

水利水电工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

考虑鱼类生态需水过程的漓江并联水库群生态调度

杨培思, 王丽, 莫康乐, 陈求稳, 李婷, 曾晨军, 唐磊, 张辉

Ecological operation of Lijiang parallel reservoirs considering ecological flow requirement of fish

YANG Peisi, WANG Li, MO Kangle, CHEN Qiuwen, LI Ting, ZENG Chenjun, TANG Lei, ZHANG Hui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210715002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑水文非一致性变异的河道基本生态流量

Study of basic ecological instream flow considering hydrological alterations under non-stationary
水利水电工程学报. 2021(2): 64 <https://doi.org/10.12170/20200218004>

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

基于改进层次分析法的航道生态性评价研究

Ecological evaluation of waterway based on improved analytic hierarchy process
水利水电工程学报. 2021(5): 33 <https://doi.org/10.12170/20210207001>

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

寒区堤防砂土岸坡生态护坡技术研究

Study on ecological slope protection technology of dike for sandy soil bank slope in cold region
水利水电工程学报. 2020(2): 116 <https://doi.org/10.12170/20190222001>

加筋生态护坡技术的应用与发展

Application and development of TRM technology in revetment works
水利水电工程学报. 2017(6): 110 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.016>



DOI:10.12170/20210715002

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))

考虑鱼类生态需水过程的漓江并联水库群生态调度

杨培思^{1,2}, 王 丽³, 莫康乐¹, 陈求稳¹, 李 婷¹, 曾晨军¹, 唐 磊¹, 张 辉¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 重庆交通大学 海学院, 重庆 400074)

摘要: 水库群联合运行带来巨大的经济效益和社会效益, 同时也对河流生态造成诸多影响。为提升漓江流域水库群联合运行的发电、通航、生态保护和青狮潭水库蓄水综合效益, 构建了考虑鱼类生态需水过程的并联水库群多目标调度模型, 采用第三代非支配遗传算法(NSGA-III)对模型优化求解。结果表明: (1)与常规调度相比, 优化调度在保障发电工程效益的同时, 实现了通航与生态效益的提升; (2)构建的并联水库群多目标生态调度模型, 在枯、平、丰水年的生态流量满足率都维持在47%之上, 尤其保障了鱼类越冬、产卵和繁殖期的生态需求; (3)实施漓江并联水库群联合生态调度, 青狮潭水库在枯水年和丰水年蓄水量分别增加 $22.26 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $24.55 \times 10^6 \text{ m}^3$, 缓解了青狮潭水库供水压力。研究可为并联水库群多目标生态调度提供相关参考。

关 键 词: 生态需水; 多目标; 生态调度; 水库群; 漓江

中图分类号: TV697

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)05-0138-10

水库通过调度改变天然径流的蓄泄方式^[1], 以满足发电、通航、生态、防洪、灌溉和供水等要求, 是水资源综合利用和管理的有效工具。当前, 水库调度模式日趋复杂化, 从过去只考虑单一目标的单水库调度, 逐步向综合考虑多目标的多水库联合调度转变。同时, 水库运行对河流生态的影响越来越受到重视。因此, 需要优化水库调度方式, 协调好河流开发利用与生态环境保护的关系, 实现发电、通航、生态、蓄水等多个调度目标的均衡, 使流域内水资源综合效益最大化^[2]。

现阶段多目标水库生态调度模型中的生态目标函数大多基于水文学, 如 Dai 等^[3]基于变化范围法(RVA)构造生态目标函数, 提出兼顾发电和生态需求的金沙江梯级水库调度方案; Yu 等^[4]基于改进的变化范围法(IRVA)构造生态目标函数, 建立考虑发电、供水和生态目标的三峡水库多目标调度模型; Chen 等^[2]以水文情势变化最小为生态目标函数, 构建了考虑供水、发电、水文情势和水质的青狮潭水库多目标调度模型, 确定了两类典型的运行方案; 陈悦云等^[5]以水文情势偏差最小为生态目标函数, 建立面向发电、供水、生态的赣江流域水库群调度模型; 方国华等^[1]基于年内展布法构造生态目标函数, 提出均衡发电与生态效益的调度方案。这些方法未考虑鱼类对流速、水深、水温等水文水力条件的需求, 调度方案无法很好地满足研究区域目标保护鱼类原有生存习性的需求。漓江中下游段为光倒刺鲃国家级水产资源保护区, 这对漓江河流生态的保护提出了更高要求。鉴于此, 本研究以漓江并联水库群为研究对象, 基于目标鱼类生态需水过程建立生态目标函数, 综合考虑发电、通航和青狮潭水库蓄水要求, 构建多目标并联水库群生态调度模型, 采用第三代非支配遗传算法(Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm-III, NSGA-III)对模型优化求解, 提出兼顾工程效益和生态效益的调度方案。

收稿日期: 2021-07-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC0408901); 国家自然科学基金(青年基金)资助项目(51809175, 52009082)

作者简介: 杨培思(1990—), 男, 广东潮州人, 博士研究生, 主要从事水库生态调度方面的研究。

E-mail: 364293242@qq.com 通信作者: 陈求稳(E-mail: qwchen@nhri.cn)

1 研究区域概况

漓江位于中国西南部的广西壮族自治区, 发源于兴安县溶江镇灵渠口, 全长 214 km, 流域面积 6 050 km²。漓江流域径流年内分配极不均匀, 丰、枯水季节径流量相差悬殊, 80% 以上降雨量集中在每年的 3—8 月, 且由于独特的喀斯特地貌, 径流产生快、流量大、历时短。枯水期水资源严重短缺, 生态退化, 通航受到严重影响。

