

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.013

官厅水库多目标调度规律与方案研究

白涛¹,徐燕^{1,2},孙宪阁¹,魏健³,潘兴瑶⁴

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048; 2. 新疆水利水电规划设计管理局,新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 中国水利水电建设工程咨询西北有限公司,陕西 西安 710100; 4. 北京市水科学技术研究院北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心,北京 100048)

摘要:为探究水文变异和外调水源补给对水电站发电和生态的影响,以官厅水库下游减水河段为例,在计算水文变异下生态流量的基础上,定义了减水河段的生态保证程度,建立了水库发电和生态保证程度多目标优化调度模型,采用非支配遗传算法(NSGA-II)求解多种情景方案。研究表明:官厅水库入库径流分别于1971年和1983年发生变异,水文变异后发电和平均生态保证程度显著降低;水电站发电和生态之间多目标关系显著,发电量减少37.4%可增加67.8%的生态效益;外调水源补给后发电量和平均生态保证程度均显著提高,特别是枯水年,分别提高56.9%和40.3%。

关键词:水文变异;多目标优化调度;生态保证程度;减水河段;官厅水库

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0101-08

Study on multi-objective ecological operation of Guanting Reservoir // BAI Tao¹, XU Yan^{1,2}, SUN Xian'ge¹, WEI Jian³, PAN Xingyao⁴ (1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xinjiang Water Resources and Hydropower Planning and Design Administration, Urumqi 830000, China; 3. China Northwest Water Conservancy & Hydropower Engineering Consulting Co., Ltd., Xi'an 710100, China; 4. Beijing Engineering Technique Research Centre for Non-Conventional Water Resource Exploration and Utilization and Water Use Efficient, Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to explore the impact of hydrological variation and external diversion of water supply on power generation and ecology of hydropower stations, taking the downstream water-reducing reach of Guanting Reservoir as an example, based on the calculation of ecological flow under hydrological variation, the ecological assurance degree of the water-reducing reach is defined. A multi-objective optimal operation model for reservoir power generation and ecological guarantee degree is established, and the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) is used to solve multiple scenarios. The results show that the inflow runoff of Guanting Reservoir changed in 1971 and 1983 respectively, and the power generation and average ecological assurance degree decreased significantly after the hydrological variation. The multi-objective relationship between hydropower generation and ecology is significant, and the reduction of 37.4% in power generation can increase 67.8% in ecological benefits. The power generation and the average ecological guarantee degree are significantly improved after the recharge of the external water source, especially in the dry year, which increased by 56.9% and 40.3% respectively.

Key words: hydrological variation; multi-objective optimization operation; ecological guarantee degree; water-reducing reach; Guanting Reservoir

水库作为重要的水利工程,通过对天然径流的调蓄能够有效降低洪水灾害,同时带来显著的经济

效益^[1]。然而,人类生产生活用水不断增加,缺乏统筹规划使得流域水资源过度开发,河道生态用水

基金项目:国家自然科学基金(51279025);陕西省水利科技计划(2017slkj-16, 2017slkj-27);中国博士后科学基金(2019T120933);陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JLM-52)

作者简介:白涛(1983—),男,副教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: baitao@xaut.edu.cn

通信作者:孙宪阁(1998—),男,硕士研究生,主要从事水库调度研究。E-mail: 991225631@qq.com

严重不足,由此引发了一系列的生态环境问题。随着人们环境保护意识的提升,为解决河流生态问题,考虑河流生态需水的水库调度已越来越受到重视。Wang 等^[2]为实现人类与生态需水平衡,在水库群联合调度中区分了不同生态功能对应的生态流量;吕巍等^[3]在计算主要断面的最小、适宜及理想生态流量的基础上建立水库群多目标联合调度模型,探讨了防洪和发电对生态流量保证率的影响;陈立华等^[4]为缓解人类筑坝活动对生态环境的影响,考虑生态基流和洪水脉冲建立多种生态调度情景,并探讨其对发电的影响;石建军等^[5]建立的多目标调度模型将生态需水过程设为生态控制目标,分析生态保障对水库综合效益的影响;于守兵等^[6]整理黄河河口近 20 年来的生态需水信息,以季节性流量脉冲为例,优化调度方案满足河口生态需求;杨盈等^[7]根据生态需水改进了调度图,综合考虑社会经济需求调整调度原则;金鑫等^[8]将生态需水分级,用遗传算法对水库多目标调度模型进行优化;王霞等^[9]根据河道生态需水量和分层序列法将单目标优化模型求解,确定改善河流健康的关键是水库优化调度方案;艾亚迪^[10]构建了基于生态需水的闸坝调度规则优化模型,为调整闸坝调度规则和优化闸坝调度运行方式提供科学依据;易雨君等^[11]对黄河河口区湿地进行生态需水研究,结果表明依时段对流量过程进行调控可更好地满足目标的生态需水要求;游进军等^[12]构建松花江流域二层结构流域生态调度模型,在流域层面水量总体配置的基础上针对重点生态断面、水库进行生态优化调度。

