

不同生态流量需求下雅砻江中下游梯级电站联合优化调度

俞雷, 张陆陈, 骆少泽, 吴修锋, 吴时强

Optimizing the operation of interconnected cascade hydropower plants along the middle and lower stretches of the Yalong River to meet varying ecological flow demands

YU Lei, ZHANG Luchen, LUO Shaoze, WU Xiufeng, WU Shiqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20221029001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河下游复航的生态建设方案探讨

Discussion on ecological construction scheme for navigation recovery in the lower Yellow River

水利水运工程学报. 2021(1): 45 <https://doi.org/10.12170/20200117001>

雅砻江流域水电站水足迹计算及分析

Calculation and analysis of water footprint of hydropower stations in Yalong River Basin

水利水运工程学报. 2020(4): 41 <https://doi.org/10.12170/20190603003>

水库泄水总溶解气体过饱和对鱼类的危害

Effect of total dissolved gas supersaturation on fish in the reservoir between cascade hydropower stations

水利水运工程学报. 2020(6): 32 <https://doi.org/10.12170/20200731002>

黄河上游梯级水库联合调水调沙及合理库容研究

Analysis of joint regulation of water and sediment and reasonable storage of cascade reservoirs of upper Yellow River

水利水运工程学报. 2018(6): 19 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.003>

黄河下游生态型引黄灌区水资源承载力研究

Study on water resources carrying capacity of ecological diversion irrigation district in the lower reaches of the Yellow River

水利水运工程学报. 2020(2): 22 <https://doi.org/10.12170/20200209001>

太浦闸水量水质联合调度对金泽水库水质影响

Impacts of water quantity and quality joint operation for Taipu sluice on water quality in Jinze reservoir

水利水运工程学报. 2017(4): 20 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.004>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20221029001

俞雷, 张陆陈, 骆少泽, 等. 不同生态流量需求下雅砻江中下游梯级电站联合优化调度 [J]. 水利水运工程学报, 2024(1): 68-76. (YU Lei, ZHANG Luchen, LUO Shaoze, et al. Optimizing the operation of interconnected cascade hydropower plants along the middle and lower stretches of the Yalong River to meet varying ecological flow demands[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(1): 68-76. (in Chinese))

不同生态流量需求下雅砻江中下游梯级 电站联合优化调度

俞雷, 张陆陈, 骆少泽, 吴修锋, 吴时强

(南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 为协同雅砻江干流水力发电与河道生态流量需求, 以中下游 7 座电站为研究对象, 进行不同生态流量需求下雅砻江中下游梯级电站联合优化调度。基于改进型可变月径流法, 计算了雅砻江主要生态控制断面最小、适宜及最佳生态流量过程; 构建了以梯级发电量最大化为目标的雅砻江中下游梯级电站联合优化调度模型, 并用遗传算法对其求解。结果表明: (1) 随河道生态流量需求的提高, 梯级电站发电效益和水资源利用效率均下降, 其中锦屏二级电站发电量下降最为显著; (2) 梯级电站保障发电效益正常发挥的同时, 实施联合优化调度, 其下游河道能维持更高层次的生态流量, 一定程度缓解了流域水能开发利用与河道生态保护间的关系。

关键词: 生态调度; 联合优化调度; 梯级电站; 生态流量; 雅砻江中下游

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)01-0068-09

流域水电开发利用与河流生态环境保护间的关系一直受到社会关注。目前, 大多数水电站具有发电、防洪、供水等多种功能, 其主要目的是追求水资源的高效利用和经济效益的最大化^[1]。但电站的调度运行模式如没有充分考虑大坝下游减水河段的生态流量需求, 会对河流生态系统造成不同程度的破坏^[2]。例如, 大坝建设阻断了河流, 引起水文条件和生物栖息地的变化, 影响洄游鱼类的产卵和繁殖, 导致河流生物群落的数量和结构特征发生变化^[3]。因此, 在水电站调度运行过程中需考虑生态因素, 协调经济效益和生态效益, 实现综合效益最大化^[4]。

近年来, 生态问题在国家层面得到了更多关注, 生态流量保障程度得到了提高, 相关研究成果也越来越丰富。Feng 等^[5] 开发了一种新型的多策略引力搜索算法, 并将其应用于乌江梯级电站的生态调度, 能有效减少不必要的生态用水; 李游坤等^[6] 构建了三峡-葛洲坝梯级电站调度模型, 探讨了协同调度运行模式对下游河道四大家鱼繁殖条件的改善作用, 结果表明仅通过葛洲坝电站精细化调度(小时尺度)即可实现发电与生态协同。然而, 上述研究多仅采用生态流量来表征大坝下游减水河段的生态流量需求(如生态基流, 即维持河流基本或最低生态系统所需要的水量), 忽略了其他生态条件(如适宜和最佳等河道生态状况)。