为逐步解决上述问题, 漓江流域修建了三期补水工程, 承担漓江流域发电、通航、生态保护等任务。漓江最大支流甘棠江上的青狮潭水库, 为一期补水工程, 目标为枯水期漓江干流流量达到 30 m³/s; 在潮田河与漠川河分别修建思安江水库与五里峡水库, 为二期补水工程, 与青狮潭水库形成三库联合调度, 目标为枯水期漓江干流流量达到 45 m³/s; 三期补水工程联合斧子口水库、小溶江水库、川江水库, 与一、二期补水工程联合向漓江补水, 目标为枯水期漓江干流流量达到 60 m³/s^[6]。此外, 在桂林市临桂区会仙镇境内, 有中国最大的岩溶湿地——会仙湿地, 后期规划从青狮潭水库引用部分水量对会仙湿地进行生态补水。目前, 一期和二期补水工程已建设完成, 三期补水工程尚未竣工。漓江二期补水工程水库的主要特征参数如表 1 所示。漓江流域水系及水库分布见图 1。

根据广西水产研究所的调查^[7], 漓江自桂林至阳朔段有多处较大规模的鱼类产卵场, 及一处大型鱼类越冬场(图 1)。

表 1 漓江二期补水工程各水库基本情况

Tab. 1 Basic information of reservoirs of Lijiang River water supplement project (phase two)

水库名称	总库容/ 亿m ³	调节库容/ 亿m ³	正常蓄水位/ m	死水位/ m	调节 类型
青狮潭水库	6.08	3.68	225	204	多年调节
思安江水库	0.89	0.81	327	254	多年调节
五里峡水库	1.08	0.86	289	252	年调节

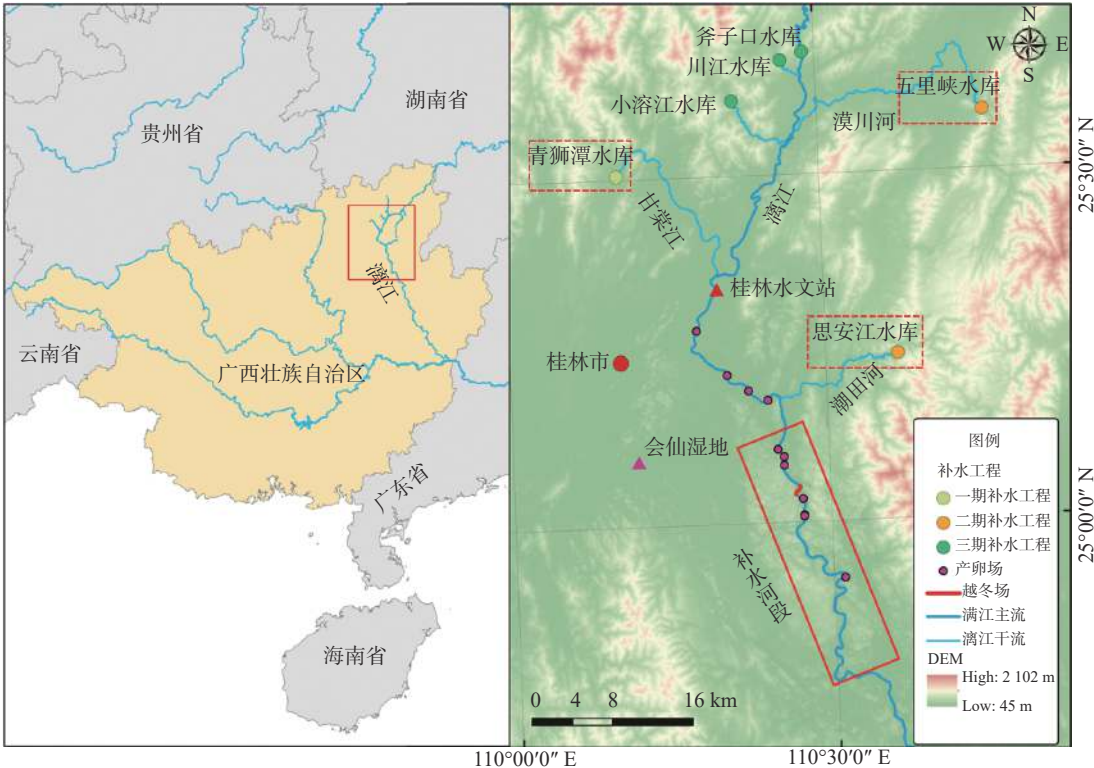


图 1 漓江流域水系及水库分布情况

Fig. 1 Distribution of water system and reservoirs in Lijiang River Basin

2 多目标生态调度模型

漓江流域水库群运行主要考虑发电和通航工程效益,同时兼顾漓江干流的生态需求和会仙湿地补水需求。为提升水库群运行综合效益,构建了青狮潭、五里峡、思安江并联水库群(漓江二期补水工程)多目标调度模型。