生态流量推求生态调度研究的前提和基础^[13]。据统计,目前共有 200 多种河流生态流量的计算方法,但没有一种通用方法适应所有河流,应根据河流特征、资料收集情况选择适当的计算方法^[14]。许多研究表明水文变异影响河道生态流量计算的可靠性^[15-16],但对于大部分关于生态调度的研究,在计算生态流量时没有考虑水文序列的变异。目前,考虑生态流量的水库生态调度主要包括生态流量约束型模型、生态流量目标型模型和生态价值目标型模型^[17]。

生态保证程度是评价生态流量是否恰当的标准。如何将生态目标合理地利用数学表达式描述,成为众多学者研究的热点问题。方国华等^[18]基于河道生态流量定义了生态保护程度作为生态控制目标;张召等^[19]以水库下泄流量满足河道天然生态流量区间的时段数占比建立生态保证率目标函数;王宗志等^[20]制定调度规则时综合考虑多用户分区以及模型对生态、发电的影响,使得生态供水保证率显著提高;孟钰等^[21]使用频率分析计算中长期用水保

证率,用满足率的方法计算短期调度生态用水保证率,结果显示汛期生态保证率偏低;陈朝阳等^[22]采用 Tennant 法、最枯月平均流量法、Texas 法和 7Q10 法计算生态需水,并在此基础上,计算了生态需水保证程度;刘中培等^[23]以淮河干流为研究对象,采用最小月平均流量法、近 10 年最枯月平均流量法、流量历时曲线法和蒙大拿法进行了基本生态流量的评估计算;高玉琴等^[24]为适应南方季节性缺水河流构建了逐月保证率及评价模型,并通过对比 Tennant 法、年内展布法等耦合最终适宜生态基流过程。

鉴于此,本文在计算水文变异下生态流量的基础上,定义官厅水库下游减水河段生态保证程度,建立生态流量目标型模型,设置多种情景,采用 NSGA-II 对不同情景进行求解以明确官厅水电站发电与生态保护之间的关系,探究不同情景下官厅水电站发电和河道平均生态保证程度的调度能力,以期为官厅水库减水河段的生态保护和水库调度提供参考。

1 研究区概况

官厅水库位于北京市的西北方向,东经 $112^{\circ}8' \sim 116^{\circ}2'$ 、北纬 $38^{\circ}51' \sim 41^{\circ}14'$,是海河水系永定河历史最久的大型水库,也是新中国成立后建立的第一座大型水库。官厅水库上游有桑干河、洋河、奶水河 3 条支流,其中桑干河与洋河在河北省怀来县汇合后称为永定河,控制永定河流域面积约为 4.34 万 km^2 ,占全流域的 92.3%,流域概况如图 1 所示。官厅水库是一座具有多年调节性能,兼具防洪、发电、生态等目标的大型水利枢纽,水库兴利库容 2.5 亿 m^3 、正常蓄水位 479 m、死水位 476 m、汛期(6—9 月)汛限水位亦为 476 m。

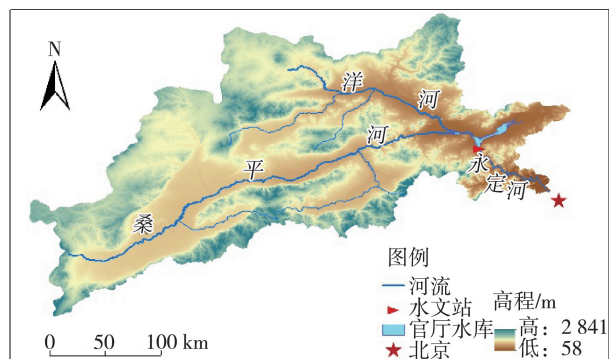


图 1 官厅水库流域概况

Fig. 1 Overview of Guanting Reservoir

官厅水电站位于官厅水库大坝下游,电站通过引水隧洞取水发电,发电后尾水回归河道,造成水库坝址同水电站尾水之间形成减水(脱水)河段,导致该河段水深、流速、湿周和水温等发生变化,严重影响河道生态环境。在水库下泄总量一定时,如果发

