

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.010

考虑天然水文情势的水库调度图优化

高玉琴¹, 周桐¹, 马真臻², 肖璇³, 赵晨程¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038;
3. 青岛市水利勘测设计研究院有限公司, 山东 青岛 266061)

摘要:以河流整体水文改变度最小为生态目标, 广义缺水指数最小为经济社会供水目标, 构建了考虑天然水文情势的水库调度规则优化模型。以三亚市大隆水库为实例, 基于 NSGA-II 优化算法进行模型求解, 得到大隆水库调度规则优化方案, 分别从经济社会供水和生态水文指标改变情况对不同调度规则进行分析, 确定兼顾经济社会供水和河流生态的调度规则优化方案作为大隆水库调度规则推荐方案。

关键词:水文情势; 水库调度规则; 水库调度图; IHA-RVA; 水文改变度; 广义缺水指数

中图分类号:TV697.1+1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)04-0060-08

Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime//GAO Yuqin¹, ZHOU Tong¹, MA Zhenzhen², XIAO Xuan³, ZHAO Chencheng¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Qingdao Water Conservancy and Design Institute Co., Ltd., Qingdao 266061, China)

Abstract: With the minimum overall hydrological change degree as the ecological goal and the minimum generalized water shortage index as the economic and social water supply goal, an optimization model of reservoir operation rules considering natural hydrological regime was established. Taking the Dalong Reservoir in Sanya City as an example, the optimization scheme of Dalong Reservoir operation rules is obtained based on the NSGA-II optimization algorithm. According to the change of economic and social water supply and eco-hydrological index, different operation rules are analyzed, and the optimal operation rules considering economic and social water supply and river ecology are determined as the recommended scheme of Dalong Reservoir operation rules

Key words: hydrological regime; reservoir operation rules; reservoir operation chart; IHA-RVA; hydrological change degree; generalized water shortage index

河流天然水文情势在维持河流本土生物多样性和生态系统完整性方面发挥着至关重要的作用^[1]。修建水库、蓄水兴利一直是人类开发河流水资源的主要手段。传统意义上的水库调度方式在发挥水库综合效益的同时,也改变了河流天然水文情势,危及河流健康及区域生态安全^[2-4]。近年来,人们越来越意识到了河流生态系统保护的重要性,水库生态调度及规则优化研究逐渐成为水资源学、生态学方面的研究热点。国内外专家学者在传统的水库优化调度模型中引入包括水文改变度和生态流量在内的生态指标。通常情况下,根据生态指标及其作用的不同,水库调度生态模型可以分为3类:生态流量为约

束条件的模型、生态流量为优化目标的模型、生态水文指标变化程度为优化目标的模型。

国内对水库生态调度的研究主要集中在将生态流量作为约束条件或优化目标的两类模型上^[5]。目前国内外生态需水量的计算方法主要有水文指数法、水力学法、栖息地法、整体分析法、变动范围法(range variable approach, RVA)等^[6]。本文采用的是生态水文变化指标变化范围法(IHA-RVA)。

以生态流量为约束条件的模型中,生态流量作为一个新的约束条件,河道流量不小于生态流量。艾学山等^[7]建立了水库生态调度多目标模型,实现了对现行水库调度的改进和完善;徐淑琴等^[8]为了

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20181310);中央高校基本科研业务费专项(2019B45314);国家自然科学基金(51609261)

作者简介:高玉琴(1977—),女,副教授,博士,主要从事防洪与洪涝灾害、风险控制研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn。

降低水库对河流生态系统的影响,指出可以尝试将生态流量约束逐步放大到适宜生态流量,为水库生态调度提出了更高的要求;王立明等^[9]根据干旱风沙河道生态修复目标,结合水库的防洪、兴利、生态调度,建立了多目标水库生态调度模型,研究了漳河岳城水库的生态调度。而以生态流量为优化目标的模型并不要求生态流量的满足程度有多高。马真臻^[10]设计了黄河干流整体改变度函数作为生态目标,为保护流域生态环境的生态调度提供了有益参考;方国华等^[11]提出了兼顾生态与经济的水库生态调度优化模型,引入了生态保护程度的概念;杨哲等^[5]将生态流量划分为3个等级,以清江梯级水库群为研究对象构建了多目标优化调度模型,提出CNSFLA算法,提高了水库群生态优化调度质量。

国内外学者在对以生态水文指标变化程度作为优化目标的模型研究中,广泛应用了IHA-RVA法来研究水文情势评价。IHA-RVA法最早由Richter等^[12]提出,用来反映河流流量受人类活动影响的变化程度。Shiau等^[13]在评价高屏水库的建设对河流水文情势的影响程度时也运用了IHA-RVA法,并采用NSGA-II算法进行模型优化,建立了整体改变度函数,对河流水文情势的整体改变情况有了初步认识。国内学者由此受到启发,张洪波^[14]构建了黄河生态水文指标体系,采用了IHA-RVA法从长期指标、年内变化、高低流量、涨落指标、极值指标、发生时间和大洪水等7个方面表征河流年内的流量变化特征,量化了河流生态水文系统的健康状态;Yin等^[15]按照最小放水原则重新设计了水库调度图,找到了使水文改变度最小的各个参数值,得到了优化后的水库调度图;刘悦忆^[6]建立了考虑水库经济、生态效益的多目标风险规则调度模型;程俊翔等^[16]对IHA-RVA法在生态水文研究中的应用进行了总结;高超^[17]将多年月平均生态改变度最小作为生态目标,构建了澜沧江下游中长期生态调度模型,采用遗传算法进行优化,得到了发电与生态目标之间的变化关系。