2.1 目标函数

目标函数包括发电量、通航满足率、生态流量满足率及青狮潭水库蓄水量等 4 个。发电量的目标函数如下:

$$f_1 = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n N_{i,t} \Delta t \quad (1)$$

$$N_{i,t} = K_i Q_{i,t}^g \Delta H_{i,t}^g \quad (2)$$

式中: f_1 为发电量函数; $N_{i,t}$ 为第 i 座水电站在 t 时段的出力(kW), 其中, $i=1$ 为青狮潭水库, $i=2$ 为五里峡水库, $i=3$ 为思安江水库; Δt 为时间长度(h); T 为调度总时段数, 为 36, 各时段时长为 10 或 11 d; n 为参与优化的水库数目, $n=3$; K_i 为第 i 座水电站的出力系数; $Q_{i,t}^g$ 为第 i 座水库 t 时段通过发电机组的发电引水流量(m^3/s); $\Delta H_{i,t}^g$ 为第 i 座水库 t 时段上下游的净发电水头(m)。

漓江流域水库群调度的首要目标为完成漓江二期补水工程任务($45 \text{ m}^3/\text{s}$), 满足干流通航需求, 其目标函数表达如下:

$$f_2 = \max \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\min \left(\frac{Q_t}{Q_{\text{nav}}}, 1 \right) \right) \quad (3)$$

$$T_{\text{nav}} = \sum_{t=1}^T \min \left(\frac{Q_t}{Q_{\text{nav}}}, 1 \right) \Delta T \quad (4)$$

式中: f_2 为通航满足率函数; Q_t 为优化调度后 t 时段漓江干流下游流量(m^3/s); Q_{nav} 为通航需求流量, 为 $45 \text{ m}^3/\text{s}$; T_{nav} 为适宜通航天数, 计算结果取整数(d); ΔT 为调度时段的时长, 为 10 或 11 d。

引用李若男^[8]对漓江干流生态流量的研究成果, 漓江中下游段为光倒刺鲃国家级水产资源保护区, 故选取光倒刺鲃作为目标保护鱼类, 其越冬期主要在 12 月至 1 月, 主要生境因子为水温 and 水深; 产卵繁殖期主要在 3—7 月, 主要生境因子为流速、水深和水温^[9]。根据实验室胁迫试验建立鱼类对环境因子(流速、水深、水温)的响应关系, 构建鱼类栖息地模型, 并与水环境模型耦合, 推求不同栖息地恢复目标下的鱼类生态需水过程。选取 50% 及 100% 栖息地恢复目标对应的鱼类生态需水过程, 分别作为最小生态流量及适宜生态流量, 结果如图 2 所示。

当漓江干流流量低于最小生态流量时, 生态流量满足率为 0; 当漓江干流流量位于最小生态流量与适宜生态流量之间时, 生态流量满足率随漓江干流流量的增加而增大; 当漓江干流流量高于适宜生态流量时, 生态流量满足率为 1, 其目标函数如下:

$$f_3 = \max R_t \quad (5)$$

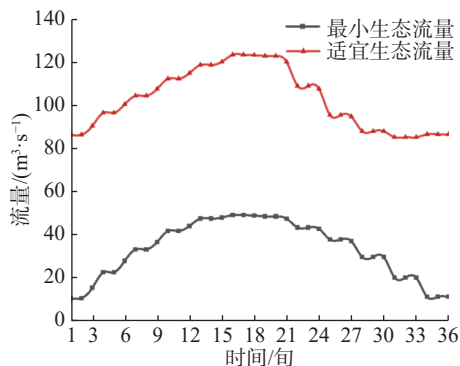


图 2 漓江干流生态流量

Fig. 2 The ecological flow of the main stream of the Lijiang River

$$R_t = \begin{cases} 0, & Q_t < Q_{t,\min} \\ \frac{Q_t - Q_{t,\min}}{Q_{t,\text{pro}} - Q_{t,\min}}, & Q_{t,\min} \leq Q_t \leq Q_{t,\text{pro}} \\ 1, & Q_{t,\text{pro}} < Q_t \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_3 为生态流量满足率函数; $Q_{t,\min}$ 和 $Q_{t,\text{pro}}$ 分别为 t 时段干流最小生态流量和适宜生态流量(m^3/s)。

规划从青狮潭水库引用部分水量,对会仙湿地进行生态补水,因此需要提高青狮潭水库的蓄水量。在此将目标函数转化为青狮潭水库的平均水位最大。

$$f_4 = \max \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T H_t^{\text{qst}} \quad (7)$$

式中: H_t^{qst} 为青狮潭水库在 t 时段的水位。

2.2 约束条件

约束条件包括水量平衡约束、并联水库群水力联系、水位约束、出力约束、机组过流能力约束、变量非负约束等。

$$(1) \text{ 水量平衡约束: } V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t}^{\text{in}} - Q_{i,t}^{\text{g}} - Q_{i,t}^{\text{s}}) \Delta t \quad (8)$$

式中: $V_{i,t+1}$ 、 $V_{i,t}$ 分别为第 i 座水库 t 时段的末、初库容(m^3); $I_{i,t}^{\text{in}}$ 为第 i 座水库 t 时段平均入库流量(m^3/s); $Q_{i,t}^{\text{g}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{s}}$ 分别为第 i 座水库 t 时段平均发电引用流量、弃水流量(m^3/s)。

$$(2) \text{ 并联水库群水力联系: } I_t + \sum_{i=1}^3 (Q_{i,t}^{\text{g}} + Q_{i,t}^{\text{s}}) = Q_t \quad (9)$$