电流量增加,则减水河段生态流量势必减少;反之,如果减水河段生态流量增加,则发电流量势必减少,发电效益受到影响。官厅水电站最大引水流量 $105 \text{ m}^3/\text{s}$,装机容量 3 万 kW,保证出力 4 600 kW。本文收集了官厅水库 1956—2009 年实测的逐月入库径流资料,资料来源于官厅水库管理处和北京水利科学研究院。

2 研究方法

2.1 水文变异

气候变化和人类活动双重作用下,流域水文序列的一致性遭到破坏,发生水文变异^[25]。水文变异后,河道内水文、水力等条件发生变化,对河流生态系统及生态平衡造成严重影响。一般认为,河道生态系统适应变异前的状态,如果某一水文序列发生变异,为减少对结果可靠性的影响,在计算河道生态流量时,常采用变异前的水文序列^[26]。

水文变异诊断方法众多,国内外学者已取得了许多研究成果。其中 Mann-Kendall 检验法是应用最广泛的非参数检验方法^[27],雷红富等^[28]选择多种水文变异诊断方法对不同类型变异序列进行检测,结果表明均值变异检验效果明显,偏态系数 CS 变异检验效果不明显。参考以往研究,本文选用 Mann-Kendall 检验法和有序聚类法初步选择所有可能变异点,再用秩和检验对可能变异点进行显著性分析以避免单一方法的不足和增加计算可信度^[29]。

2.2 生态流量

河道生态流量分为最小生态流量和适宜生态流量两个级别^[7]。其中,最小生态流量是保护河流生态系统可恢复的最基本要求,若河道流量小于最小生态流量,则河道生态环境恶化,生态功能退化,严重影响河道生态环境。本文选用逐月最小流量法计算最小生态流量。适宜生态流量是指维持河道生态系统完整和稳定的流量^[30],通过对水文序列进行排序,不同时期选取不同保证率计算各个时期的生态流量,得到适宜生态流量过程。参考以往研究成果^[31]选取保证率:①冬季取 80%,春秋两季取 75%,夏季取 50%;②各月均取值 50%;③丰水期取 50%,平水期取 70%,枯水期取 90%;④丰水期取多年平均流量,平水期取 50%,枯水期取 80%。可见适宜生态流量因保证率的不同而变化,为克服单一保证率的不足,本文在计算中选取不同的保证率作为河道适宜生态流量上、下限。

2.3 生态保证程度

为了保证减水河段的生物生存,水库需要下泄一定的流量以维持河流基本功能。考虑生态流量作

为生态控制目标时应注意,河流生态需水相比于总量控制更倾向于过程控制。本文在以往研究基础上计算水文变异前的河道最小生态流量、适宜生态流量下限和适宜生态流量上限,基于此定义平均生态保证程度作为减水河段的生态保护目标。

减(脱)水河段是河道坝址与电站厂址间截弯取直引水发电河段水量减少造成的^[19]。减水河段的生态保证程度定义为:若河道内生态流量低于最小值,则记为 0;若河道内生态流量介于最小值和适宜区间下限之间,取值范围为 $0 \sim 0.5$;若河道内生态流量介于适宜区间,取值范围为 $0.5 \sim 1$;若河道内流量大于适宜区间上限,则记为 1。其数学表达式如下:

$$P_{et} = \begin{cases} 0 & Q_{et} < Q_{emin} \\ 0.5 \frac{Q_{et} - Q_{emin}}{Q_{esl} - Q_{emin}} & Q_{emin} \leq Q_{et} < Q_{esl} \\ 0.5 + 0.5 \frac{Q_{et} - Q_{esl}}{Q_{esut} - Q_{esl}} & Q_{esl} \leq Q_{et} \leq Q_{esut} \\ 1 & Q_{et} > Q_{esut} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{et} 为减水河段第 t 时段的生态保证程度; Q_{et} 为第 t 时段河道内生态流量, m^3/s ; Q_{esut} 、 Q_{esl} 和 Q_{emin} 分别为第 t 时段河道适宜区间上限、适宜区间下限和最小值, m^3/s 。