雅砻江流域初步规划干流 22 级梯级电站开发方案, 可开发装机容量 3 000 万 kW, 可开发年发电量 1 500 亿 kW·h^[7]。然而, 梯级电站产生巨大经济效益的同时, 可能会对河道生态环境产生一定胁迫作用。如目前锦屏二级电站(引水式电站)泄放的流量无法满足大河湾河段裂腹鱼等鱼类适宜条件下繁殖期的生态流量需求^[8]。目前, 关于雅砻江梯级电站生态调度的研究多关注下游梯级电站^[9-11], 如吴振天等^[9] 构建了以

收稿日期: 2022-10-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3090105); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y123008)

作者简介: 俞雷(1994—), 男, 江西上饶人, 工程师, 博士, 主要从事水资源规划、管理及水工水力学研究。

E-mail: lyu@nhri.cn 通信作者: 张陆陈(E-mail: lc Zhang@nhri.cn)

梯级发电量最大和适宜生态缺溢流量平方和最小为目标的多目标优化调度模型, 探究了雅砻江下游梯级电站发电和生态间的竞争关系; 梅亚东等^[1]考虑了 25 组生态流量泄放方案, 建立了雅砻江下游梯级水电站群优化调度模型, 结果表明二滩水库下泄流量维持天然径流模式, 将降低梯级电站发电效益。随着两河口和杨房沟电站相继投产发电, 雅砻江中下游已形成“3 库 7 级”的水电开发格局。因此, 亟待开展雅砻江中下游梯级电站联合生态调度研究。

本文考虑干流主要控制断面两河口、大河湾及二滩的最小、适宜及最佳生态流量过程, 以雅砻江中下游梯级电站(3 库 7 级)为研究对象, 构建联合发电优化调度模型, 分析典型年梯级电站发电效益、水资源利用效率及调度过程, 探讨河道不同生态流量需求对雅砻江中下游梯级电站发电效益和水资源利用效率的影响。

1 研究区概况与基础资料

雅砻江流域地处青藏高原东南部, 是长江的八大支流之一, 属川西高原气候区, 干湿季分明, 汛期为 6—10 月, 枯期为 11 月—翌年 5 月, 水文年设定为 11 月—翌年 10 月。干流全长 1 535 km, 天然落差 3 192 m, 水能资源丰富。位于雅砻江中游的两河口电站具有多年调节能力, 其 6 台机组于 2022 年 3 月全部投产发电; 杨房沟电站首台机组于 2021 年 6 月投产发电。至此, 雅砻江中下游正式形成了“3 库 7 级”水电格局, 总装机容量达 1 920 万 kW, 包含多年(两河口)、年(锦屏一级)、季(二滩)和日(杨房沟、锦屏二级、官地和桐子林)等多种调节性能水库。此外, 本文考虑雅砻江干流主要生态流量控制断面为两河口、大河湾及二滩。梯级电站拓扑结构及主要特征参数如图 1 和表 1 所示。两河口长序列径流资料(1958—2018 年)及各站点蒸发数据来源于水文年鉴, 结合入库、出库、蓄量变化等基础数据, 还原计算各电站天然径流和区间入流^[12]。

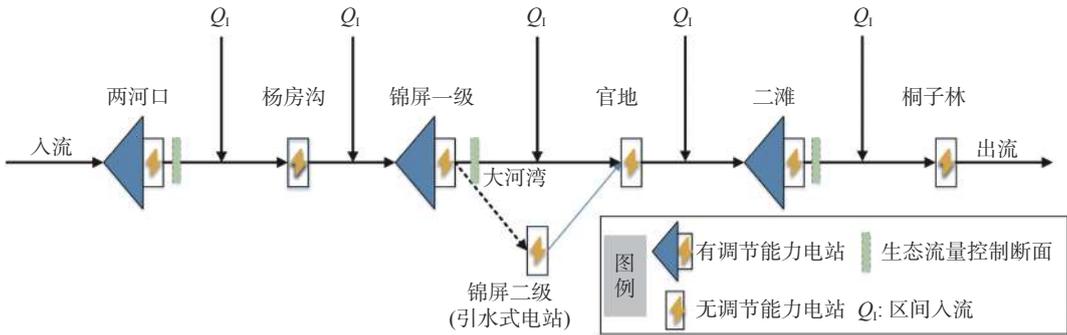


图 1 雅砻江中下游梯级电站概化示意

Fig. 1 Illustration depicting the arrangement of cascade hydropower plants along the middle and lower segments of the Yalong River

表 1 雅砻江中下游梯级电站主要特征参数

Tab. 1 Primary features of cascade hydropower plants situated in the middle and lower reaches of the Yalong River

水库名称	正常蓄水位/m	防洪汛限水位/m	死水位/m	正常蓄水位以下库容/亿m ³	调节库容/亿m ³	调节性能	装机容量/万kW	多年平均发电量/(亿kW·h)
两河口	2 865	2 845.90	2 785	101.54	65.60	多年	300	110.62
杨房沟	2 094		2 090	4.56		日	150	68.74
锦屏一级	1 880	1 859.00	1 800	77.60	49.10	年	360	166.20
锦屏二级	1 646		1 640	0.14		日	480	242.30
官地	1 330		1 328	7.29		日	240	111.29
二滩	1 200	1 190.00	1 155	57.90	33.70	季	330	170.00
桐子林	1 015		1 012	0.72		日	60	29.75