上述研究虽然在水库生态调度优化领域中取得了一定的成果,但仍存在着不足:大都是利用水文统计方法求出最小生态需水量和适宜生态需水量,将之作为水库优先下泄水量,然后作为生态约束或目标函数之一计算生态满足程度,而没有评价并降低由于水库运行带来的天然水文情势的改变程度。本文针对供水型水库构建面向恢复天然水文情势的水库调度规则优化模型,将最小生态需水量作为优化变量,并以河流整体水文改变度最小作为生态目标,以广义缺水指数最小作为经济社会供水目标,寻求

实现经济社会和河流生态共赢的调度规则优化方案。

1 水库调度规则优化模型

1.1 模型框架

调度图是水库调度过程中决策变量(电站出力、供水量、下泄量等)与状态变量(库水位、入库流量、时间等)之间的关系线图,由各种调度线及若干调度分区组成,可以清晰、直观、科学地指导水库调度^[18]。Oliveira等^[19]将遗传算法应用于具有综合利用要求的水库调度图制定中;Chang等^[20]优化了现行的M-5型水库调度曲线。而早在1964年以前,就提出了以供水为目标的水库调度图,即M-5型水库调度图,这是在水库规划设计阶段经过反复试验得到的。本文采用这种以供水为目标的水库调度图。供水型水库调度图(图1)包括3条调度规则曲线,即上调度线、下调度线和关键调度线^[20],模型的优化变量共20个,包括图1中的水库供水期库容 V_1 、水库蓄水期库容 V_2 、枯水期末时间 T_1 、汛期初时间 T_2 、汛期末时间 T_3 、枯水期初时间 T_4 、Ⅱ区的供水减少率 a 、Ⅲ区的供水减少率 b ,以及各月日均最小生态需水量 $E_1 \sim E_{12}$ 。图1中,正常库容指正常蓄水位所对应的水库库容,汛限库容指防洪限制水位对应的水库库容。

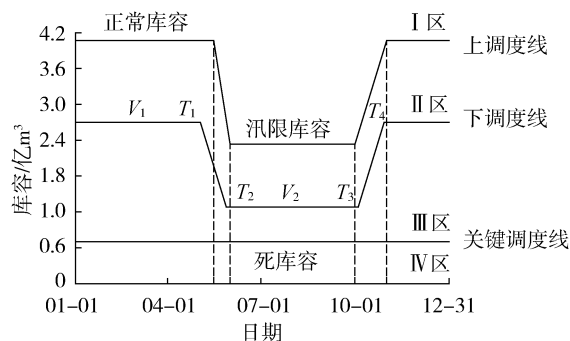


图1 水库调度规则曲线

Fig.1 Reservoir operation rule curves

面向恢复天然水文情势的水库调度规则包括生态水量下泄规则、供水规则和弃水规则3部分,水库调度规则流程见图2。图2中, R_{ij} 为第 j 年 第 i 天的入库水量, V_{ij} 为第 j 年 第 i 天的初始库容, V_d 为水库的死库容, E_m 为 m 月日均最小生态需水量, $X_{ij,1}$ 为第 j 年 第 i 天优先下泄到河道中的水量, X_{ij} 为第 j 年 第 i 天的水库总下泄水量, G_{ij} 为第 j 年 第 i 天的水库供水量, C_{ij} 为第 j 年 第 i 天的城镇需水量, N_{ij} 为第 j 年 第 i 天的农业灌区需水量, $X_{ij,2}$ 为第 j 年 第 i 天的水库弃水量; $V_{ij,s}$ 为第 j 年 第 i 天水库上调度线对应库容,Ⅱ区和Ⅲ区供水减少率 a 和 b 的关系为 $0 < a < b < 1$ 。

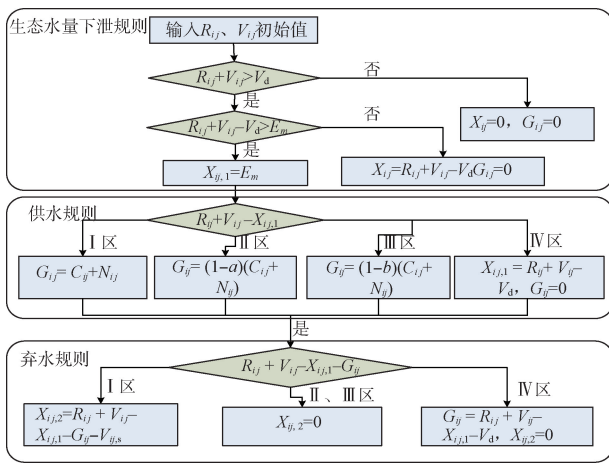


图2 水库调度规则流程

Fig. 2 Flow chart of reservoir operation rules

1.2 目标函数

考虑生态的水库调度常规优化模型一般寻求使水库调度所产生的经济-生态效益、社会-生态效益或经济-社会-生态综合效益达到最大^[7,21]。具体的目标函数和约束条件表述如下:经济效益用水库向各用水户供水所取得的效益来衡量;社会效益分为防洪效益和供水效益,其中防洪效益指水库向下游的泄流量超出下游各控制断面安全泄流量的和最小;供水效益是指水库向各供水对象的供水量与满足各供水对象基本生产生活需要的用水量之间的差值最小。生态效益涉及两个方面,即河流流量的稳定性和河流水质优。河流流量的稳定性是指水库向下游的泄流量接近多年平均值,有利于河流生态系统保持长期稳定健康发展;河流水质优是指河流中污染物的浓度加权和达到最小。

