2024年

DOI: 10.15928/j.1674-3075.202310240294

1月

梯级水库中长期仿天然水文情势的生态流量多目标调度

崔福宁1,朱 迪2,卜 慧2,郭 卫2,汪 琳2

(1.云南华电金沙江中游水电开发有限公司,云南昆明 650000;2.长江水利委员会水文局,湖北武汉 430010)

摘要:针对现有研究较少从水文情势角度开展梯级水库中长期生态流量调度的现状,基于场景缩减(SBR)技术推求的仿天然水文情势生态流量过程,以梯级水库下泄流量与生态流量的动态时间规整(DTW)距离最小为生态目标,以梯级水库发电量最大为发电目标,构建梯级水库多目标生态流量调度模型,并采用"参数模拟-优化"思路求解,选择金沙江中游梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉和观音岩6座梯级水库,对1953-2015年的旬径流资料开展分析研究,为梯级水库中长期生态流量调度提供参考。结果表明,推求的仿天然水文情势生态流量具有明显的季节性波动和上下游断面量级差异特征;相较梯级水库原调度方案,优化调度方案可通过径流调节,改善梯级水库中长期生态和发电效益,在不影响生态目标的状态下,可增加511亿kW·h的发电量,相应增幅为1.35%;在不影响发电目标的情况下,可减少134 253的DTW距离,相应降幅为3.85%。

关键词:生态流量调度;动态时间规整;场景缩减;梯级水库;金沙江中游

中图分类号:TV697 文献标志码:A 文章编号:1674-3075(2024)01-0001-09

随着水库的建成与投运,现阶段我国各大流域 基本形成了梯级水库的开发格局(周研来等,2015)。 梯级水库通过径流调节,一方面可以有效缓解水资 源需求压力,保障水资源安全,另一方面对河流天然 情势造成影响,对下游河流生态系统造成一定的胁 迫(胡和平等,2008;龙凡和梅亚东,2017)。因此,加 强流域梯级水库生态调度与管理,对协调流域水生 态保护与水资源开发具有重要意义。

近年来,国内外学者围绕梯级水库生态流量计 算和调度开展了相关研究工作。在生态流量计算方 面,截至目前共计有200多种计算方法,可大致分为 水文学法、水力学法、生境模拟法和整体分析法共 4类(费启航等,2023)。不同生态流量计算方法所需 的资料、适用范围和特点不尽相同,其中以流量历时 曲线法和Tennant法为代表的水文学方法应用最为 广泛(Tennant,1976;Tharme,2003)。在生态流量调度 研究方面,大体可分为2类(Zhu et al, 2023)。第一类

收稿日期:2023-10-24

通信作者:朱迪,1995年生,男,博士,工程师,主要从事水库调度研究。E-mail: zhud@cjh.com.cn

是将生态流量作为约束,陈立华等(2016)考虑生态 基流和洪水脉冲等方面,设置4种生态流量约束方 案,探究了龙滩-岩滩梯级水库生态调度对发电的影 响:龙凡和梅亚东(2017)分别采用年内展布法和改 进FDC法计算了溪洛渡-向家坝梯级最小生态流量 和适宜生态流量约束,分析了不同生态流量约束方 案下梯级水库发电量和下泄流量特征:徐淑琴等 (2017)以最小生态流量约束作为基础,设置了6种生 态流量约束条件,分析了生态保证度与发电量损失 之间的相关关系:Sichilalu等(2019)构建了考虑生态 流量约束的风-水联合调度模型,分析了不同运行工 况下生态流量约束对水力发电的影响。第二类是将 生态流量作为优化目标,董国强等(2020)构建了洪 泽湖水量调控模型,从生态水位保证率、生态水位偏 离差、减供水量和增调水量共4个角度分析评价了洪 泽湖生态需水调控方案; Yan 等(2021)基于 IHA 指 标,构建了考虑水量型和波动型的多目标生态调度 模型,分析并提炼了兼顾生态和水库发电目标的调 度策略;Ai等(2022)以生态流量保证率最大和区域 供水缺水率最小为优化目标,构建了生态-供水多目 标调度模型,优化了水库运行调度图,改善了水库生 态和供水效益;王贝等(2023)构建山区性中小流域 生态多目标调度模型,采用NSGA-Ⅱ算法求解,探究 了山区中小流域生态流量保障与水资源利用之间的 相关关系。