2.4 调度模型建立与求解

2.4.1 目标函数

a. 发电量最大:

$$\max E = \max \left(\frac{12}{n} \sum_{t=1}^n k q_t h_t \Delta t \right) \quad (2)$$

式中: E 为调度期内年均发电量, 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$; k 为水电站出力系数; q_t 为第 t 时段发电流量, m^3/s ; h_t 为第 t 时段发电水头, m ; n 为月时段总数; Δt 为时段长。

b. 平均生态保证程度最大:

$$\max P_{eco} = \max \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n P_{et} \right) \quad (3)$$

式中 P_{eco} 为调度期的平均生态保证程度。

2.4.2 约束条件

约束条件包括水量平衡约束、水位约束、出库流量约束和水电站出力约束,计算公式为

$$V_{t+1} = V_t + (Q_{int} - Q_{out} - Q_{loss}) \Delta t \quad (4)$$

$$H_{min} \leq H_t \leq H_{max} \quad (5)$$

$$Q_{outmin} < Q_{out} < Q_{outmax} \quad (6)$$

$$N_{min} \leq N_t \leq N_{max} \quad (7)$$

式中: V_{t+1} 、 V_t 分别为第 $t+1$ 和第 t 时段末水库库容, 亿 m^3 ; Q_{int} 、 Q_{out} 、 Q_{loss} 分别为第 t 时段内水库入库、出库和损失(蒸发、渗漏等)流量, m^3/s ; H_t 、 H_{min} 、 H_{max} 分别为第 t 时段水库水位、水库水位下限

和水库水位上限, m ; Q_{outmin} 、 Q_{outmax} 分别为第 t 时段水库出库流量下限和水库出库流量上限, m^3/s ; N_t 、 N_{min} 、 N_{max} 分别为第 t 时段水电站出力、水电站出力下限和水电站出力上限, kW 。

2.4.3 模型求解

水库多目标优化调度属于非线性、多维、动态的复杂优化问题,其求解主要分为两种思路:一是进行多目标与单目标之间的变换,然后对单目标求解;二是采用启发式算法求解符合约束的 Pareto 非劣解集^[32]。目前代表性的多目标优化算法包括 NSGA-II、PAES、PESA、SPEA2 等^[33],其中 NSGA-II 性能好、效率高且计算简单,相比于其他方法结果更优^[34]。在水库调度方面,王学斌等^[35]利用改进的 NSGA-II 探究水库兴利、防洪和生态等目标之间的关系,取得了不错的效果;方国华等^[18]应用 NSGA-II 研究了水电站发电和生态保护的关系;金文婷等^[36]应用 NSGA-II 探究了枯水年下引汉济渭工程的调水能力和发电能力,并取得了满意的调度结果。因此,本文选取 NSGA-II 求解模型,其主要计算思路及流程如图 2 所示,图中 G_{en} 为迭代次数。