式中: I_t 为 t 时段漓江干流上游径流量(m^3/s)。

$$(3) \text{ 水位约束: } H_{i,\min} \leq H_{i,t} \leq H_{i,\max} \quad (10)$$

式中: $H_{i,t}$ 为第 i 座水库 t 时段的水位(m); $H_{i,\min}$ 为第 i 座水库死水位(m); $H_{i,\max}$ 在非汛期为第 i 座水库的正常蓄水位(m),在汛期为汛限水位(m)。

$$(4) \text{ 出力约束: } N_{i,\min} \leq N_{i,t} \leq N_{i,\max} \quad (11)$$

式中: $N_{i,\min}$ 、 $N_{i,\max}$ 分别为第 i 座水库的保证出力和装机容量(kW)。其中,不等式左边大于或等于保证出力为非强制性约束条件,不一定满足;不等式右边不大于装机容量为强制性约束条件。

$$(5) \text{ 机组过流能力约束: } Q_{i,\min}^{\text{g}} \leq Q_{i,t}^{\text{g}} \leq Q_{i,\max}^{\text{g}} \quad (12)$$

式中: $Q_{i,\min}^{\text{g}}$ 、 $Q_{i,\max}^{\text{g}}$ 分别为第 i 座水库水电站 t 时段允许的最小、最大过机流量(m^3/s)。

(6) 变量非负约束。上述各个变量均为非负。

2.3 模型求解及模糊隶属度

青狮潭、五里峡和思安江水库的旬入库流量作为模型输入变量,以各个水库的旬出库流量作为决策变量。1年被分为36个调度时段,各时段时长为10或11d,决策变量长度为108。采用第三代非支配遗传算法(NSGA-III)作为调度模型的求解方法^[10-11]。其中,种群规模设为400,最大迭代次数取100000次,平均计算时长约200min。

在实际应用中,通常只需一组优化调度方案用于指导水库运行。本研究采用模糊数学方法,应用模糊集理论对 Pareto 非劣解集中各个解的目标函数值进行评估^[12]。模糊隶属度函数定义为:

$$\mu_m = \frac{f_m - f_m^{\min}}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (13)$$

$$u_N = \left(\frac{1}{4} \sum_{m=1}^4 \mu_m^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

(14)

式中： μ_m 为第 m 个目标函数 f_m 的隶属度值， $m=1, 2, 3, 4$ ； f_m 、 $f_m^{\min}$ 和 $f_m^{\max}$ 分别表示 Pareto 非劣解集在第 m 个目标函数的函数值、最小值和最大值； u_N 为第 N 个 Pareto 非劣解的模糊隶属度，将 Pareto 非劣解集中模糊隶属度值最大所对应的解作为最优的水库调度方案。

3 研究结果分析

3.1 Pareto 非劣解集

将桂林水文站 1958—2015 年的径流数据进行频率分析，最终选取 2011 年(枯)、2014 年(平)和 2015 年(丰)作为典型年份。枯、平、丰水年的计算结果类似，本文以漓江流域典型平水年(2014 年)为例给出结果。青狮潭、五里峡、思安江三库(漓江二期补水工程)多目标联合优化调度，在三维空间中 Pareto 非劣解集的分布见图 3。由图 3 可知，发电、通航与生态目标的 Pareto 非劣解集分布在发电量为 $9.23 \times 10^7 \sim 10.54 \times 10^7 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 、通航满足率为 87.17%~93.65%、生态流量满足率为 66.90%~72.66% 范围内的近似曲面上，而青狮潭水库水位为 216.47~218.73 m。