基金项目:水利部重大科技项目(SKS-2022038);国家重点研发 计划(2021YFC3200304)。

作者简介:崔福宁,1991年生,男,工程师,主要从事梯级水库预报 调度技术及电力市场相关研究。E-mail: 553841999@qq.com

现有研究成果为梯级水库生态流量计算和调度 提供了多种思路,但较少从水文情势方面开展生态 流量的调度研究。Poff等(1997)认为天然水文情势 下的河流生物多样性和生态结构最好,但天然流量 资料的时间跨度大、数据繁杂, 且具有相似性, 如何 提取接近天然水文情势的流量过程,并指导水库开展 生态流量调度十分重要。本文基于场景缩减技术,提 出了仿天然水文情势的生态流量推求方法,并以水库 下泄流量与仿天然水文情势的生态流量动态时间规 整距离最小、梯级水库发电量最大作为优化目标,构 建梯级水库多目标生态流量调度模型,采用"参数模 拟-优化"思路进行求解:以金沙江中游梨园、阿海、金 安桥、龙开口、鲁地拉和观音岩梯级水库为研究对象, 基于经还原计算后的历史长系列旬径流资料,开展多 目标水库生态流量调度研究,为优化面向长系列径流 的梯级水库中长期调度方案提供参考。

1 材料与方法

1.1 区域概况

金沙江流域(90°23′~104°37′E,24°28′~35°46′N) 位于长江上游,横跨我国青海、西藏、四川、云南、贵州 5省区;河流全长约3500km,流域面积45.5万km²。 其中,直门达至石鼓为金沙江上游,石鼓至攀枝花为 金沙江中游,攀枝花至宜宾为金沙江下游,本文研究 区域主要集中于金沙江中游。

金沙江中游区间流域面积4.5万km²,河段长约 563.6km,落差约836.0m,现建有梨园、阿海、金安桥、 龙开口、鲁地拉以及观音岩共6座大型梯级水库,其系 统概化如图1所示。根据《2023年长江流域水工程联 合调度运用计划》(水利部长江水利委员会,2023),各水 库的工程特性值统计见表1。金沙江中游梯级水库的 投运在防洪、发电、供水等方面发挥了重要作用,对我 国进一步优化能源结构,发展低碳经济具有重要意义。



图1 金沙江中游梯级水库示意

Fig.1 Schematic diagram of the cascaded reservoirs in the middle reaches of the Jinsha River

表1 金沙江中游梯级水库工程特性值

Tab.1	Engineering	characteristics of	of the cascaded	l reservoirs ii	n the middle	reaches of the	Jinsha River
I GOIL	Linginicering	cilulucteriotico c	or the cubculace	i reber vonto m	in the minuale	reactives or the	Junona mure

水库	控制流域面积/万km ²	死水位/m	汛限水位/m	正常蓄水位/m	最小下泄流量/m ³ ·s ⁻¹	调节库容/亿m ³	总库容/亿m ³	装机容量/MW
梨园	22.00	1605	1605.0	1618	300	1.73	8.05	2400
阿海	23.54	1492	1493.3	1504	350	2.38	8.85	2000
金安桥	23.74	1398	1410.0	1418	350	3.46	9.13	2400
龙开口	24.00	1290	1289.0	1298	380	1.13	5.58	1800
鲁地拉	24.73	1216	1212.0	1223	400	3.76	17.18	2160
观音岩	25.65	1122	1122.3/1128.8	1134	439	5.55	22.50	3000

1.2 基于场景缩减技术的仿天然水文情势生态流量

采用场景缩减技术,通过对原始水文时间序列 进行缩减,构建仿天然水文情势的生态流量过程。 常见的场景缩减技术包括同步回代缩减(Simultaneous Backward Reduction,SBR)和快速前代缩减(Fast Forward Reduction,FFR)2种方法,已被广泛应用于风 电资源规划、水风光协同调度等领域(Li et al,2016; 李伟楠等,2019)。本文结合 SBR 技术(张步涵等, 2013),提出基于 SBR 的仿天然水文情势生态流量推 求方法,具体流程如下:

(1)初始条件设置。记天然径流初始场景样本X= [$X_1, X_2, \dots, X_s, \dots, X_s$],第s个场景 X_s = [$x(1)^s, x(2)^s, \dots, x(t)^s, \dots, x(T)^s$],采样时间节点为 $t(t = 1, 2, \dots, T)$,对应的初始概率 为 $P = [p_1, p_2, \dots, p_s]$,记删除的场景数目和场景集分别为 L和J,则最终保留的场景为(X-J),设缩减次数k=1。