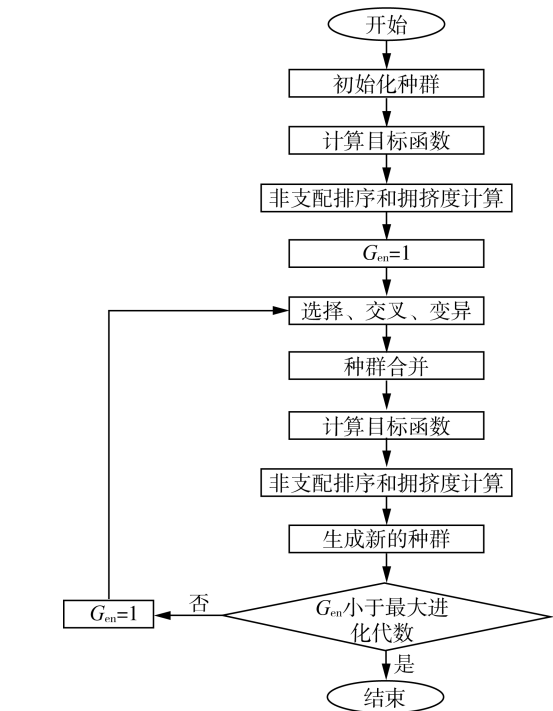


图 2 NSGA-II 计算流程

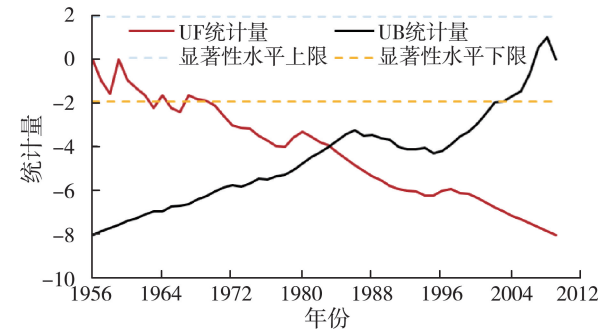
Fig.2 NSGA-II calculation flow chart

3 结果与分析

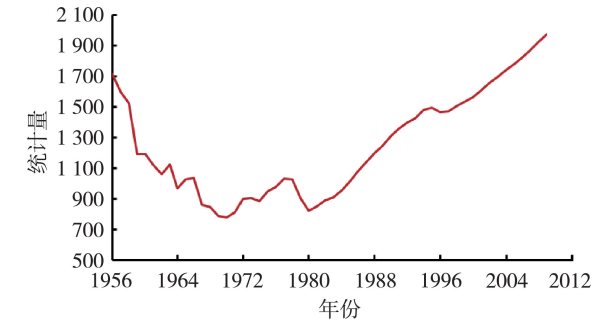
3.1 水文变异诊断

采用 Mann-Kendall 检验法和有序聚类法计算官厅水库 1956—2009 年实测入库径流序列可能的变异点,结果如图 3 所示。可见,图 3(a)交叉点为

1983 年,图 3(b)最小值点为 1970 年,表明 1970 年和 1983 年为可能变异点。为了进一步诊断变异点,采用秩和检验法($\alpha = 0.05$)进行显著性水平判断,分别以 1970 和 1983 作为间断年进行检验,结果证明变异年份前后数据差异显著。由上述分析可知,官厅水库 1956—2009 年的径流序列分别于 1970 和 1983 年发生显著变异。



(a) Mann-Kendall 检验法



(b) 有序聚类法

图 3 水文变异诊断结果

Fig.3 Hydrological variation diagnosis results

3.2 生态流量生成

水文序列变异后径流的一致性遭到破坏。由于生态系统适应变异前的水文状态,因此计算资料选择 1956—1970 的径流序列。河道最小生态流量采用逐月最小流量法计算,适宜生态流量采用逐月频率法计算。其中适宜流量下限为丰水期保证率取 50%、枯水期保证率取 75%;适宜生态流量上限为各月保证率均取 25%。计算得到河道生态流量过程如图 4 所示。

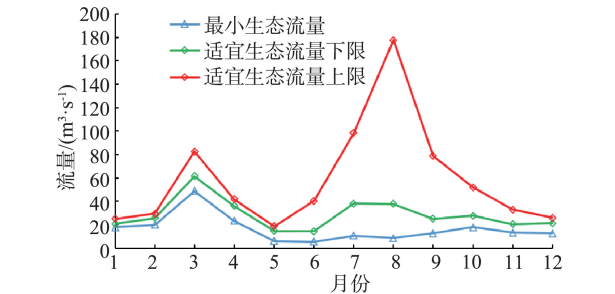


图 4 不同生态流量过程

Fig.4 Ecological flow process in different scenarios

3.3 调度情景设置

3.3.1 典型年选择

将水文序列根据变异点划分为3段:第一阶段1956—1970年、第二阶段1971—1983年和第三阶段1984—2009年。采用P-Ⅲ频率软件进行排序后以25%的来水频率选取典型年,选取第一阶段未发生变异的水文序列内1970年为丰水年,在第二阶段、第三阶段已发生变异的水文序列内1982年为平水年、1988年为枯水年。典型年径流过程如图5所示。

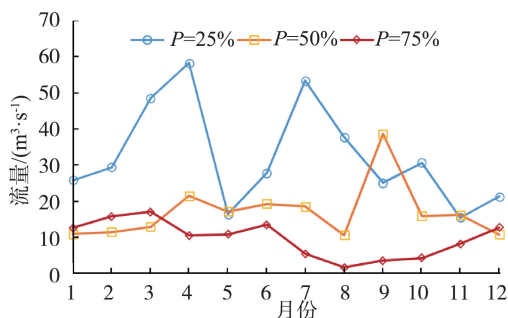


图5 典型年径流过程

Fig.5 Runoff process in different typical years

3.3.2 外调水源补给

自20世纪70年代以来,永定河遭遇持续干旱,加之上游不合理用水,河道生态流量锐减,下游河道生态系统遭遇巨大挑战。近年来,为缓解由于缺水造成的生态问题,永定河流域开展生态补水项目。根据《永定河生态用水保障合作协议》,通过万家寨引黄北干线工程和册田水库补充生态用水。现状年永定河平均外调水量1.7亿 m^3 ,从3月初到5月底按平均水量供给。