2 研究方法

2.1 生态流量计算方法

可变月径流法是由 Pastor 等^[13]开发的河流生态流量计算方法(水文学法)。该方法将 1 年分为丰水期、平水期和枯水期,通过分配平均月流量(Q_{MMF})的百分比来确定生态流量,体现了河流生态流量需求的年内变化。改进型可变月径流法(RVMF)是 Yu 等^[14-15]依据蒙大拿法生态流量标准及其等差数列分级思想,对 VMF 法进行扩展与分级,提出的一种考虑多种生态状况的河流生态流量计算方法(水文学法)。该方法基于 Q_{MMF} 的特定百分比将河道栖息地定性描述为 6 个级别,分别为最小、适宜、好、非常好、极好和最佳,已成功应用于雅砻江流域生态流量的计算^[14]。本文采用该方法计算雅砻江干流最小、适宜和最佳生态流量需求过程,具体计算见表 2。

表 2 RVMF 法生态流量计算标准

Tab. 2 The criteria utilized for computing ecological flow using the RVMF

水文季节	计算法则	不同需求等级下生态流量占比/%		
		最小	适宜	最佳
丰水期	$Q_{MMF} > 0.8 Q_{MAF}$	10	30	70
平水期	$0.4 Q_{MAF} < Q_{MMF} \leq 0.8 Q_{MAF}$	15	45	85
枯水期	$Q_{MMF} \leq 0.4 Q_{MAF}$	20	60	100

注:(1) Q_{MAF} 为多年平均流量;(2)不同需求等级下生态流量占比为生态流量与平均月流量的比值。

2.2 联合优化调度模型与求解方法

2.2.1 目标函数 雅砻江中下游梯级电站联合生态调度考虑发电效益和生态效益两方面目标。梯级电站发电效益通常用发电量指标表征,生态效益目标选用河道生态流量需求指标表征,其中生态效益目标通过 ε 约束转化法转为约束条件,即水库最小下泄流量不小于河道需求的生态流量。因此,梯级电站联合生态优化调度目标为调度期内梯级发电量最大,其目标函数表示为:

$$\text{Max} C = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \eta_i H_{i,t} q_{i,t} \Delta t \quad (1)$$

式中: C 为调度期内梯级电站总发电量(亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$); n 为梯级电站个数; T 为调度时间段数; Δt 为时段长度; $H_{i,t}$ 和 $q_{i,t}$ 分别为 i 电站 t 时段的发电水头(m)和发电流量(m^3/s); η_i 为 i 电站综合出力系数。

2.2.2 约束条件 目标函数求解的条件如下:

$$\text{水量平衡约束: } V_{i,t+1} = V_{i,t} + (L_{i,t} - Q_{i,t}) \Delta t - W_{i,t}, \quad W_{i,t} = E_{i,t} A_{i,t} \Delta t \quad (2)$$

式中: $V_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段蓄水量(亿 m^3); $L_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别为 i 电站 t 时段入库、出库流量(m^3/s); $W_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段蒸发量(亿 m^3); $E_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段平均蒸发强度(mm/h); $A_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段库区水面面积(km^2)。

$$\text{水位约束: } Z_{i,t}^{\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{\max} \quad (3)$$

式中: $Z_{i,t}^{\min}$ 和 $Z_{i,t}^{\max}$ 分别为 i 电站 t 时刻的下限水位和上限水位(m)。

$$\text{流量约束: } Q_{i,t}^{\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t}^{\max} \quad (4)$$

式中: $Q_{i,t}^{\min}$ 和 $Q_{i,t}^{\max}$ 分别为 i 电站 t 时段最小和最大出库流量(m^3/s)。

$$\text{出力约束: } N_{i,\min} \leq N_{i,t} \leq N_{i,\max} \quad (5)$$

式中: $N_{i,\min}$ 和 $N_{i,\max}$ 分别为 i 电站 t 时段最小和最大出力(MW)。

$$\text{调度期初、末时刻水位约束: } Z_{i,1} = Z_{i,T+1} = Z^* \tag{6}$$

式中: Z^* 通常取正常蓄水位。

$$\text{梯级电站水力联系方程: } L_{i,t} = Q_{i-1,t} + I_{i,t} \tag{7}$$

式中: $Q_{i-1,t}$ 为第 $i-1$ 级电站(i 的上一级) t 时段的出库流量(m^3/s); $I_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段区间入流(m^3/s)。