(2)计算第k次场景缩减的概率距离,具体如下:

$$\begin{aligned} d_{i,j}^{(k)} &= \min_{X_j \notin J^{(k-1)} \cup (X_i^k)} d(X_i, X_j) \\ d_{i,j}^{(k)} &= p_i^{(k)} \times d_{i,j}^{(k)} \end{aligned}$$

式中: $p_i^{(k)}$ 为第k次被缩减场景 X_i 对应的概率, $D_{i,j}^{(k)}$ 为第k次被缩减场景 X_i 和初始场景 X_j 的概率距离; $d_{i,j}^{(k)}$ 为第k次被缩减场景 X_i 和初始场景 X_j 的Kantorovich距离,按下式计算:

$$d(X_i, X_j) = \sum_{t=1}^{T} |x(t)^i - x(t)^j|$$
(2)

(3)场景缩减。将最小*D_{i,j}^{(k}*对应的场景*X_i^(k)*从保 留场景集合[*X*−*J*^(k-1)]中删除,并入*J*^(k-1),则*J*^(k) = *J*^(k-1)U ${X_i^{(k)}}$,并将 $X_i^{(k)}$ 对应概率与 $[X-J^{(k-1)}]$ 中距离最近的场景对应概率 $p_i^{(k-1)}$ 进行叠加,具体计算如下,

$$p_i^k = p_i^{(k-1)} + p_i^{(k-1)} \tag{3}$$

(4)k = k + 1, 重复步骤②、③, 获得(S-L)个流 量场景 $X^* = [X_1^*, X_2^*, \dots, X_s^*, \dots, X_{(S-L)}^*]$ 及其对应的概 率 $P^* = [p_1^*, p_2^*, \dots, p_{(S-L)}^*]$ 。

(5)通过概率加权,计算仿天然水文情势生态流 量,具体如下:

$$Q_{\rm eco}(t) = \sum_{s=1}^{s=(S-L)} x(t)^{S^*} \times p_s^*$$
(4)

式中: Q_{eco}(t)为下游生态控制断面第 t 时段的仿 天然水文情势生态流量。

1.3 梯级水库多目标生态流量调度模型

1.3.1 动态时间规整算法 动态时间规整算法(Dynamic Time Warping, DTW)是由 Berndt & Clifford (1994)提出的一种用于分析时间序列相似度的方 法;该方法与传统的欧氏距离相比,不要求对比的时 间序列严格对齐,可错位匹配。其基本思想是将时 间序列某时刻的点与另一时间序列的多个连续时刻 点对应,通过动态规划算法找到最短距离路径,即规 整路径距离作为2个时间序列相似性度量结果(沈柯 言,2022)。其示意如图2所示。



图2 初志时间观壁

Fig.2 Diagram of the dynamic time warping (DTW)

求解思路如下:

(1)对于给定的2个时间序列,A = [a₁, a₂,…, a_i,
…, a_m]和B = [b₁, b₂,…, b_j,…, b_n],计算序列中2点之
间的距离矩阵:

$$W(i,j) = \begin{vmatrix} a_i - b_j \end{vmatrix} \tag{5}$$

(2)计算距离矩阵从 W(1,1)到 W(m, n)的最短距离,具体如下:

$$\theta(i,j) = W(i,j) + \min[\theta(i-1,j), \theta(i,j-1), \theta(i-1,j-1)] \quad \textcircled{6}$$

式中: $\theta(i, j)$ 为到点(i, j)处的累计最小距离,可采 用动态规划算法进行递推计算。计算时,该最小距 离路径需满足单调性、连续性和边界性等约束条件 (沈柯言,2022)。

1.3.2 目标函数 本文基于 SBR 技术提取的仿天然 径流模式作为生态流量,分别以梯级水库下泄流量 与其 DTW 距离最小为生态目标,以梯级水库发电量 最大为发电目标,具体表达式如下:

(1)生态目标:

$$f_{1} = \min \sum_{y=1}^{Y} \sum_{i=1}^{I} \theta_{i,y}(r,s)$$
 7

式中:I和Y分别为水库个数和调度计算年数; $\theta_{i,y}(r,s)$ 为第i个水库第y年下泄流量与生态流量之间的DTW距离,按下式计算,

$$\begin{cases} \theta_{i,y}(r,s) = W_{i,y}(r,s) + \min \theta_{i,y}(r-1,s), \\ \theta_{i,y}(r,s-1), \theta_{i,y}(r-1,s-1) \\ W_{i,y}(r,s) = \left| Q_{i,y}^{\text{out}}(r) - Q_{i,y}^{\text{eco}}(s) \right| \end{cases}$$
(8)

式中: $Q_{iy}^{\text{ent}}(r)$ 和 $Q_{iy}^{\text{eco}}(s)$ 分别为第i水库第y年第 r时段下泄流量和第s时段生态流量。

(2)发电目标:

$$\begin{cases} f_2 = \max \sum_{y=1}^{Y} \sum_{i=1}^{I} \sum_{t=1}^{T} N_{i,y}(t) \Delta t \\ N_{i,y}(t) = k_i Q_{i,y}^{fd}(t) h_{i,y}(t) \end{cases}$$

式中:N_{i,y}(t)为第 i 水 库 第 y 年 第 t 时 段 出 力;Δt 为计 算 时 段 长;T 为计 算 总 时 段 数; k_i为第 i 水 库 出 力 系 数;Q_{i,y}^{fd}(t)为第 i 水 库 第 y 年 第 t 时 段 发 电 流 量; h_{i,y}(t)为第 i 水 库 第 y 年 第 t 时 段水头。

1.3.3 约束条件 为满足梯级水库调度运行,本文需 要考虑以下约束条件。

(1)水库水量平衡约束:

$$\left[Q_{i,y}^{\text{in}}(t) - Q_{i,y}^{\text{out}}(t) - L_{i,y}(t)\right] \Delta t = V_{i,y}(t+1) - V_{i,y}(t) \quad \textcircled{0}$$

式中: $Q_{iy}^{in}(t)$ 为第i水库第y年第t时段入库流量; $L_{iy}(t)$ 为第i水库第y年第t时段蒸发、渗漏等水量损失; $V_{iy}(t)$ 为第i水库第y年第t时段库容。 (2)水位限制约束:

$$Z_{i,y}^{\min}(t) \leq Z_{i,y}(t) \leq Z_{i,y}^{\max}(t)$$

式中: $Z_{i,y}(t)$ 为第i水库第y年第t时段的水位; $Z_{i,y}^{\min}(t)$ 和 $Z_{i,y}^{\max}(t)$ 分别为第i水库第y年第t时段的水 位下限和上限。

(3)水库出力限制约束:

$$N_{i,y}^{\min}(t) \le N_{i,y}(t) \le N_{i,y}^{\max}(t)$$
⁽¹²⁾

式中: $N_{i,y}^{\min}(t)$ 和 $N_{i,y}^{\max}(t)$ 分别为第i水库第y年第t时段出力的下限和上限。

(4)水库下泄流量限制约束:

$$Q_{i,y}^{\min}(t) \leq Q_{i,y}^{out}(t) \leq Q_{i,y}^{\max}(t)$$
(3)

式中: $Q_{i,y}^{\min}(t)$ 和 $Q_{i,y}^{\max}(t)$ 分别为第i水库第y年第t时段下泄流量的下限和上限。

(5)水库水位边界约束:

$$Z_{i,y}(1) = Z_{i,y}^{\text{start}}; Z_{i,y}(T+1) = Z_{i,y}^{\text{end}}$$

式中:Z^{start}和Z^{end}分别为第*i*水库第y年的起调水 位和期末水位。

(6)水力联系约束:

$$Q_{i+1,y}^{in}(t) = Q_{i,y}^{out}(t) + \Delta q_{i+1,y}(t)$$
(15)

式中: $\Delta q_{i+1,y}(t)$ 为第(*i*+1)水库第*y*年第*t*时段区间入流。

(7)非负约束:所有变量均为非负值。

1.4 求解方法

对于梯级水库多目标调度模型,一般以其逐时 段出库流量或水位作为决策变量,采用多目标优化 算法进行求解。然而,对于长系列调度,随着调度时 段数和梯级水库数量的增加,决策变量个数也随之 显著增长,例如:对于Y年逐旬径流资料,假定梯级水 库的数目为M个,则共计有(36×Y×M)个决策变量,求 解规模显著增大。针对长系列径流,本文采用"参数 模拟-优化"思路,通过结合梯级水库中长期常规调 度规则和多目标优化算法,以更好地实现模型求解。