1.2.1 生态目标

河流水文情势是指河流的各水文要素随时间和空间的变化情况,其中水文要素包括流量、水温、水质和含沙量等^[23-24]。流量过程作为河流生态系统演化的主要驱动力之一,其变化将会使下游河道受到不同程度的冲刷,改变水生生物的生境,甚至威胁其生存。IHA-RVA中的水文变化指标体系(IHA)采用33个水文参数,这些参数共分为5组,考虑径流的流量、时序、频率、历时和变化率5个特性,并且每组参数都具有特定的生态影响^[25-26]。其中RVA目标范围是各水文变化指标的正常范围,以发生概率的75%和25%为上、下界^[27]。

水库调度的生态目标是使得河流整体水文改变度 D 最小,即,

$$f_1 = \min D = \min \sqrt{\frac{1}{33} \sum_{n=1}^{33} D_n^2} \quad (1)$$

$$D_n = \frac{N_{on} - N_{en}}{N_{en}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: D_n 为第 n 个IHA指标的水文改变度; N_{on} 为水库干扰水文指标后第 n 个IHA指标落在RVA范围内的年数; N_{en} 为 N_T (N_T 为水库干扰水文指标后的时间)年内预期落在RVA范围内的年数,用正常变化范围(75%~25%) N_T ^[28]计算。对改变度计算结果划分等级,若其绝对值处于0~0.33之间,则称为低度改变;若处于0.33~0.67之间,称为中度改变;处于0.67~1之间,称为高度改变。

1.2.2 经济社会供水目标

美国陆军工程兵团提出的缺水率 R_{DR} 和日本水资源开发公共中心提出的缺水百分比日指数 D_{DPD} 是使用较为广泛的缺水指数,但是这两个指数都只从一个角度来定义缺水,Hsu^[29]在此基础上提出了广义缺水指数 I_{GSI} ,该指数既考虑了缺水的重要特征,也考虑了相关的经济社会影响,将 I_{GSI} 最小作为经济社会供水目标,来衡量经济社会用水的缺水程度^[30]。计算公式为

$$R_{DRj} = \frac{T_{TDj}}{S_{DWSj}} \quad (3)$$

$$D_{DPDj} = \sum_{j=1}^N R_{DRj} D_{NDDj} \quad (4)$$

$$I_{GSI} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{D_{DPDj}}{100 D_{DVj}} \right)^k \quad (5)$$

式中: R_{DRj} 为第 j 年缺水率; T_{TDj} 为第 j 年总缺水量; S_{DWSj} 为第 j 年计划供水量; D_{DPDj} 为第 j 年缺水百分比日指数; D_{NDDj} 为第 j 年的缺水天数; N 为研究的时间系列样本总年数; D_{DVj} 为第 j 年的总天数; k 为反映缺水对社会经济影响的指数,缺水影响越严重则 k 越大,通常情况下 $k = 2$ ^[28]。

由于 I_{GSI} 可以综合反映供水保证率和缺水强度,因此,本文采用 I_{GSI} 来描述经济社会用水的缺水程度, I_{GSI} 值在0~1之间。

总的来说,水库调度的目标为

$$\min F = \min(f_1, f_2) \quad (6)$$

$$\text{其中 } f_2 = \min I_{GSI} = \min \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{D_{DPDj}}{100 D_{DVj}} \right)^2 \right]$$

式中: F 为整体目标函数; f_1 为生态目标; f_2 为经济社会供水目标。

1.3 约束条件

a. 水库水量平衡方程:

$$V_{i+1,j} = V_{ij} + R_{ij} - X_{ij,1} - X_{ij,2} - G_{ij} - L_{ij} \quad (7)$$

式中: V_{ij} 、 $V_{i+1,j}$ 分别为第 j 年第 i 天和第 $i+1$ 天水库的初始库容; L_{ij} 为第 j 年第 i 天水库的蒸发渗漏损失量。

b. 水库库容约束:

$$V_{ij, \min} \leq V_{ij} \leq V_{ij, \max} \quad (8)$$

式中: $V_{ij,\min}$ 为第 j 年第 i 天水库允许的最小库容, $V_{ij,\max}$ 为第 j 年第 i 天水库允许的最大库容。汛期时, $V_{ij,\max}$ 为汛限库容; 在非汛期时, $V_{ij,\max}$ 为正常库容, $V_{ij,\min}$ 为死库容。

c. 优化变量约束:

$$\begin{cases} V_d \leq V_1 \leq V_n \\ V_d \leq V_2 \leq \min(V_f, V_1) \\ T_s \leq T_1 \leq T_2 \leq T_3 \leq T_4 \leq T_e \\ 0 < a < b < 1 \\ E_{m,\min} \leq E_m \leq E_{m,\max} \quad (m = 1, 2, \dots, 12) \end{cases} \quad (9)$$