2.2.3 模型求解 本文概述的梯级电站优化调度属于单目标、多约束的非线性复杂优化问题, 遗传算法为该类问题的求解提供了思路。本文选择增强精英保留的遗传算法(Strengthen Elitist Genetic Algorithm, SEGA)^[16], 能有效克服传统遗传算法后期收敛速度慢的问题。本文选择水位 Z 作为决策变量:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \dots \\ Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^1 & \dots & z_1^T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_n^1 & \dots & z_n^T \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中: n 为梯级电站个数, 本文以雅砻江中下游梯级电站为研究对象, 根据日调节性能水库在长期优化调度的特殊性, 假定杨房沟、锦屏二级、官地和桐子林水库在调度期内运行水头恒定(取正常蓄水位和死水位的均值), 故 $n = 3$; T 为调度时段数, 本文以典型年为例, 进行月尺度中长期优化调度, 故 $T = 12$ 。

此外, 本文基于梯级电站的实际运行特点, 结合算法编码方式, 将流量和出力约束转化为水位约束^[17]。通过试算, 确定 SEGA 算法的种群规模为 1 000, 最大迭代次数为 500。同时, 为避免算法自身随机性带来的误差, 计算独立运行 10 次, 最终结果取其均值。

3 结果与分析

本文采用改进型可变月径流法, 计算雅砻江主要生态流量控制断面两河口、大河湾和二滩的最小、适宜及最佳生态流量过程, 作为优化调度模型的强约束条件; 将两河口电站入库径流资料(1958—2018 年)进行排频, 选取了 3 种水文典型年, 分别为丰水年(2012 年, $P=10\%$) (P 为距平百分率)、平水年(2017 年, $P=50\%$) 和枯水年(2006 年, $P=90\%$), 用于优化调度模型的输入, 开展典型年月尺度梯级电站联合优化调度研究。

3.1 生态流量计算结果

采用改进型可变月径流法, 计算的两河口、大河湾和二滩断面的最小、适宜及最佳生态流量过程见图 2。可见, 不同断面、不同生态需求下各月份生态流量差异显著, 均表现为汛期生态流量需求高于枯期。同时, 本文计算结果与天然流量年内变化趋势一致, 能在一定程度上反映生态流量的季节性变化特征。

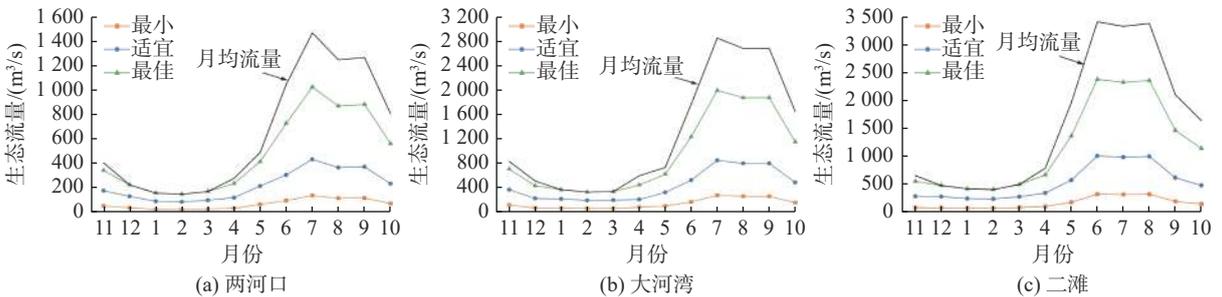


图 2 主要控制断面最小、适宜和最佳生态流量过程

Fig. 2 Establishing the minimum, fair, and optimum ecological flow regimes at key control sections

3.2 调度结果分析

3.2.1 发电效益分析 不同来水条件、生态流量需求下,梯级电站发电量见表3。可见,与最小生态流量需求相比,下游河段考虑适宜和最佳生态流量需求时,3种典型年下梯级电站年发电量均减小。其中,丰水年分别降低了5.58%和16.78%,平水年分别降低了6.59%和21.00%,枯水年分别降低了8.12%和16.38%。此外,在同一典型年下锦屏二级电站年发电量变化较大,其他6座电站变化幅度较小。这表明下游河段考虑更高层次生态流量需求时主要影响锦屏二级电站的发电量,进而影响梯级发电量(图3)。主要原因:锦屏二级为引水式电站,大河湾河段的生态流量需求越高,所需生态流量越大,锦屏一级下泄流量大部分用于大河湾河段的生态需求,而不是锦屏二级电站的发电(图3);对于两河口、锦屏一级、二滩等坝后式电站,其发电流量即能满足下游河道的生态流量需求。因此,在进行雅砻江中下游梯级电站生态调度时,需重点考虑锦屏大河湾河段的生态流量需求。

表3 3种典型年不同生态流量需求下梯级电站年发电量

Tab. 3 Calculating the yearly power generation from cascade hydropower plants, considering varying ecological flow demands across three representative years