所谓"参数模拟-优化",即将水库中长期常规调 度图参数化,通过优化算法进行寻优,以改善水库中 长期调度(图3)。水库中长期调度依据时段t₁~t₄划分 为兴利调度期(t₁前和t₄后)、汛前消落期(t₁~t₂)、汛期 防洪调度期(t₂~t₃)和汛后蓄水期(t₃~t₄)。基于"参数 模拟-优化"思路,可将水库中长期常规调度图中的各 时段水位参数化,作为决策变量,通过模拟计算优化 目标的适应度值。在多目标优化算法方面,本文参考 Deb等(2002)提出的NSGA-II算法进行求解;该算法 求解高效、迅速,被广泛应用于水库多目标调度领域。 设置NSGA-II算法相关参数为:最大迭代次数K =500,交叉概率 $p_1 = 0.8$,变异概率 $p_1 = 0.2$,种群规模 NP = 400,计算流程参考朱迪等(2023)。



图3 水库中长期常规调度示意

Fig.3 Schematic diagram of medium and long-term operation of the reservoir

2 结果与分析

本文以金沙江中游梨园-观音岩6座梯级水库为 研究对象,选择1953-2015年实测的旬径流资料,并 结合梯级水库运行数据对径流进行还原计算,从而 得到水库断面天然长系列旬流量过程。根据《2023 年长江流域水工程联合调度运用计划》(水利部长江 水利委员会,2023),设置梯级水库各旬不同时期水库 水位上下限;其中,汛期水库水位按不超过汛限水位 控制,非汛期水库水位按不超过正常蓄水位控制。

2.1 仿天然水文情势生态流量计算

采用基于 SBR 的仿天然水文情势生态流量推求 方法,本文提取了梨园-观音岩梯级水库各下游断面 的仿天然水文情势生态流量过程。以梨园水库为 例,其历史旬径流场景缩减结果如图4所示,各水库 仿天然水文情势生态流量过程如图5所示。统计天 然长系列径流的多年平均流量、年最大和最小旬流 量均值以及多年径流标准差均值,并与本文所推求 的生态流量过程进行对比,结果如表2所示。

由图4可见,梨园水库天然长系列旬径流过程可被 缩减为3个场景。其中,场景二的概率最小,为19.0%, 流量峰值集中于6月中旬到8月中旬;场景三的概率最 大,为50.8%,流量峰值偏后,集中于7月下旬到9月中下 旬;场景一的概率为30.2%,在8月上旬和9月中旬出现 2个峰值,但流量过程整体偏小,低于场景二和场景三。

从图5可知,本文推求的仿天然水文情势生态流 量过程具有较为明显的季节性变化特征和空间变化 流量/m³·s⁻¹

5000

4000

,P





图5 梯级水库仿天然水文情势的生态流量过程

Fig.5 Ecological flow progress simulating the natural hydrological regime of the cascaded reservoirs

衣着 切大怂吓又值穷生忿流重过任马大怂衣杀列侄流的行征	表2	*水文情势生态流量过程与天然长系列径流的特征;	对比
-----------------------------	----	-------------------------	----

 Tab.2
 Comparison of the ecological flow progress simulating the natural hydrological regime

and natural long-series runoff

业庄		天然长系列	生态流量过程/m ³ ·s ⁻¹					
小伴	多年平均流量	年最大旬流量均值	年最小旬流量均值	标准差	流量均值	年最大旬流量	年最小旬流量	标准差
梨园	1404	4348	410	1143	1310	3285	403	947
阿海	1592	5007	468	1310	1508	3652	459	1120
金安桥	1615	5092	475	1331	1646	4502	497	1257
龙开口	1647	5206	485	1360	1701	4552	510	1298
鲁地拉	1730	5501	506	1437	1757	4565	519	1330
观音岩	1804	5780	519	1508	1870	4983	554	1460

特点。从季节性变化上看,生态流量径流主要集中于 汛期(6月下旬至11月上旬),且在6月中旬至7月上旬 存在连续涨水过程,与近年来开展的金沙江中游试验 性生态调度相接近(熊明和郭卫,2023)。从空间变化 特点上看,上游梨园水库与下游观音岩水库非汛期的 生态流量相差102~330 m³/s,差异较小;而汛期2座水 库的生态流量相差503~2095 m³/s,差别较大。