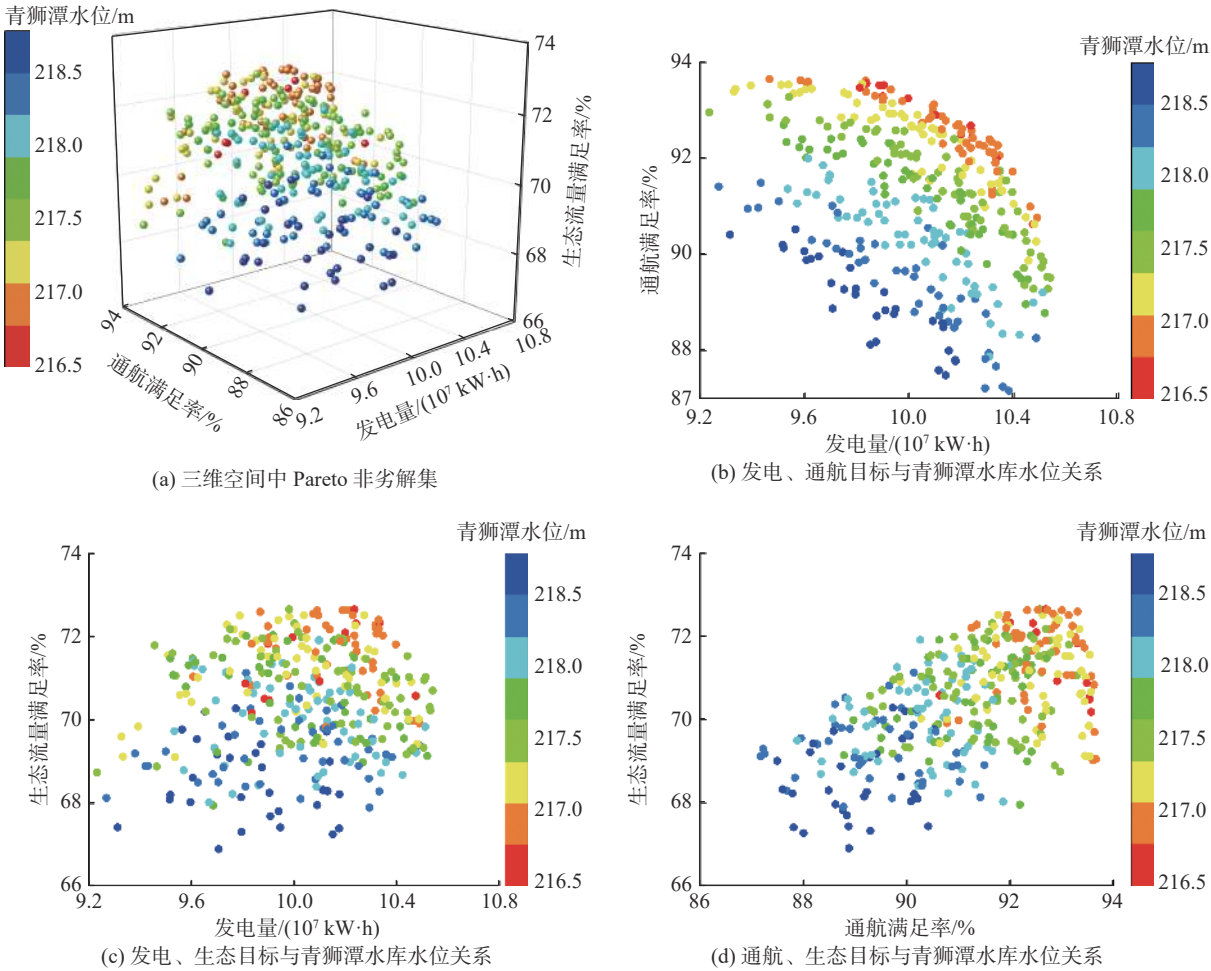


图 3 青狮潭、五里峡、思安江联合优化调度 Pareto 非劣解集(漓江二期补水工程)

Fig. 3 Non-dominated solutions of optimal joint operation of Qingshitian-Wulixia-Sianjiang Reservoirs (Lijiang River water supplement project (phase two))

3.2 不同调度模式下水库综合效益

针对典型枯、平、丰水年,对青狮潭、五里峡、思安江联合优化调度的 Pareto 非劣解集,应用模糊隶属度方法进行评价,选择模糊隶属度最大的调度方案,与多库常规调度方案(当年的实际调度情况),从发电量、通航满足率和生态流量满足率进行对比,并计算了适宜通航天数,结果见表 2。同时,为比较多库常规调度与多库优化调度模式下,漓江干流满足通航的时段,给出典型平水年漓江干流的流量过程(图 4)。

由表 2 可知,多库常规调度模式下,发电量在枯水年仅为 6.08×10^7 kW·h。通航满足率在枯水年和平水年分别为 79.94% 和 85.66%,均不超过 86%。结合图 4 可知,在典型平水年(2014 年),1 月上旬到 3 月中旬,以及 12 月下旬,均无法满足漓江二期补水工程的通航要求,其余时段可以满足。典型枯、平、丰水年生态流量满足率均不超过 80%,特别是在枯水年仅为 41.06%。

多库优化调度后,典型枯、平、丰年发电量分别增加 16.61%、3.92% 和 1.97%,通航满足率分别增加 9.8%、5.49% 和 1.97%,均维持在 89% 以上,适宜通航天数分别增加了 36、20 和 11 d。结合图 4 可知,在典型平水年(2014 年),主要增加了 3 月上旬及 12 月下旬这两个时段满足漓江二期补水工程通航要求。生态流量满足率在典型枯、平、丰水年分别增加 6.01%、4.02% 和 1.99%,均维持在 47% 以上。

3.3 不同调度模式下月平均生态流量满足率

针对平水年,分别计算青狮潭、五里峡、思安江多库常规调度,以及多库联合优化调度模式下,月平均生态流量满足率的结果(图 5)。

由图 5 可知,多库常规调度模式下,1 至 2 月,生态流量满足率均不超过 11%,特别是 1 月仅为 6%;3 月和 12 月,生态流量满足率分别为 40% 和 55%,也处于较低水平。经青狮潭、五里峡、思安江多库联合优化调度后,在 1 月和 2 月,生态流量满足率分别提高至 17% 和 16%,均维持在 16% 以上;3 月和 12 月生态流量满足率分别提高 11% 和 29%。

3.4 不同调度模式下青狮潭水库水位与蓄水量

青狮潭、五里峡、思安江多库常规调度,以及多

表 2 不同调度模式下水库综合效益对比

Tab. 2 Comparison of comprehensive benefits under different scenes

典型年	调度方式	发电量/ (10^7 kW·h)	通航满 足率/%	通航 天数/d	生态流量 满足率/%
枯水年 2011	多库常规	6.08	79.94	291	41.06
	多库优化	7.09	89.74	327	47.07
	变化量	1.01	9.80	36	6.01
平水年 2014	多库常规	9.68	85.66	312	66.77
	多库优化	10.06	91.15	332	70.79
	变化量	0.38	5.49	20	4.02
丰水年 2015	多库常规	11.18	95.73	349	79.13
	多库优化	11.40	98.70	360	81.12
	变化量	0.22	1.97	11	1.99

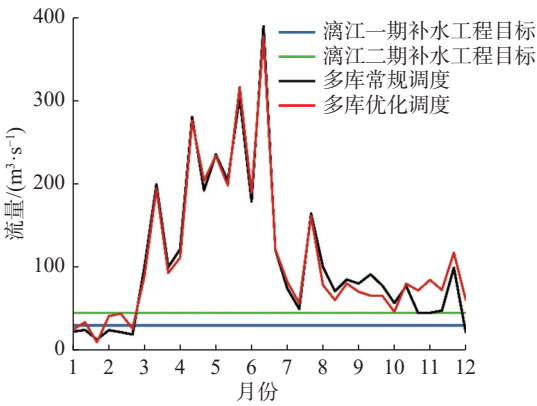


图 4 漓江干流流量(平水年 2014 年)