单位: 亿kW·h

电站	丰水年			平水年			枯水年		
	最小	适宜	最佳	最小	适宜	最佳	最小	适宜	最佳
两河口	153.51	152.61	153.73	115.81	115.96	118.82	88.20	89.09	91.51
杨房沟	85.93	85.22	84.21	69.95	69.95	69.95	54.42	54.42	54.42
锦屏一级	226.86	224.57	221.98	200.68	200.83	190.15	164.39	166.65	169.66
锦屏二级	315.89	252.24	131.28	254.68	185.92	68.96	199.69	130.38	60.74
官地	144.03	144.15	139.55	122.12	122.24	122.02	103.18	103.13	102.88
二滩	226.43	227.66	222.92	202.54	205.29	187.16	168.31	169.38	167.64
桐子林	33.66	33.67	33.60	28.50	28.54	28.44	24.86	24.83	24.64
梯级	1 186.31	1 120.11	987.28	994.28	928.73	785.48	803.06	737.88	671.49

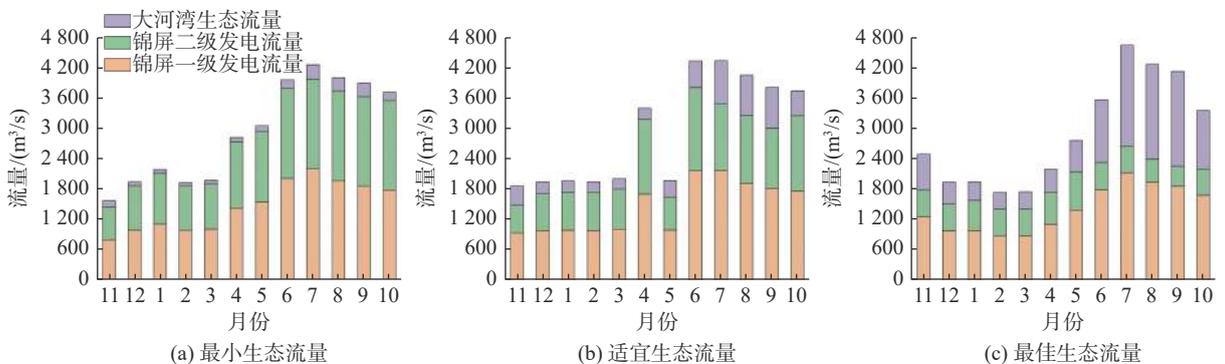


图3 丰水年下锦屏一、二级电站发电流量和大河湾生态流量

Fig. 3 Power generation flow of Jinping-I and Jinping-II and ecological flow of Dahewan under the wet year

对于多年尺度,最小、适宜和最佳生态流量需求下雅砻江中下游梯级电站联合优化调度年发电量分别为994.55亿、928.91亿和814.5亿kW·h。相较常规调度(多年平均发电量为898.90亿kW·h),最小和适宜生态流量下梯级发电量分别增加了98.65亿和30.01亿kW·h,而最佳生态流量需求下梯级发电量则减少了84.40亿kW·h。因此,雅砻江中下游7座电站采用联合优化调度时,同时保障发电效益正常发挥,其下游河道能维持更高层次的生态流量,有效缓解了雅砻江干流水力发电与河道生态保护的矛盾关系。

3.2.2 水资源利用效率分析 梯级电站联合优化调度运用有调蓄能力的电站水库,协调上下游电站,充分

利用下泄水量, 以达到提升水资源利用效率的目标。本文选用发电耗水率指标(每生产 1 kW·h 电量流过水轮机的水量, 其值越小, 水资源利用效率越大)以表征梯级电站水资源利用效率。表 4 为丰、平、枯水年下不同生态流量需求对应的梯级电站发电耗水率。

表 4 3 种典型年不同生态流量需求下梯级电站发电耗水率

Tab. 4 Evaluating the water consumption rate for power generation in cascade hydropower plants, accounting for diverse ecological flow needs, over three representative years 单位: m³/(kW·h)

电站	丰水年			平水年			枯水年		
	最小	适宜	最佳	最小	适宜	最佳	最小	适宜	最佳
两河口	1.93	1.94	1.92	1.92	1.92	1.86	1.87	1.85	1.80
杨房沟	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13
锦屏一级	2.03	2.03	1.99	1.92	1.91	2.02	1.89	1.87	1.83
锦屏二级	1.33	1.33	1.32	1.33	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
官地	3.59	3.59	3.59	3.56	3.56	3.56	3.53	3.53	3.54
二滩	2.43	2.44	2.43	2.34	2.31	2.53	2.34	2.33	2.34
桐子林	19.50	19.49	19.53	18.99	18.96	19.03	18.50	18.52	18.66
梯级	2.74	2.83	3.00	2.70	2.79	3.10	2.72	2.83	2.97