从表2可知,本文推求的仿天然水文情势生态流量过程的流量均值、年最小旬流量和标准差与天然长系列的相应特征值较为接近,偏差在7~196 m³/s;

而天然长系列径流的年最大旬流量均值与本文推求 的生态流量过程的年最大旬流量有一定偏差,最大 流量偏差为1356 m³/s。总体而言,本文推求的仿天 然水文情势生态流量过程与天然长系列径流的特征 较为接近,一定程度上反映了天然径流的水文情势 特点。

2.2 多目标优化调度计算

本文构建的基于DTW的梯级水库多目标生态 流量调度模型,采用"参数模拟-优化"思路,通过将 金沙江中游梯级水库原中长期调度方案(汛期按汛 限水位控制,非汛期按正常蓄水位控制,如图3所示) 的各旬时段水位参数化,结合NSGA-II算法进行求 解,并与梯级水库原方案调度的计算结果进行对比, 结果如图6所示,并选择帕累托解集中4种调度方案 与原方案进行对比,结果如表3所示。





从图6可知,DTW距离和梯级水库发电量之间 呈现竞争关系,随着DTW距离的减少,梯级水库发 电量也随之减少,表明生态目标效益的改善会减少 梯级水库发电目标效益。对比图6中原方案调度结 果与帕累托解集的位置关系,可以筛选出方案A、B、 C、D共4种调度方案。其中,方案A和D位于帕累托 前沿的端点,分别表示发电量最大和DTW距离最小 的方案,方案B表示DTW距离与原方案接近的帕累 托解集方案,方案C表示发电量与原方案接近的帕累

表3 帕累托解集部分方案和原方案调度解对比 Tab.3 Comparison of four operation schemes of the Pareto-front and the original operation scheme

方案DTW 距离发电量 /亿 kW·hDTW 距离 变幅/%发电量 变幅/%原方案3 485 68337 889A方案3 792 26639 1178.803.24B方案3 486 28938 4000.021.35C方案3 351 43037 886-3.85-0.01D方案3 318 17737 720-4.81-0.45					
原方案 3 485 683 37 889 - - A方案 3 792 266 39 117 8.80 3.24 B方案 3 486 289 38 400 0.02 1.35 C方案 3 351 430 37 886 -3.85 -0.01 D方案 3 318 177 37 720 -4.81 -0.45	方案	DTW 距离	发电量 /亿kW·h	DTW距离 变幅/%	发电量 变幅/%
A方案3 792 26639 1178.803.24B方案3 486 28938 4000.021.35C方案3 351 43037 886-3.85-0.01D方案3 318 17737 720-4.81-0.45	原方案	3 485 683	37 889	-	-
B方案 3 486 289 38 400 0.02 1.35 C方案 3 351 430 37 886 -3.85 -0.01 D方案 3 318 177 37 720 -4.81 -0.45	A方案	3 792 266	39 117	8.80	3.24
C方案 3 351 430 37 886 -3.85 -0.01 D方案 3 318 177 37 720 -4.81 -0.45	B方案	3 486 289	38 400	0.02	1.35
D方案 3 318 177 37 720 -4.81 -0.45	C方案	3 351 430	37 886	-3.85	-0.01
	D方案	3 318 177	37 720	-4.81	-0.45

由表3可见,相较原方案,方案A是倾向发电 目标效益的调度方案,多年合计可增加梯级水库 1228亿kW·h发电量(增幅为3.24%),但也会增加梯 级水库出库流量与仿天然水文情势生态流量过程的 DTW距离(增幅为8.80%),影响生态目标效益;方案 D是倾向生态目标效益的调度方案,多年合计可减少 梯级水库出库流量与仿天然水文情势生态流量过程 167 506的DTW距离(降幅为4.81%),使得梯级水库 出库流量更加贴近仿天然水文情势的生态流量过 程,但也减少了0.45%的梯级水库发电量,影响了发 电目标效益;方案B和C是与原方案形成支配关系的 调度方案,其中方案B在保障梯级水库生态目标效益 与原方案接近的情况下,多年合计增加梯级水库发 电量511亿kW·h(增幅为1.35%),而方案C在保证梯 级水库多年合计发电量与原方案相当的情况下,合 计可减少梯级水库出库流量与仿天然水文情势生态 流量过程134 253的DTW距离(降幅为3.85%),增加 了梯级水库出库流量与仿天然水文情势的生态流量 过程贴近度,有利于生态效益目标。