式中: V_n 为水库的正常库容; V_f 为水库的汛限库容; T_s 为汛期开始时间; T_e 为汛期结束时间; $E_{m,\min}$ 为 m 月日均最小生态需水量的下限, 取数据系列中 m 月日径流量的最小值; $E_{m,\max}$ 为 m 月日均最小生态需水量的上限, 取 m 月 10% 频率对应的平均日径流量。

d. 各变量非负约束。涉及的变量均不小于 0。

2 优化模型求解方法

非支配排序遗传算法 NSGA 改进了传统意义上的遗传算法, 使得求解性能有了一定的提高, 是多目标研究领域中最具代表性的求解算法之一^[31], 但在长期的实际应用中发现仍然存在计算复杂度高、没有精英策略、需要指定共享半径的不足。Deb 等^[32-33]在 NSGA 的基础上继续改进, 提出了 NSGA-II 优化算法, 成功解决了上述问题, 使计算复杂度大大降低, 且保持种群多样性, 使最佳个体不会丢失, 在处理多目标优化问题上具备更好的性能。本文采用 NSGA-II 优化算法进行水库调度规则优化模型的求解。NSGA-II 优化算法以其快速的非劣解分类方法、拥挤距离计算方法和精英保留策略大大提高了计算速度, 使解的扩展性和收敛性更好^[34]。将种群中每个个体表示为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{20}\}$, 基于 NSGA-II 的水库调度规则优化模型求解流程如图 3 所示。

3 实例分析

3.1 研究区概况

宁远河发源于海南省保亭黎族苗族自治县西部毛感乡仙安石林南麓, 干流全长 83.5 km, 是琼南最长的河流, 也是海南岛除南渡江、昌化江、万泉河以外的第四大河, 于三亚市崖州区港门村注入南海, 控制集雨面积 1 020 km²。流域属热带海洋性季风气候, 水汽充足, 湿热多雨, 流域内设有雅亮水文站 1 处、雨量站 11 处。大隆水库位于宁远河中下游河段, 是一个以防洪、供水、灌溉为主, 结合发电的大 II 型水利枢纽工程, 也是海南省南部水资源调配的重

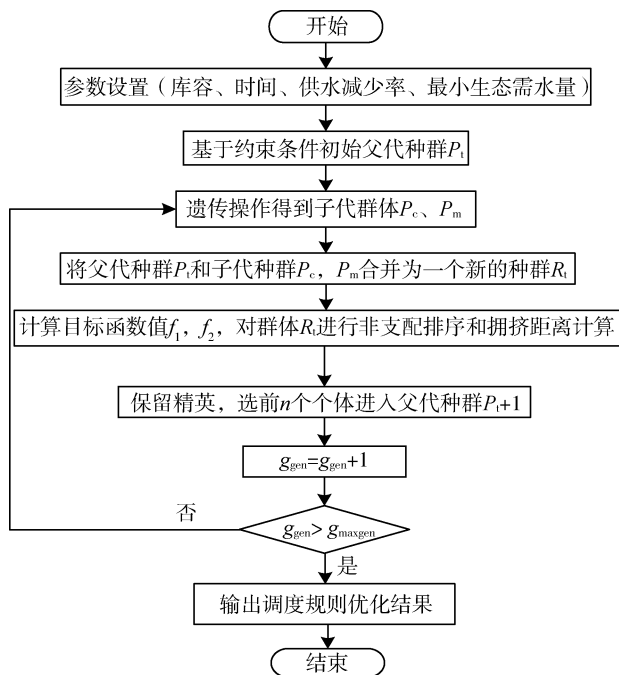


图 3 基于 NSGA-II 的水库调度规则优化模型求解流程

Fig. 3 Optimization process of reservoir operation rules based on NSGA-II

点工程^[35]。水库总库容 46 800 万 m³, 正常蓄水位 70.0 m, 相应库容 39 300 万 m³; 死水位 33.0 m, 相应库容 6 841 万 m³。大隆水库主要解决三亚市西部城镇用水、部分中部城镇用水和大隆灌区的农业用水, 水库现行调度方式以防洪调度和兴利调度为主, 防洪限制水位分两级控制, 即 6—9 月主汛期和 10 月后汛期, 对应的水库库容分别为 24 800 万 m³ 和 35 316 万 m³。11 月至翌年 5 月水库水位不超过正常蓄水位 70.0 m, 全年水位不低于死水位 33 m。