注: 平、枯水年, 锦屏二级电站考虑最佳生态流量需求时, 7—10月发电量为0, 故不参与计算。

(1) 3 种典型年、3 种生态流量需求下, 7 座电站的发电耗水率均表现为: 锦屏二级 < 两河口 < 锦屏一级 < 二滩 < 官地 < 杨房沟 < 桐子林, 即桐子林电站水资源利用效率最低, 且远低于其他 4 座水电站, 锦屏二级电站水资源利用效率最高。主要原因: 桐子林为雅砻江干流最后一级电站, 地势平坦, 落差小, 其发电量主要取决于发电流量, 故其发电效率最低。锦屏二级为引水式电站, 通过 4 条长约 16.7 km 的引水隧洞, 利用天然大河湾形成巨大落差发电, 故其发电效率最高。

(2) 3 种典型年下, 梯级电站水资源利用效率均随生态流量需求的增加而减小。相较于最小生态流量需求, 适宜生态流量需求对应的梯级水资源利用效率下降程度较小 (<5%), 具体为: 丰水年分别降低了 3.11% 和 9.20%, 平水年分别降低了 3.39% 和 14.88%, 枯水年分别降低了 4.25% 和 9.36%。

3.2.3 调度过程分析 两河口是雅砻江中下游龙头水库, 具有多年调节能力, 其运行水位与梯级电站发电效益、水资源利用效率及河道生态流量保障息息相关。不同典型年、不同生态流量需求下两河口水库调度过程如图 4~6 所示。由图 4~6 可见:

(1) 丰水年, 3 种生态流量下两河口水库运行水位较为接近, 年均水位分别为 2 833.67、2 834.89 和 2 834.62 m。但平水年和枯水年, 考虑最佳生态流量时, 该水库年均运行水位显著高于最小、适宜生态流量情况。这解释了该水库发电效益在不同来水条件、不同生态流量需求的表现(表 4)。

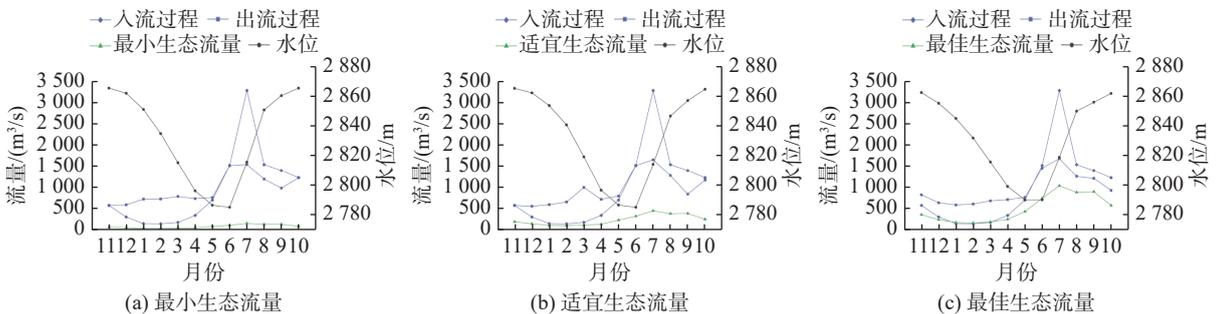


图 4 丰水年不同生态流量需求下两河口水库调度过程

Fig. 4 Operation process of Lianghekou reservoir under different ecological flows in the wet year

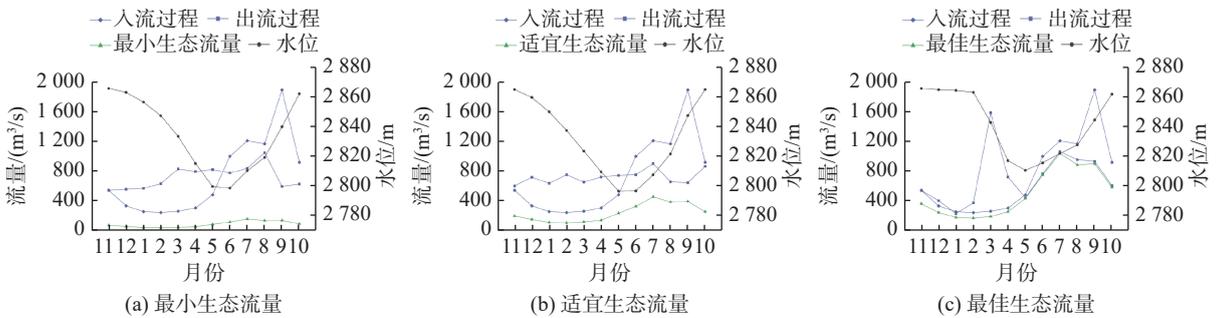


图 5 平水年不同生态流量需求下两河口水库调度过程

Fig. 5 Operation process of Lianghekou reservoir under different ecological flows in the normal year