Fig. 4 The flow of the main stream of the Lijiang River (normal year)

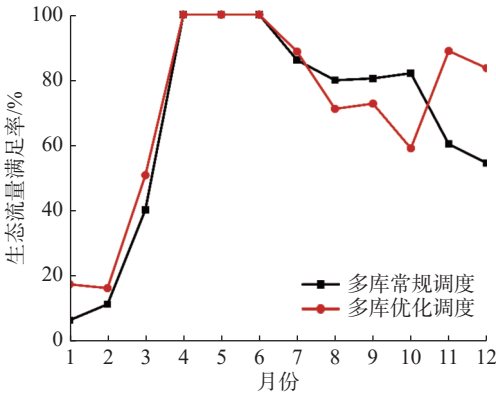


图 5 不同调度模式下月平均生态流量满足率(平水年 2014 年)

Fig. 5 Guarantee rate of monthly average ecological flow under different scenes (normal year)

库联合优化调度模式下,青狮潭水库水位年变化过程如图 6 所示。同时,为评估青狮潭水库蓄水量的变化情况,给出典型枯、平、丰水年,常规调度和优化调度模式下,青狮潭水库年平均水位以及蓄水量的对比结果,如表 3 所示。

由图 6 可知,常规调度模式下,青狮潭水库在 1 至 2 月中旬降低水位运行,2 月下旬至 7 月上旬逐步提高水位。7 月中旬开始水位又逐渐下降,至 12 月下旬降低至 215.09 m。优化调度模式下,青狮潭水库水位年变化过程与常规调度模式类似。在 1 月中旬至 4 月中旬,优化调度模式下水位比常规调度模式下水位更低,且在 2 月中旬降低至死水位 (204 m)附近。

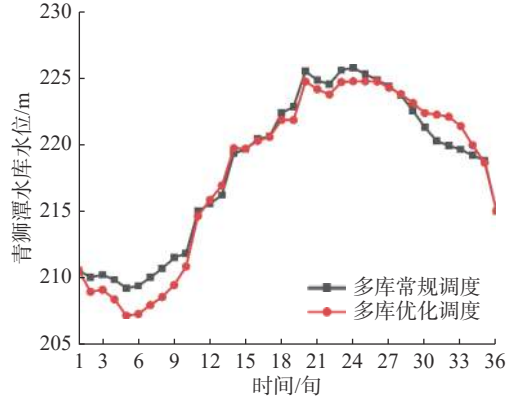


图 6 不同调度模式下青狮潭水库水位年变化情况(平水年 2014 年)

Fig. 6 Annual variation of water level of Qingshitian reservoir under different scenes (normal year)

表 3 不同调度模式下青狮潭水库年平均水位及蓄水量对比

项目	枯水年(2011)		平水年(2014)		丰水年(2015)	
	水位/m	蓄水量/10 ⁶ m ³	水位/m	蓄水量/10 ⁶ m ³	水位/m	蓄水量/10 ⁶ m ³
多库常规调度	215.78	198.68	218.28	248.77	218.95	263.27
多库优化调度	216.93	220.94	217.94	241.59	220.04	287.82
变化量	1.15	22.26	-0.34	-7.18	1.09	24.55

由表 3 可知,在典型枯、平、丰水年,优化调度模式下,青狮潭水库年平均水位与常规调度模式下比较,分别提高 1.15 m、降低 0.34 m 和提高 1.09 m,相应蓄水量变化分别增加 $22.26\times10^6\text{ m}^3$ 、减小 $7.18\times10^6\text{ m}^3$ 和增加 $24.55\times10^6\text{ m}^3$ 。

4 讨 论

4.1 不同调度模式综合效益对比

由表 2 可知,在现行的多库常规调度模式下,枯、平、丰水年发电量差异较大,特别是枯水年为 $6.08\times10^7\text{ kW}\cdot\text{h}$,仅为丰水年的 54.4%,通航满足率在枯水年和平水年均不超过 86%。由于桂林漓江风景区上观光旅游项目发达,需要全年不间断通航,可见现状通航满足率不利于漓江流域中下游的水上观光航运。同时,多库常规调度模式下的生态流量满足率在典型枯、平、丰水年均不超过 80%,特别是在枯水年仅有 41.06%,这对河流生态系统健康十分不利。

经过多库优化调度后,枯、平、丰水年在满足发电效益的同时,实现了通航满足率和生态流量满足率的全面提高。尤其是枯水年,发电量提高了 16.61%,通航满足率提高了 9.8%,这说明枯水年按照常规调度模式有较多的水量存储在水库中,工程经济效益有较大的提升空间,经过多库优化调度可显著提高工程经济效益。

结合图 4 及图 5 可发现,多库常规调度模式下,4 月至 10 月均可满足漓江二期补水工程的通航要求,生态流量满足率也维持在较高的水平。这是因为漓江流域径流量在丰水期和枯水期相差悬殊,每年 3 月至 8 月集中了 80% 以上降雨量。多库优化调度后,通航所需流量(图 4)及生态流量满足率(图 5)主要在 12 月