3.2 数据基础

3.2.1 经济社会需水预测

根据资料条件和现实需求, 选择 2020 年为规划水平年。基于对三亚市近年用水情况和未来用水趋势的分析, 对大隆水库供水对象 2020 年的经济社会需水进行预测。

a. 城镇需水预测。城镇需水采用趋势外推法进行预测, 2020 年大隆水库城镇用水户的需水量为 193.09 万 m³, 其中西部区域需水量为 53.48 万 m³, 占总需水量的 27.7%; 中部区域需水量为 139.59 万 m³, 占总需水量的 72.3%。

b. 农业需水预测。大隆灌区的现有面积灌溉 4 900 hm², 另规划灌溉 8 320 hm², 其中耕地 6 287 hm², 热作园地 2 033 hm², 到 2020 年全面对灌区实现灌溉, 灌溉面积达 13 220 hm²。大隆灌区的主要农作物为水稻, 由《三亚市双季水稻亩灌溉定额》根据灌区内沙壤土、壤土和黏壤土的面积分布情况可得到灌

区农业需水旬分配过程,逐日需水过程可由旬分配过程采用旬内平均的方式得到。

3.2.2 天然日流量系列

水库上游雅亮站以上人类活动较少,因此可用雅亮站日流量实测系列作为评价水文情势改变度的天然参照系列。鉴于大隆水库建库时间较短,选用水库建成前 1973—2002 年共 30 年的逐日实测流量系列作为模型输入数据,得出调度规则优化后流量,与天然流量作对比。

3.2.3 水库蒸发渗漏损失

水库日渗漏损失量取为水库日初始库容的 0.8%。由于宁远河流域水汽充足,湿热多雨,不利于水面蒸发,因此不考虑蒸发损失。

3.2.4 NSGA-II 算法参数设置

群体数为 50,迭代次数 $g_{gen} = 200$,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1。

3.3 模型优化结果

整体水文改变度 D 的取值范围为 $[0.6865, 0.7532]$,广义缺水指数 I_{GSI} 的取值范围为 $[0.0183, 0.1159]$ 。图 4 中 A,B,C 3 点分别代表了 3 个典型调度规则优化方案,C 点表示河流整体水文改变度最小的优化方案,A 点表示广义缺水指数最小的优化方案,B 点表示欧式距离最小的优化方案。另外,模拟了水库在现行调度方式下的运行效果,表 1 为不同调度规则下目标函数取值情况,表 2 为 3 个典

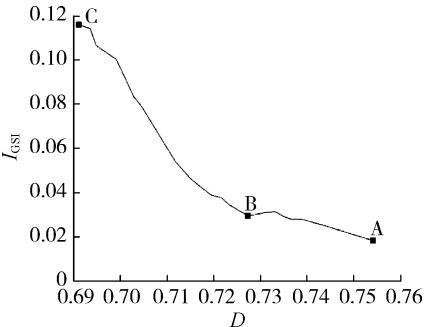


图 4 大隆水库调度规则优化结果
Fig.4 Optimization results of Dalong Reservoir operation rules

型调度规则优化方案各变量取值情况。

表 1 不同调度规则下目标函数取值情况

Table 1 The value of the objective function under different scheduling rules

方案	D	I_{GSI}
A	0.7532	0.0183
B	0.7264	0.0295
C	0.6865	0.1159
现行调度方式	0.8665	0.0035

各典型优化方案下的调度规则曲线见图 5。3 个方案的下调度线在非汛期差别较大,由于非汛期来水较少,却是三亚市旅游旺季,经济社会需水增加,若使缺水程度小,则要求水库的下调度线尽量处于较高位置,但不能超过上调度线。

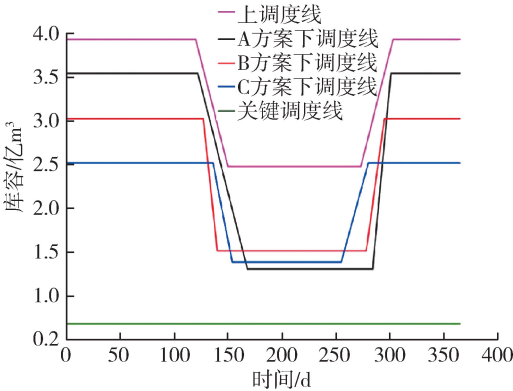


图 5 3 个典型优化方案的调度规则曲线
Fig.5 Operation rule curves of three typical optimization schemes

水库多年日平均入流与逐月日均最小生态需水量见图 6。从图 6 可见,逐月日均最小生态需水量变化趋势与多年平均入库水量变化趋势基本一致,1—5 月呈缓慢下降趋势,6—9 月呈上升趋势,9 月达到最大,10—12 月急剧下降,且二者之间会呈现一定的比例关系。

3.4 对比分析

为了进一步对比不同调度规则的效果,从经济社会供水和水文情势改变情况两个角度对大隆水库 3 种典型调度规则优化方案以及现行调度方式进行

表 2 3 个典型调度规则优化方案各变量取值

Table 2 Values of variables in three typical scheduling rule optimization schemes