3.3.3 情景设置

对建立的调度模型分别设置长系列和典型年调度两种条件,考虑到外调水源的影响,在典型年基础上增加外调水源补给条件,设置了9种调度情景。①情景1为1956—1970年水文序列未考虑外调水源补给的调度情景;②情景2为1971—1983年水文序列未考虑外调水源补给的调度情景;③情景3为1984—2009年水文序列未考虑外调水源补给的调度情景;④情景4为丰水年(1970年)水文序列未考虑外调水源补给的调度情景;⑤情景5为平水年(1982年)水文序列未考虑外调水源补给的调度情景;⑥情景6为枯水年(1988年)水文序列未考虑外调水源补给的调度情景;⑦情景7为丰水年(1970年)水文序列考虑外调水源的调度情景;⑧情景8为平水年(1982年)水文序列考虑外调水源的调度情景;⑨情景9为枯水年(1988年)水文序列考虑外调水源的调度情景。

3.4 讨论

NSGA-II参数设置为:种群 $P_{op} = 100$, $G_{en} = 3000$,交叉和变异概率分别取0.8和0.2,长系列和典型年的起调水位皆为476 m。9种情景的调度结果如图6所示。

由图6(a)(b)(c)可见,情景1~3的运行结果整体上较为光滑连续,呈曲线形状,发电和平均生态保证程度呈非线性负相关关系,凸显出明显的胁迫性和竞争性。从情景1至情景3,发电、平均生态保证程度的值域和最大值皆呈现减小趋势,情景1、情景2、情景3最大发电量和最大平均生态保证程度分别为0.68、0.38、0.37亿 $kW \cdot h$ 和0.24、0.11、0.10,情景2的发电量和平均生态保证程度相比情景1分别减少44.10%和36.52%;情景3的发电量和平均生态保证程度相比情景1分别减少83.56%和73.77%,表明水文变异后水电站发电减少,减水河段生态保证程度降低,对河道生态产生显著的负面影响。情景1和情景2中发电量变幅大于平均生态保证程度变幅,表明在水资源相对丰富的历史时期,发电比平均生态保证程度对径流的改变更加敏感;情景3中发电和平均生态保证程度取值变幅基本一致,表明现阶段受径流持续减少的影响,平均生态保证程度对于径流变化的响应程度迅速增强。

由图6(d)(e)(f)可见,情景4、情景5、情景6最大发电量和最大平均生态保证程度分别为0.68、0.50、0.37亿 $kW \cdot h$ 和0.24、0.22、0.20,发电和平均生态保证程度的调度能力随来水频率的降低而减小。典型年的平均生态保证程度整体较小,最大生态保证程度为丰水年对应的0.50,这是由于生态流量以变异前径流序列计算得到,整体上偏大,典型年来水相比生态流量上限显著偏小,表明在此来水条件下,河道生态系统要保持变异前的水平面临着严峻的挑战。

由图6(g)(h)(i)可见,情景7最大发电量和最大平均生态保证程度分别为0.76亿 $kW \cdot h$ 和0.55,与情景4相比分别提高11.8%和11.1%;情景8最大发电量和最大平均生态保证程度分别为0.49亿 $kW \cdot h$ 和0.31,与情景5相比分别提高35.1%和27.1%;情景9最大发电量和最大平均生态保证程度分别为0.34亿 $kW \cdot h$ 和0.28,与情景6相比分别提高56.9%和40.3%。表明外调水源补给后,水电站发电和生态保证程度的调度能力得到提高,特别是枯水年发电和生态保证程度的调度能力显著提高。