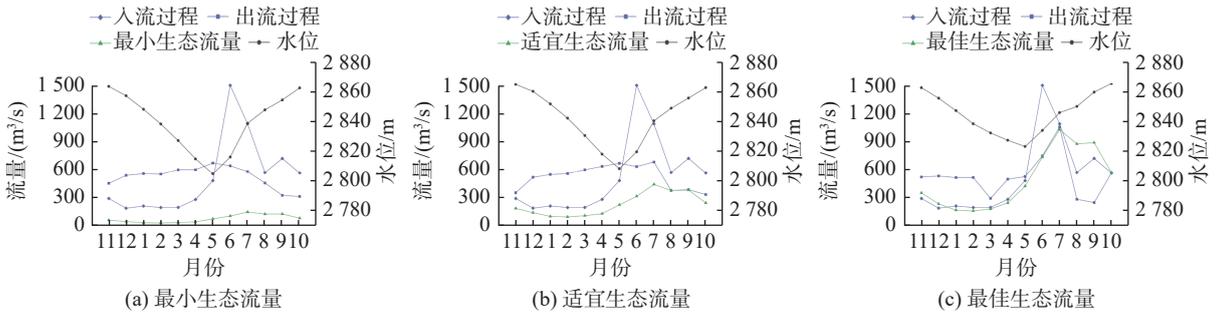


图 6 枯水年不同生态流量需求下两河口水库调度过程

Fig. 6 Operation process of Lianghekou reservoir under different ecological flows in the dry year

(2) 两河口水库运行水位总体随来水量的增加而减小, 其中枯期(11月—翌年5月)水位降幅随来水的减小而减小。这解释了其水资源利用效率在不同来水条件的表现(丰水年<平水年<枯水年, 表4)。另一方面, 丰水年虽不利于梯级电站水资源利用效率, 但利于发电效益; 而考虑到河道生态流量需求, 在枯水年水资源利用效率的重要性大于发电效益, 因此优化方案显示枯水年水位较高, 发电流量较小。

(3) 丰、平水年水库7月开始蓄水, 枯水年6月开始蓄水。枯水年水库水位较丰、平水年先达到汛期运行水位。其中枯水年考虑最佳生态流量时, 7月即到达汛限水位。枯水年汛期(6—10月)平均来水为 $888.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 显著低于丰水年($1\,227.4 \text{ m}^3/\text{s}$)和平水年($1\,784 \text{ m}^3/\text{s}$)。因此, 当水库遭遇枯水年时, 需提前蓄水, 确保汛末水位蓄至正常蓄水位。此外, 枯水年8—10月来水较小(均值仅为 $618 \text{ m}^3/\text{s}$), 防洪压力较小。因此, 水库满足汛限水位要求, 需尽早开始蓄水, 以确保来年枯期用水。

(4) 对于丰水年, 两河口水库保证防洪安全和发电效益正常发挥的同时, 其下泄流量可满足下游河道最佳生态流量需求; 平水年, 该水库下泄流量可满足下游河道最佳生态流量需求, 但无法保证发电效益正常发挥; 枯水年, 该水库下泄流量无法满足下游河道最佳生态流量需求(图6(c)), 同时水库部分时段出力低于保证出力, 难以正常发挥发电效益。

4 结 语

本文以雅砻江中下游7座电站为研究对象, 开展不同生态流量需求下梯级电站联合优化调度研究。计算了雅砻江干流最小、适宜及最佳生态流量过程, 构建了雅砻江中下游梯级电站联合优化调度模型, 分析了梯级电站在不同来水条件、不同生态流量需求下发电效益、水资源利用效率及调度过程。结果表明:

(1) 随河道生态流量需求的提高, 梯级电站发电量和水资源利用效率均下降, 其中锦屏二级电站发电量变化最大。具体为: 较最小生态流量, 适宜、最佳生态流量下梯级电站发电量分别下降了65.64亿和

180.05 亿 kW·h; 较最小生态流量需求, 适宜生态流量需求对应的梯级水资源利用效率下降程度较小 (<5%), 而最佳生态流量需求下降程度较大(9.20%~14.88%)。

(2)与常规调度相比, 雅砻江中下游梯级电站联合优化调度考虑最小和适宜生态流量时, 梯级发电量分别增加了 98.65 亿和 30.01 亿 kW·h, 而最佳生态流量需求下梯级发电量减少了 84.40 亿 kW·h。这表明通过联合优化调度方式, 梯级电站保障发电效益正常发挥的同时, 其下游河道能维持更高层次的生态流量, 一定程度上缓解了流域水能开发利用与河道生态保护间的关系。

参 考 文 献:

- [1] ZHANG H X, CHANG J X, GAO C, et al. Cascade hydropower plants operation considering comprehensive ecological water demands[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180: 119-133.
- [2] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers[J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 215-221.
- [3] GIBEAU P, CONNORS B M, PALEN W J. Run-of-River hydropower and salmonids: potential effects and perspective on future research[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017, 74(7): 1135-1149.
- [4] 杨培思, 王丽, 莫康乐, 等. 考虑鱼类生态需水过程的漓江并联水库群生态调度[J]. 水利水运工程学报, 2022(5): 138-147. (YANG Peisi, WANG Li, MO Kangle, et al. Ecological operation of Lijiang parallel reservoirs considering ecological flow requirement of fish[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(5): 138-147. (in Chinese))
- [5] FENG Z K, LIU S, NIU W J, et al. Ecological operation of cascade hydropower reservoirs by elite-guide gravitational search algorithm with Lévy flight local search and mutation[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581: 124425.
- [6] 李游坤, 林俊强, 秦鑫, 等. 控制—反调节水库协同生态调度的优化策略: 以三峡—葛洲坝梯级水库为例[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 630-642. (LI Youkun, LIN Junqiang, QIN Xin, et al. Joint ecological operation optimal strategy of control and re-regulation reservoirs: a case study of Three Gorges-Gezhouba cascade reservoirs[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(2): 630-642. (in Chinese))
- [7] 俞雷, 贾本有, 吴时强, 等. 雅砻江流域水电站水足迹计算及分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(4): 41-47. (YU Lei, JIA Benyou, WU Shiqiang, et al. Calculation and analysis of water footprint of hydropower stations in Yalong River Basin[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(4): 41-47. (in Chinese))
- [8] 李洋, 吴佳鹏, 刘来胜, 等. 基于鱼类产卵场保护的汛期生态流量阈值研究初探: 以锦屏大河湾为例[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 306-312. (LI Yang, WU Jiapeng, LIU Laisheng, et al. Study on the eco-flow threshold Jinping River bend in flood season based on fish spawning grounds protection[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(16): 306-312. (in Chinese))
- [9] 吴振天, 董增川, 倪效宽, 等. 梯级水库群发电与生态效益竞争关系定量分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 67-70. (WU Zhentian, DONG Zengchuan, NI Xiaokuan, et al. Quantitative analysis of competition relationship between power generation and ecological benefit of cascade reservoirs[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(9): 67-70. (in Chinese))
- [10] 张小刚. 雅砻江水库群生态调度决策支持系统研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 122-124, 117. (ZHANG Xiaogang. Decision support system of ecological operation scheduling of reservoir group in Yalong River basin[J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(10): 122-124, 117. (in Chinese))
- [11] 梅亚东, 杨娜, 翟丽妮. 雅砻江下游梯级水库生态友好型优化调度[J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 721-725. (MEI Yadong, YANG Na, ZHAI Lini. Optimal ecological sound operation of the cascade reservoirs in the lower Yalongjiang River[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(5): 721-725. (in Chinese))
- [12] 俞雷, 贾本有, 吴时强, 等. 雅砻江流域典型年天然径流量时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(3): 73-80, 141. (YU Lei, JIA Benyou, WU Shiqiang, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of typical annual natural runoff in the Yalong River Basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(3): 73-80, 141. (in Chinese))
- [13] PASTOR A V, LUDWIG F, BIEMANS H, et al. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(12): 5041-5059.

- [14] YU L, WU X F, WU S Q, et al. Multi-objective optimal operation of cascade hydropower plants considering ecological flow under different ecological conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126599.
- [15] THARME R E. 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*, 2003, 19(5/6): 397-441.
- [16] 王宗志, 王伟, 刘克琳, 等. 水电站水库长期优化调度模型及调度图[J]. *水利水电工程学报*, 2016(5): 23-31. (WANG Zongzhi, WANG Wei, LIU Kelin, et al. Long-term reservoir optimal operation model and operation curves for hydropower based on genetic algorithm and stochastic dynamic programming[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(5): 23-31. (in Chinese))
- [17] 卢有麟, 周建中, 王浩, 等. 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法[J]. *水科学进展*, 2011, 22(6): 780-788. (LU Youlin, ZHOU Jianzhong, WANG Hao, et al. Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6): 780-788. (in Chinese))

Optimizing the operation of interconnected cascade hydropower plants along the middle and lower stretches of the Yalong River to meet varying ecological flow demands

YU Lei, ZHANG Luchen, LUO Shaoze, WU Xiufeng, WU Shiqiang

(The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: This study explores the integration of hydropower generation and the ecological flow requirement (EFR) of the Yalong River to achieve optimal operation of the cascade hydropower plants in the middle and lower sections of the river. The investigation includes seven hydropower plants. The revised variable monthly flow method (RVMF) is utilized to calculate the minimum, fair, and optimum ecological flow processes for the river's mainstream. A joint optimization operation model for the middle and lower Yalong River (MLYR) is developed, aiming to maximize cascade power generation. The Strengthen Elitist Genetic Algorithm is employed to solve the optimization model. The findings indicate that (1) as the EFR of the river increases, the power generation and water resource utilization efficiency of the cascade hydropower plants decrease, with Jinping-II experiencing the most significant decline in power generation; (2) implementing joint optimization operation can sustain a higher EFR level while ensuring the normal operation and power generation benefits of the cascade hydropower plants, thereby mitigating the trade-off between hydro energy development and utilization in the basin and the ecological protection of the river.

Key words: ecological operation; joint optimization operation; cascade hydropower plants; ecological flow; the middle and lower Yalong River