方案	$V_1/\text{万 m}^3$	$V_2/\text{万 m}^3$	T_1/d	T_2/d	T_3/d	T_4/d	a	b	$E_1/\text{万 m}^3$	$E_2/\text{万 m}^3$
A	35424.90	13070.34	122	169	284	302	0.106	0.163	14.63	8.48
B	30236.04	15158.74	127	141	278	296	0.129	0.235	16.29	15.13
C	25209.27	13875.14	136	155	255	281	0.137	0.394	33.41	29.95
方案	$E_3/\text{万 m}^3$	$E_4/\text{万 m}^3$	$E_5/\text{万 m}^3$	$E_6/\text{万 m}^3$	$E_7/\text{万 m}^3$	$E_8/\text{万 m}^3$	$E_9/\text{万 m}^3$	$E_{10}/\text{万 m}^3$	$E_{11}/\text{万 m}^3$	$E_{12}/\text{万 m}^3$
A	7.26	6.68	10.06	47.16	60.03	74.57	144.10	82.18	48.35	26.29
B	14.02	13.46	27.16	70.22	112.14	144.23	191.48	98.50	41.84	29.80
C	26.15	16.40	29.88	125.34	179.38	234.11	240.58	122.23	56.70	41.53

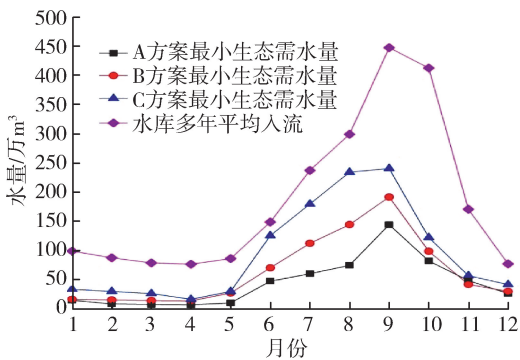


图6 水库多年日平均入流与逐月日均最小生态需水量

Fig. 6 The yearly average daily inflow of the reservoir and the minimum daily ecological water demand by month 对比分析。

3.4.1 经济社会供水情况

由表1可知,现行调度方式、方案A、方案B、方案C的广义缺水指数 I_{GSI} 逐渐增大,说明经济社会缺水程度逐渐加大,现行调度方式由于没有考虑生态需水,优先且最大限度地向经济社会供水,因此,它的供水保证率最高,缺水率最小。对于不同代表年,不管是从缓解供水紧张的局面还是解决高峰用水问题的角度,方案A均优于其他两个方案,而方案B要优于方案C。方案A、B、C的供水保证率逐渐降低,而年缺水总量呈逐渐增加的趋势。另外,需

水高峰时,特枯年很难满足经济社会用水需求,偏枯年和平水年基本能满足需求。对比图7(c)(d),发现平水年现行调度方式比方案A更能保障经济社会用水需求。

3.4.2 建库前后水文情势变化

在C方案下河流整体水文改变度最小为0.6865,现行调度方式下河流整体水文改变度最大,为0.8665。可见不考虑生态因素的调度方式对河流水文情势的影响显著,对河流健康造成极大威胁,因此,考虑生态水文情势,开展水库生态调度研究具有十分重要的现实意义。根据IHA-RVA法的各水文指标改变度对A、B、C方案下生态水文情势变化进行分析:

a. 月平均流量大小。大隆水库建成后,在12月、次年1月和3月流量则呈现出显著增加趋势,3月增加量最少,12月增加量最多;在5—10月流量呈现出减少趋势,5月减少量最少,10月减少量最多。分析原因,与水库的调节作用有直接关系,在非汛期,增加下泄流量腾出库容为汛期水库蓄水做好准备;在汛期,水库则会蓄水减少下泄流量,径流在年内分配趋于平坦。