至次年3年份得到提升。这一时期水库加大下泄流量,降低水位运行(图6),以满足通航及生态要求。

4.2 生态调度对目标鱼类生态需水的保障

国内的生态调度研究,调度模型大多基于水文学法的生态流量构造生态目标函数^[13-17],具有操作简单、需求资料少的优势^[18-21],相应的调度方案虽然能在一定程度上满足河流内基本生态需水,但生态学意义不明确,难以较好地满足实际河流中的生态需水。本研究在调度模型的目标函数中考虑鱼类生态需水过程,反映了目标鱼类对流速、水深、水温等水文水力条件的需求,考虑鱼类在不同生长阶段的生态流量需求差异,同时一定程度上反映出河流水文情势固有的季节性变化^[22-24]。

由图5可知,常规调度模式下,在鱼类越冬期的12月至次年1月,生态流量满足率分别为55%和6%,繁殖期初期的3月份也处于较低的水平,说明常规调度方案下,越冬期的水温和水深等生境因子,以及产卵期的流速、水深和水温等生境因子,难以满足鱼类的要求。多库优化调度后,越冬期的12月至次年1月,生态流量满足率提高到84%和17%,繁殖期初期的3月维持在51%以上,4月至11月也处于较高的水平,这说明经过多库优化调度,能更好地保障目标鱼类在越冬和产卵繁殖期的生态流量需求。

4.3 青狮潭水库供水压力缓解及会仙湿地补水

典型枯水年和丰水年,多库优化调度的年平均库水位比常规调度水位高,缓解了青狮潭水库的供水压力,相应多出的蓄水量可用于会仙湿地生态补水。近年来,会仙湿地面积减小、水面萎缩、土壤退化、野生动物数量锐减甚至灭绝,生态系统已处于较为严重的衰退状态。通过青狮潭、五里峡、思安江多水库联合优化调度,对青狮潭水库现有的灌溉输水渠系进行合理改造和延长,将多库优化调度后的富余水量下泄一部分补给会仙湿地,可改善湿地环境,维持湿地健康。

同时,图6表明多库联合优化调度后,1月至3月青狮潭水库水位依旧较低,青狮潭水库的供水压力依旧较大。漓江干流下游1月至3月的通航所需流量(图4)和生态流量满足率(图5)虽有所提升,但仍维持在较低的水平。需要在漓江三期补水工程稳定运行后,形成六库联合补水的局面,从而进一步提高漓江流域水资源综合效益。

5 结 语

为实现漓江流域水资源综合效益最大化,本研究在调度模型的生态目标函数中考虑了鱼类生态需水过程,基于模糊隶属度方法提出平衡发电、通航、生态和青狮潭水库蓄水综合效益的调度方案。结果表明:

(1)优化调度对比常规调度,能从流域整体出发实现各库之间的流量协调,使发电、通航和生态效益得到全面提升。

(2)调度模型的目标函数中考虑鱼类生态需水过程,能更好地保障漓江干流下游目标保护鱼类光倒刺鲃的生态需水要求,尤其保障了12月至次年3月鱼类越冬、产卵和繁殖期的生态流量需求,对漓江河流生态系统的改善和保护起到了非常重要的作用。

(3)实行漓江并联水库群联合调度后,青狮潭水库的蓄水量在典型枯水年和丰水年分别增加 $22.26 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $24.55 \times 10^6 \text{ m}^3$,缓解了青狮潭水库的供水压力。

参 考 文 献:

- [1] 方国华,丁紫玉,黄显峰,等.考虑河流生态保护的水电站水库优化调度研究[J].水力发电学报,2018,37(7):1-9.(FANG Guohua, DING Ziyu, HUANG Xianfeng, et al. Optimization of hydropower reservoir operation considering river ecological protection[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(7): 1-9. (in Chinese))
- [2] CHEN D, CHEN Q W, LEON A S, et al. A genetic algorithm parallel strategy for optimizing the operation of reservoir with

