头,抬高三峡发电水头,在不同典型年下均可提升发电量。

(2)在特枯水年(1966 年)情景下梯级水库调度过程可以发现:1)在前枯水期和后枯水期,与平水年情景下结论相同;2)分期消落水位是通过综合考虑水库严重干旱年( $P=95\%$ )入库径流过程与不同用户需求特性,经用水分析计算得到的,由于 1966 年属于特枯水年,协调调度方案启用了乌东德水库和三峡水库枯水期分期消落水位以下的应急库容,打破了消落水位的约束,以缓解下游生态流量需求,提高生态流量保证率。

综上所述,梯级水库采用上游水库先放水、特枯水年下游水库启用分期消落水位以下应急库容、各水库后枯水期消落水位降低的运行规律,可以充分发挥梯级电站运行的水头、水量和生态效益,最大程度地开发梯级电站的发电能力,提升梯级电站的总发电量 and 供水量,提升河道生态流量保证率,缓解下游干旱。

## 4 结论

本研究以金沙江中下游 6 座水库与三峡水库为研究对象,开展了考虑生态流量约束的梯级水库分期消落水位多目标优化调度研究,得到以下主要结论:

(1)运用 3 种数理统计方法对金沙江中下游梯级和三峡水库枯水期(12 月 1 日-次年 6 月 10 日)进行划分,确定了梯级水库群前枯水期为 12 月,主枯水期为次年 1-4 月,后枯水期为 5 月 1 日-6 月 10 日;根据枯水期分期结果,利用逐月滑动计算法确定了梯级水库各分期内的消落水位。

(2)多目标优化调度研究结果表明:梯级水库生态与发电目标呈竞争关系。在丰、平、枯、特枯水年来水情景下,与常规调度方案相比,选定的协调调度方案可增加发电量 30.20 亿~52.27 亿 kW·h,增大供水量 83.15 亿~87.14 亿  $m^3$ ,并提高河道生态流量保证率 2.6%~22.9%。

未来将开展以混联水库为研究对象的水库群分期消落水位多目标优化调度研究,解析混联水库和梯级水库在枯水期消落调度运行方式的异同。

## 参考文献

丁胜祥,张俊,牛文静,等,2023. 应对 2022 年枯水的长江上

- 游水库群联合调度方案[J]. 人民长江, 54(2):1-6.
- 郭崇炎,2022. 浅析三峡水库综合管理工作[J]. 长江技术经济, 6(5): 46-50,39.
- 李建龙,2022. 黄河中下游梯级水库多目标优化调度研究[D]. 郑州:郑州大学.
- 刘攀,李立平,吴荣飞,2012. 论水库旱限水位分期控制的必要性与计算方法探讨[J]. 水资源研究, 5:52-56.
- 罗成鑫,丁伟,张弛,等,2022. 水库分级分期旱限水位设计与控制研究[J]. 水利学报, 53(3):348-357.
- 马永胜,2022. 面向水生态的多目标水库工程规模论证[J]. 人民长江, 53(9):1-7,24.
- 全国气候与气候变化标准化技术委员会,2017. 气象干旱等级:GB/T 20481-2017[S]. 北京:中国标准出版社.
- 任玉峰,赵良水,曹辉,等,2020. 金沙江下游梯级水库生态调度影响研究[J]. 三峡生态环境监测, 5 (1): 8-13.
- 王声扬,周研来,朱迪,等,2022. 洞庭湖流域水系汛期分期研究[J]. 水资源研究, 11(4): 366-379.
- 张霞,武鹏林,祝雪萍,2019. 综合分期方法在陈家湾水库汛期分期中的应用[J]. 人民黄河, 41(2):54-58,63.
- 张松,王新,王超,等,2021. 考虑多维生态效益的梯级水库群消落期优化调度研究[J]. 水利水电技术(中英文), 52(11): 186-194.
- 郑静,张虎,2023. 2022 年长江流域水库群抗旱补水调度实践与思考[J]. 人民长江, 54(2): 7-11,42.
- 中华人民共和国水利部,2020-04-20. 水利部关于印发第一批重点河湖生态流量保障目标的函[A/OL]. [2013-10-25]. [http://szy.mwr.gov.cn/tzgg/202004/t20200424\\_1401331.html](http://szy.mwr.gov.cn/tzgg/202004/t20200424_1401331.html).
- 中华人民共和国水利部,2021. 河湖生态环境需水计算规范:SL/T 712-2021[S]. 北京:中国水利水电出版社.
- 周颖,周研来,郭生练,等,2023. 水库群消落期多目标智能优化调度研究[J]. 水力发电学报, 42(9):70-78.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al, 2022. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2): 182-197.
- Hu Y C, Chiang S, Chiu Y J, 2022. Applying Grey Relational Analysis to Detect Change Points in Time Series[J]. Journal of Mathematics, 10(6):1132.
- Jiang H, Wang Z, Ye A, et al, 2019. Hydrological characteristic-based methodology for dividing flood seasons: an empirical analysis from China[J]. Environmental Earth Sciences, 78(16): 503.

(责任编辑 郑金秀)

## Optimizing the Multi-objective Operation of Seasonally Drawdown-limited Water Levels for Cascaded Reservoirs Constrained by Ecological Flow

LIN Fan-qi, ZHOU Yan-lai, XUE Kai-yuan

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management,  
Wuhan University, Wuhan 430072, P.R. China)

**Abstract:** More effectively optimizing the multi-objective operation of seasonally drawdown-limited water levels (DLWLs) for cascaded reservoirs would increase power generation while increasing the stability and sustainability of the aquatic ecosystem. In this study, six reservoirs in the middle and lower reaches of Jinsha River and Three Gorges Reservoir were selected for research, and we developed a model for optimizing the multi-objective operation of seasonal DLWLs in the cascaded reservoirs that includes the constraint of ecological flow. Optimal operation schemes for cascaded reservoirs were developed under four hydrologic scenarios. Our aims were to provide guidance for the drawdown of cascaded reservoirs during the dry season that meets the water requirements for power generation, ecosystem conservation and water supply, and to provide technical support for the sustainable use of water resources. The dry season considered was from December 1 to June 10, determined by comprehensive consideration of precipitation, runoff from the river basin and operating rules. The drought season was then divided into three phases using several statistical analysis methods. Next, the seasonal DLWLs of the cascaded reservoirs were identified using a month-by-month moving calculation. Finally, optimal schemes for the cascaded reservoirs under the four hydrological scenarios were obtained by taking the maximum ecological and power generation benefits as objective functions and posing the drawdown model using the nondominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II). Compared with the current operation scheme, the optimized scheme significantly increases power generation under the four hydrologic scenarios by 3 020 – 5 227 million kW·h (2.3%–5.0%) and water supply by 8 315 – 8 714 million m<sup>3</sup> (5.8%–7.4%), and improves the ecological flow rate by 2.6%–30.2%. This research provides technical support for synergizing the ecology and power generation of cascaded reservoirs.

**Key words:** ecological operation; drawdown; seasonally drawdown-limited water level; multi-objective optimization; cascaded reservoirs