b. 年极端流量大小。除年均90d最小、最大流量外,其余指标较建库前均有较大改变,建库后年均

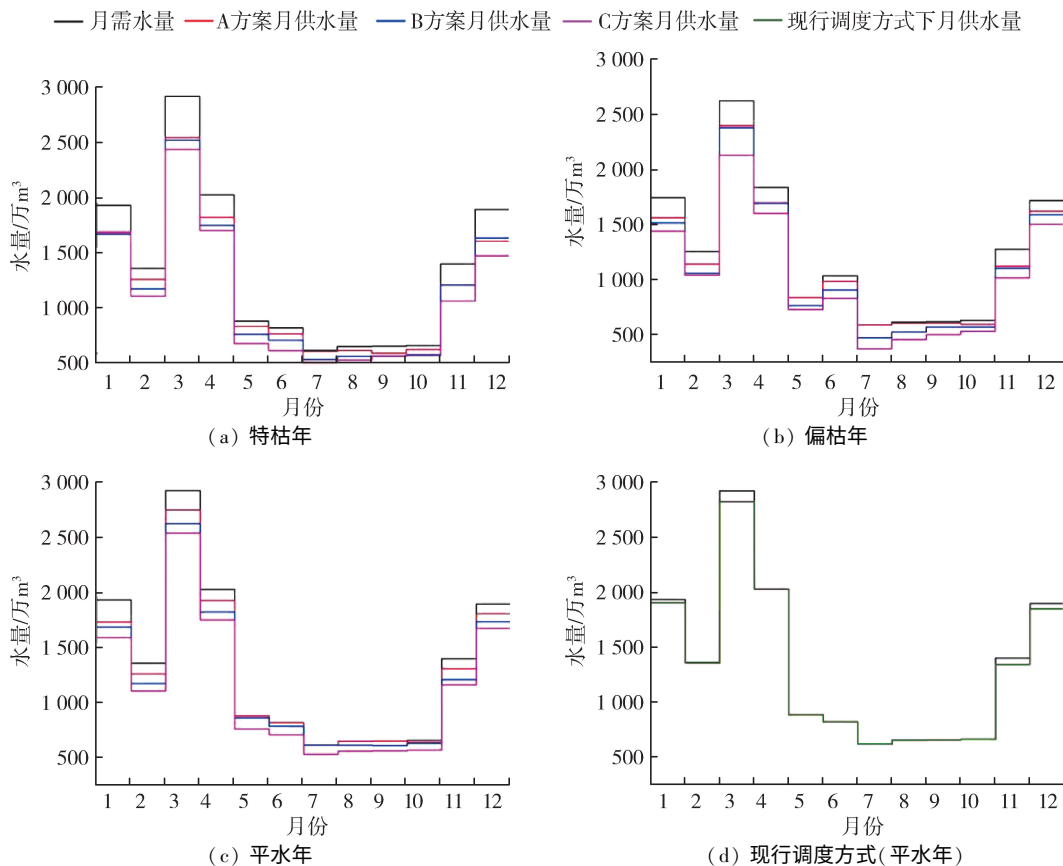


图7 不同调度规则下月供需情况

Fig. 7 Monthly supply and demand situation under different operation rules

30 d 最小流量相对于建库前分布更加离散,年际间变化较大,为高度改变。

c. 年极端流量发生时间。年 1 d 最大流量出现时间和年 1 d 最小流量出现时间在建库后均有所提前,年 1 d 最大流量出现时间由建库前的 8 月下旬提前至 7 月下旬,整体均有所提前,为低度改变;年 1 d 最小流量出现时间由建库前的 5 月上旬提前至 4 月上旬,且多数年份分布在下限附近,为高度改变。年极端流量发生时间的变化范围均在 1 个月左右,可见建库后与建库前相比,差异较大。

d. 高低流量频率与历时。高低流量脉冲事件次数在建库后均有所减小。

e. 水流条件变化速率与频率。上升率和下降率均为中度改变,上升率在建库后有明显减小,下降率基本无变化,逆转次数为高度改变,由此可见,水库的修建及运行对逆转次数的改变尤为明显。

3.4.3 大隆水库调度规则推荐方案选择

选择经济社会和河流生态达到共赢的方案作为最优方案,广义缺水指数和整体水文改变度均达到相对最小,经济社会和河流生态可达到平衡状态,是较为理想的结果。在图 4 中,B 点处欧式距离最小,故将该点代表的方案作为大隆水库调度规则推荐方案。

4 结 论

a. 现行调度方式能最大限度地保证经济社会供水,但会使河流天然水文情势发生显著变化,将会威胁到河流生态系统健康稳定发展。

b. 相较方案 B、C,方案 A 能较好地满足经济社会供水要求;相较方案 A、B,方案 C 能降低河流整体水文改变度;而相较方案 A、C,方案 B 能使经济社会供水和河流生态达到共赢,是较为理想的调度规则优化方案,也是本文推荐的调度规则优化方案。

参考文献:

[1] HAN Z, LONG D, FANG Y, et al. Impacts of climate change and human activities on the flow regime of the dammed Lancang River in Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 96-105.

[2] 杨娜,梅亚东,许银山等. 基于下游河道水流情势天然性要求的水库优化调度[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 84-89. (YANG Na, MEI Yadong, XU Yinshan, et al. Downstream natural flow regime-based optimal operation of reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 84-89. (in Chinese))

[3] 许栋,张博曦,及春宁,等. 梯级水库对南渡江干流底栖动物丰枯水期沿程变化的影响[J]. 水资源保护, 2019,

35(2): 60-66. (XU Dong, ZHANG Boxi, JI Chunling, et al. Streamwise variation of zoobenthos along main stream of Nanduijiang River in wet and dry seasons under influence of cascade reservoirs [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 60-66. (in Chinese))

[4] 王丽,朱远生,杨晓灵,等. 大藤峡水利枢纽工程设计中的水生态优化措施[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 74-78. (WANG Li, ZHU Yuansheng, YANG Xiaoling, et al. Measures for aquatic ecological optimization in design of Datengxia Water Project[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 74-78. (in Chinese))

[5] 杨哲,杨侃,夏怡,等. 考虑不同生态流量要求梯级水库群生态调度及其算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(12): 1266-1277. (YANG Zhe, YANG Kan, XIA Yi, et al. Optimal Ecological Operation of Cascade Reservoirs and the Algorithm Considering Different Ecological Flow Demand [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(12): 1266-1277. (in Chinese))

[6] 刘悦忆. 面向经济-生态的水库风险调度规则研究[D]. 北京:清华大学, 2014.

[7] 艾学山,范文涛. 水库生态调度模型及算法研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 451-455. (AI Xueshan, FAN Wentao. On reservoir ecological operation model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(3): 451-455. (in Chinese))

[8] 徐淑琴,苏鑫,邢贞相,等. 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, 2017, 48(4): 190-197. (XU Shuqin, SU Xin, XING Zhenxiang, et al. Reservoir ecological operation model under condition of non-sufficient ecological constraints [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 190-197. (in Chinese))

[9] 王立明,徐宁,高金强. 基于干旱河道生态修复的岳城水库生态调度[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 32-37. (WANG Liming, XU Ning, GAO Jinqiang. Ecological operation of Yuecheng Reservoir based on ecological restoration of arid river [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 32-37. (in Chinese))

[10] 马真臻. 基于河流天然流量过程的生态评价及其用水调度研究[D]. 北京:清华大学, 2012.