总体而言,相较梯级水库原中长期调度方案,本 文求解的帕累托前沿解集可协同优化生态和发电效 益,尤其是方案B和C,相较原方案,在不降低其中一 个优化目标效益下,可改善另一个优化目标,并为梯 级水库生态和发电协同调度提供了参考依据。

2.3 典型调度过程

本文分别选择典型方案A、B、C、D及其对应的 金中梯级调度过程进行对比分析,结果如图7所示。

由图7可见,对于相同的调度时期,方案B和C 的水库水位居于方案A和D之间,在防洪调度时期 (7月),各水库调度期内水位控制在汛限水位,以保 障防洪安全;在非防洪调度时期,方案A~D的水库水 位呈波动变化。对于阿海、鲁地拉和观音岩水库(图 7-b,e,f),方案A、B、C的水库水位在1-4月呈上下波 动,并在8月中下旬(观音岩水库为10月上旬)后维 持在正常蓄水位,方案D的水库水位在1-4月和10-12月维持在正常蓄水位运行;对于梨园和金安桥水 库(图7-a,c),方案A~D的水库水位在6月前呈上下 波动,且方案A的波幅最大;对于龙开口水库(图7-d), 在1-6月,方案D的水库水位先降后升,但水位整体 低于方案A~C,且4种调度方案的水库水位均在9月 下旬回到正常蓄水位。

3 结论

针对 1953-2015年经还原计算后的长系列旬径 流资料,通过SBR技术推求了6座梯级水库仿天然水 文情势的生态流量过程,以梯级水库下泄流量与仿 天然水文情势的生态流量DTW距离最小和发电量 最大作为优化目标,构建了梯级水库多目标生态流 量调度模型,并基于"参数模拟-优化"思路,开展了 梯级水库中长期多目标生态流量调度研究,优化了 梯级水库中长期调度规则,结论如下:





Fig.7 Typical operation schemes of the cascaded reservoirs in the middle reaches of the Jinsha River

(1)基于 SBR 技术推求的生态流量过程具有随 季节性波动和上下游断面量级差异变化特征,与天 然径流较为贴近。

(2)通过多目标优化计算得到的帕累托解集相 较中长期调度,可优化生态和发电目标,对于长系列 径流,在不影响生态目标下,可增发511亿kW·h电 量(增幅为1.35%),在不影响发电目标下,可降低 134 253的DTW距离(降幅为3.85%)。

(3)未来需结合河流鱼类产卵、繁殖、迁徙等敏感时期的流量需求,开展梯级水库生态水文协调研究,探究河流水资源开发与水生态保护之间的关系。

参考文献

- 陈立华,叶明,叶江,等,2016. 红水河龙滩-岩滩生态调度发电 影响研究[J]. 水力发电学报, 35(2):45-53.
- 董国强,王振龙,刘猛,等,2020. 基于生态需水优先的洪泽湖水 量调控研究[J]. 水生态学杂志, 41(5):39-48.
- 费启航,彭涛,由星莹,等,2023. 基于四大家鱼栖息地模拟的汉

江下游生态流量研究[J]. 人民长江, 54(10):35-43.

- 胡和平,刘登峰,田富强,等,2008. 基于生态流量过程线的水库 生态调度方法研究[J]. 水科学进展, 19(3):325-332.
- 李伟楠,王现勋,梅亚东,等,2019. 基于趋势场景缩减的水风光 协同运行随机模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学 版),47(8):120-127.
- 龙凡,梅亚东,2017. 金沙江下游溪洛渡-向家坝梯级生态调度 研究[J]. 中国农村水利水电, (3):81-84.
- 沈柯言,2022.考虑径流不确定性的梯级水库中长期优化调 度及评价决策研究[D].武汉:华中科技大学.
- 水利部长江水利委员会,2023年长江流域水工程联合调度运 用计划[R]. 武汉:水利部长江水利委员会.
- 王贝,朱迪,何锡君,等,2023. 基于 NSGA-Ⅱ 算法的山区性中 小流域水库群多目标生态调度研究[J]. 中国农村水利水 电, (7):48-54.
- 熊明,郭卫,2023. 面向产漂流性卵鱼类繁殖的水电站生态水 文过程调控[J]. 长江科学院院报,40(10):1-5.
- 徐淑琴,苏鑫,邢贞相,等,2017. 非充分生态约束条件下水库生态调度模型研究[J]. 农业机械学报,48(4):190-197.