- multiple eco-environmental objectives[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(7): 2127-2142.
- [3] DAI L Q, DAI H C, LIU H B, et al. Development of an optimal model for the Xiluodu-Xiangjiaba cascade reservoir system considering the downstream environmental flow[J]. *Sustainability*, 2020, 12(3): 966.
- [4] YU Y, WANG C, WANG P F, et al. Assessment of multi-objective reservoir operation in the middle and lower Yangtze River based on a flow regime influenced by the Three Gorges Project[J]. *Ecological Informatics*, 2017, 38: 115-125.
- [5] 陈悦云, 梅亚东, 蔡昊, 等. 面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度研究[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 628-638. (CHEN Yueyun, MEI Yadong, CAI Hao, et al. Multi-objective optimal operation of key reservoirs in Ganjiang River oriented to power generation, water supply and ecology[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(5): 628-638. (in Chinese))
- [6] 何素明, 谭乔凤, 雷晓辉, 等. 漓江实时补水优化调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 98-103. (HE Suming, TAN Qiaofeng, LEI Xiaohui, et al. Real-time water-ssupply optimal operation in Li River Basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(4): 98-103. (in Chinese))
- [7] 李高岩, 韩松霖, 梁士楚, 等. 漓江光倒刺鲃金线鲃保护区鱼类资源现状调查[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2011, 29(1): 66-71. (LI Gaoyan, HAN Songlin, LIANG Shichu, et al. Natural fish resources investigation of Lijiang national aquatic germplasm resources reserve for *Spinibarbus hollandi* and *Sinocyclocheilus*[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 29(1): 66-71. (in Chinese))
- [8] 李若男. 鱼类生境模型及河流生态流量研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010. (LI Ruonan. Research of fish habitat model and ecological flow[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese))
- [9] 王瑞玲, 黄锦辉, 葛雷, 等. 基于黄河鲤鱼栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1175-1187. (WANG Ruiling, HUANG Jinhui, GE Lei, et al. Study of ecological flow based on the relationship between cyprinus carpio habitat hydrological and ecological response in the lower Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1175-1187. (in Chinese))
- [10] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 577-601.
- [11] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part II: handling constraints and extending to an adaptive approach[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 602-622.
- [12] 俞阳. 三峡水库多目标生态调度模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2019. (YU Yang. Study on multi-objective ecological operation model of Three Gorges Reservoir[D]. Nanjing: Hohai University, 2019. (in Chinese))
- [13] HE W, MA C, ZHANG J, et al. Multi-objective optimal operation of a large deep reservoir during storage period considering the outflow-temperature demand based on NSGA-II[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124919.
- [14] 吕巍, 王浩, 殷峻暹, 等. 贵州境内乌江水电梯级开发联合生态调度[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 918-927. (LÜ Wei, WANG Hao, YIN Junxian, et al. On ecological operation of cascade hydropower stations along Wujiang River in Guizhou Province[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(6): 918-927. (in Chinese))
- [15] 林伟, 李英海, 郭家力, 等. 清江梯级发电与生态均衡优化调度研究[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(3): 9-16. (LIN Wei, LI Yinghai, GUO Jiali, et al. Optimizing operation of the Qingjiang cascaded hydropower stations: balancing power generation and ecological regulation[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(3): 9-16. (in Chinese))
- [16] 蔡卓森, 戴凌全, 刘海波, 等. 兼顾下游生态流量的溪洛渡-向家坝梯级水库蓄水期联合优化调度研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(9): 31-38. (CAI Zhuosen, DAI Lingquan, LIU Haibo, et al. Optimizing joint dispatching of Xiluodu-Xiangjiaba cascade reservoirs in consideration of appropriate downstream ecological flow in storage period[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(9): 31-38. (in Chinese))
- [17] 黄志鸿, 董增川, 周涛, 等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 202-208. (HUANG Zhihong, DONG Zengchuan, ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(3): 202-208. (in Chinese))
- [18] 刘树锋, 陈记臣, 关帅. 基于改进FDC法的小水电生态流量计算与生态调度研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(8): 29-34.

- (LIU Shufeng, CHEN Jichen, GUAN Shuai. Ecological flow calculation and ecological operation of small hydropower based on modified flow duration curve method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(8): 29-34. (in Chinese))
- [19] YANG Z, YANG K, HU H, et al. The cascade reservoirs multi-objective ecological operation optimization considering different ecological flow demand[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(1): 207-228.
- [20] YANG Z, YANG K, SU L W, et al. The multi-objective operation for cascade reservoirs using MMOSFLA with emphasis on power generation and ecological benefit[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2019, 21(2): 257-278.
- [21] 高雪山, 刘树锋, 贾建辉, 等. 基于生态水力半径法的武江流域生态流量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(2): 8-12, 18. (GAO Xueshan, LIU Shufeng, JIA Jianhui, et al. Research on ecological instream flow of Wujiang River Basin based on ecological hydraulic radius approach[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(2): 8-12, 18. (in Chinese))
- [22] CHEN Q W, CHEN D, LI R N, et al. Adapting the operation of two cascaded reservoirs for ecological flow requirement of a de-watered river channel due to diversion-type hydropower stations[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 252: 266-272.
- [23] LI R N, CHEN Q W, TONINA D, et al. Effects of upstream reservoir regulation on the hydrological regime and fish habitats of the Lijiang River, China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 75-83.
- [24] LI R N, CHEN Q W, YE F. Modelling the impacts of reservoir operations on the downstream riparian vegetation and fish habitats in the Lijiang River[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2011, 13(2): 229-244.

Ecological operation of Lijiang parallel reservoirs considering ecological flow requirement of fish

YANG Peisi^{1,2}, WANG Li³, MO Kangle¹, CHEN Qiuwen¹, LI Ting¹, ZENG Chenjun¹, TANG Lei¹, ZHANG Hui¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *College of Hehai, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*)

Abstract: The joint operation of reservoirs brings huge economic and social benefits, and also has a lot of impacts on the river ecology. In order to improve the comprehensive benefits of power generation, navigation, ecology and Qingshitan Reservoir storage of the joint operation of Lijiang parallel reservoirs, the multi-objective parallel reservoirs operation model considering ecological flow requirement of fish is developed. The model is optimized by Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm-III. The results show that: (1) Compared with regular operation, parallel reservoirs optimal operation can ensure the benefit of power generation, and guarantee the benefit of navigation and ecology at the same time. (2) The constructed multi-objective parallel reservoir ecological operation model maintains the rate of ecological flow requirement above 47% in dry, normal and wet years. In particular, the ecological demand of fish during the winter, spawning and breeding periods is guaranteed. (3) The implementation of joint operation of the Lijiang parallel reservoirs can alleviate the pressure of water supply of Qingshitan Reservoir, and increase the reservoir storage in dry and wet years by $22.26 \times 10^6 \text{ m}^3$ and $24.55 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectively. This study can provide a reference for multi-objective ecological operation of parallel reservoirs.

Key words: ecological flow requirement; multi-objective; reservoir ecological operation; parallel reservoirs; Lijiang River