[11] 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, 2017, 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, 2017, 37(7): 1-9. (in Chinese))

[12] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN B P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. Regulated Rivers: Research &

- Management,1998,14:329-340.
- [13] SHIAU J T, WU F C. Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes in incorporating the intra-annual and inter-annual variability of the natural flow regime[J]. Water Resources Research,2007,43:140-152.
- [14] 张洪波. 黄河干流生态水文效应与水库生态调度研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.
- [15] YIN X A, YANG Z F, YANG W, et al. Optimized reservoir operation to balance human and river in ecosystem needs: model development, and a case study for the Tanghe reservoir, Tang River Basin, China [J]. Hydrological Progress,2010,24:461-471.
- [16] 程俊翔,徐力刚,姜加虎. 水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J]. 水资源保护,2018,34(6):24-32. (CHENG Junxiang, XU Ligang, JIANG Jiahu. Review of application of hydrologic alteration index system in eco-hydrology research [J]. Water Resources Protection,2018,34(6):24-32. (in Chinese))
- [17] 高超. 澜沧江下游水库生态调度研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [18] WANG X, LEI X H, JIANG Y Z, et al. Reservoir operation chart optimization searching in feasible region based on genetic algorithms[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44:26-34.
- [19] OLIVEIRA R, LOCKS D P. Operating rules for multi-reservoir systems [J]. Water Resources Research, 1997, 33:839-852.
- [20] CHANG F J, HUI S C, CHEN Y C. Reservoir operation using grey fuzzy stochastic dynamic programming [J]. Hydrological Processes,2002,16:2395-2408.
- [21] LI C, JAMES M, WILLIAM W G. A diversified multi-objective GA for optimizing reservoir rule curves [J]. Advances in Water Resources,2007,30:1082-1093.
- [22] 贾永乐. 考虑生态径流的梯级水电站优化调度研究[D]. 南京:河海大学,2018.
- [23] 张康,杨明祥,梁藉,等. 长江上游水库群联合调度下的河流水文情势研究[J]. 人民长江,2019,50(2):107-114. (ZHANG Kang, YANG Mingxiang, LIANG Ji, et al. Study on river hydrology regime under joint operation of cascade reservoirs in upper Yangtze River [J]. Yangtze River,2019,50(2):107-114. (in Chinese))
- [24] OLDEN J D, POFF N L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes [J]. River Research and Applications,2003,19:101-121.
- [25] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN B P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. Regulated Rivers: Research & Management,1998,14:329-340.
- [26] SHIAU J T, WU F C. Assessment of hydrologic alterations caused by Chi-Chi diversion weir in Chou-Shui Creek, Taiwan:opportunities for restoring natural flow conditions [J]. River Research and Applications,2004,20:401-412.
- [27] 陈玺,郭卫. 基于 RVA 法的黄河中游建库后河道水文变异分析 [J]. 水电能源科学,2016,34(11):5-8. (CHEN Xi, GUO Wei. Variation analysis of hydrological situation in the middle reaches of Yellow River after reservoirs construction based on range of variability approach[J]. Water Resources and Power,2016,34(11):5-8. (in Chinese))
- [28] CHANG F J, LI C, CHANG L C. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms [J]. Hydrological Processes,2005,19:2277-2289.
- [29] HSU S K. Shortage indices for water-resources planning in Taiwan [J]. Journal of Water Resources Planning and Management,1995,121(2):119-131.
- [30] 郭旭宁,胡铁松,吕一兵,等. 跨流域供水水库群联合调度规则研究 [J]. 水利学报,2012,43(7):757-766. (GUO Xuning, HU Tiesong, LYU Yibing, et al. Multi-reservoir operating rule in inter-basin water transfer-supply project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(7):757-766. (in Chinese))
- [31] WANG X H, GU X W, LIU Z B, et al. Production process optimization of metal mines considering economic benefit and resource efficiency using an NSGA-II Model [J]. Processes,2018,6:11-33.
- [32] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6:182-197.
- [33] CHAUBE A, BENYOUNCEF L, TIWARI M K. An adapted NSGA-2 algorithm based dynamic process plan generation for a reconfigurable manufacturing system [J]. Journal of Intelligent Manufacturing,2012,23:1141-1155.
- [34] 戴凌全,王煜,蒋定国,等. 基于 NSGA-II 方法的三峡水库汛末蓄水期多目标生态调度研究 [J]. 水利水电技术,2017,48(1):122-127. (DAI Lingquan, WANG Yu, JIANG Dingguo, et al. NSGA-II-based multi-objective ecological operation of Three Gorges Reservoir during impounding period at end of flood season [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(1):122-127. (in Chinese))
- [35] 周祖光. 大隆水利枢纽工程生态补偿机制研究 [J]. 水利经济,2008(4):65-68. (ZHOU Zuguang. Ecological compensation mechanism of Dalong Water Control Project [J]. Journal of Economics of Water Resources,2008(4):65-68. (in Chinese))

(收稿日期:2019-12-13 编辑:彭桃英)