为量化典型方案下发电与生态保护的关系,根据选样的广泛性原则,分别选取平均生态保证程度

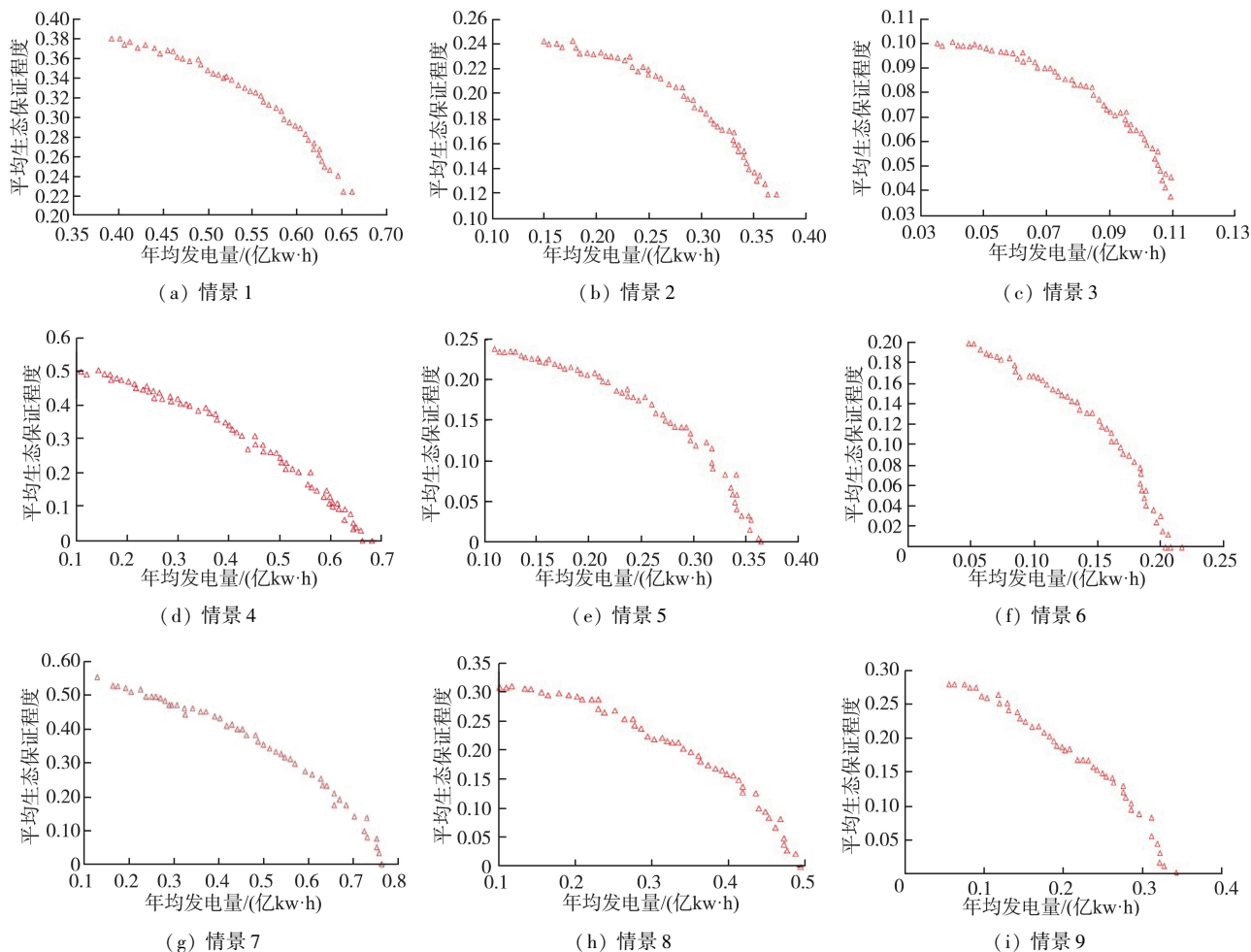


图6 不同情景下发电量与平均生态保证程度多目标调度结果

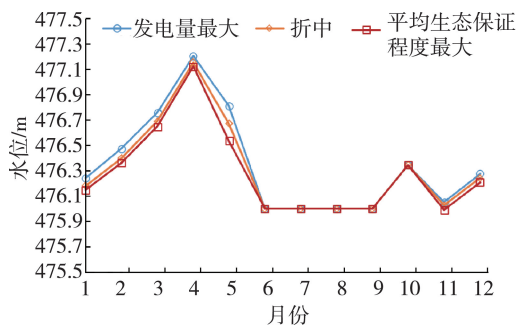
Fig.6 Multi-objective results of hydropower generation and average ecological guarantee degrees in different scenarios