- 张步涵,邵剑,吴小珊,等,2013. 基于场景树和机会约束规划的 含风电场电力系统机组组合[J]. 电力系统保护与控制, 41(1):127-135.
- 周研来,郭生练,陈进,2015. 溪洛渡-向家坝-三峡梯级水库联 合蓄水方案与多目标决策研究[J]. 水利学报,46(10): 1135-1144.
- 朱迪,周研来,陈华,等,2023. 考虑分级防洪目标的梯级水库汛 控水位调度模型及应用[J]. 水利学报,54(4):414-425.
- Ai Y, Ma Z, Xie X, et al, 2022. Optimization of ecological reservoir operation rules for a northern river in China: Balancing ecological and socio–economic water use[J]. Ecological Indicators, 138:108822.
- Berndt D J, Clifford J, 1994. Using dynamic time warping to find patterns in time series[C]//Proceedings of the 3rd international conference on knowledge discovery and data mining.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al, 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA–II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2):182–197.
- Li J, Lan F, Wei H, 2016. A scenario optimal reduction method for wind power time series[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 31(2):1657–1658.
- Poff N L, Allan J D, Bain M B, 1997. The natural flow regime:

A paradigm for river conservation and restoration[J]. Bio-Science, 47(11):769–784.

- Sichilalu S, Wamalwa F, Akinlabi E T, 2019. Optimal control of wind-hydrokinetic pumpback hydropower plant constrained with ecological water flows[J]. Renewable Energy, 138:54–69.
- Tennant D L, 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1(4):6–10.
- Tharme R E, 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. River Research and Applications, 19(5/6):397–441.
- Yan M, Fang G H, Dai L H, et al, 2021. Optimizing reservoir operation considering downstream ecological demands of water quantity and fluctuation based on IHA parameters [J]. Journal of Hydrology, 600:126647.
- Zhu D, Zhou Y, Guo S, et al, 2023. Exploring a multi-objective optimization operation model of water projects for boosting synergies and water quality improvement in big river systems[J]. Journal of Environmental Management, 345:118673.

(责任编辑 万月华)

Medium and Long-term Multi-Objective Operation of Cascaded Reservoirs to Maintain Ecological Flow and Simulate the Natural Hydrological Regime

CUI Fu-ning¹, ZHU Di², BU Hui², GUO Wei², WANG Lin²

 Yunnan Huadian Jinsha River Middle Reaches Hydropower Development Co., Ltd, Kunming 650000, P. R. China;

2. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, P. R. China)

Abstract: At present, little research has been conducted on the medium and long-term ecological flow operation of cascaded reservoirs from the perspective of the hydrological regime. In this study, six cascaded reservoirs (Liyuan, Ahai, Jinanqiao, Longkaikou, Ludila and Guanyinyan reservoirs) on the middle reaches of Jinsha River were selected for a case study, and we studied medium and Long-term multi-objective ecological flow operation of these cascaded reservoirs. Based on 10-day runoff series for the six reservoirs from 1953 to 2015, we derived an ecological flow mimicking the natural hydrological regime using simultaneous backward reduction (SBR). The multi-objective ecological flow operation model of the cascaded reservoirs was then established with two aims: minimizing the dynamic time warping (DTW) distance of reservoir discharge and maintaining ecological flow and maximizing hydropower generation of the cascaded reservoirs. The "parameter-optimization" method was used to develop the model and optimize ecological flow. Results show that the ecological flow derived by SBR showed seasonal fluctuations and differences between upstream and downstream, similar to the natural hydrological regime. Compared with the original ecological operation of the cascaded reservoirs, the optimal operation scheme improved ecological and hydroelectric benefits through runoff regulation while increasing hydroelectrical generation capacity by 511×10^8 kW · h (1.35%) and reducing DTW distance to 134 253 (3.85%) without influencing the ecological and hydroelectric objectives. This research provides a reference for medium and long term ecological flow operation of cascaded reservoirs.

Key words: ecological flow; dynamic time warping; scenario reduction; cascaded reservoirs; middle reach of the Jinsha River