最大、发电量最大的调度方案。在此基础上,以发电和生态 1:1 权重,在调度结果集中选取折中方案,即选取第 1、50 和 100 方案分别对应河道平均生态保证程度最大方案、折中方案和发电量最大方案作为代表方案。以情景 5 为例,得到各方案水位变化过程和河道生态流量过程如图 7 所示。

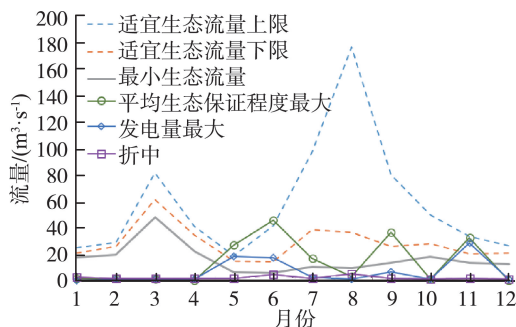
由图 7(a)可见,3 个典型方案水库水位在非汛期满足死水位(476 m)至正常蓄水位(479 m)的约束,汛期(6—9 月)满足汛限水位(476 m)约束。3 个典型方案水位变化规律类似,呈现蓄水-放水-蓄水的变化趋势,主要原因是汛期前水库通过蓄水以抬高水位增加发电量,在汛期降至汛限水位以满足防洪要求,汛期后抬升水位以满足枯水期用水要求,水库水位变化符合常规水库水位变化规律。3 个典型方案中发电量最大方案水位最高,其次为折中方案,平均生态保证程度最大方案水位最低,主要原因是发电量最大方案侧重经济效益,通过抬高水位增加水头以加大发电效益;平均生态保证程度最大方案更侧重河道生态效益,通过增加下泄水量满足河道生态用水,导致水库水位偏低;折中方案则介于二

者之间。由图 7(b)可见,3 个典型方案中发电量最大方案下泄流量最小,其次为折中方案,平均生态保证程度最大方案流量最大,原因同上。3 个典型方案年内下泄流量极不均匀,1—4 月基本为 0,主要是为了抬升水库水位,发电量最大方案下泄流量没有满足最小生态流量的月份,表明在此方案下河道生物面临严重威胁。3 个典型方案仅有个别月份下泄流量超过适宜生态流量上限,其大多数皆处于适宜生态流量下限以下,表明在此来水频率下河道生态环境面临严峻的挑战。

综上所述,水库调度若仅追求经济效益而忽略生态需求(发电量最大方案),对于河道生态的影响是巨大的;当然也不能一味地追求生态效益最大而放弃经济效益(平均生态保证程度最大方案)。因此,需要在发电和生态之间做出合理的决策。通过牺牲一定的经济效益以换取较大的生态效益。以折中方案为例,发电量减少 37.4% 可增加 67.8% 的生态效益。在实际调度运行中,决策者应辅以有关法律、政策以及部门需求等做出科学、合理、符合实际的决策方案。



(a) 水位



(b) 生态流量

图7 情景5 各方案水位变和生态流量变化过程

Fig.7 Water level process and ecological flow process of each scheme in Scenario 5

4 结 论

a. 采用两种水文变异诊断方法检验,结果表明官厅水库入库径流分别于1970年和1983年发生变异,水文变异后水电站发电和减水河段平均生态保证程度显著降低,对水库调度和下游生态保护产生显著负面影响。

b. 外调水源补给增加了发电和生态的调度能力,丰水年发电和生态调度能力分别提高11.8%和11.1%;平水年发电和生态调度能力分别提高35.1%和27.1%;枯水年发电和生态调度能力分别提高56.9%和40.3%。

c. 发电目标与平均生态保证程度之间存在激烈的竞争关系,发电量最大方案下减水河段基本处于干涸状态,平均生态保证程度最大方案需要牺牲巨大的发电效益,折中方案下发电量减少37.4%可增加67.8%的生态效益,但具体如何选择合理的方案不仅涉及评价指标的选择还需协调流域各部门的实际需求。

参考文献:

[1] 董增川,陈牧风,倪效宽,等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optional

operation of reservoir group considering fuzzy interval [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))

[2] WANG H, LEI X H, YAN D H, et al. An ecologically oriented operation strategy for a multi-reservoir system: a case study of the middle and lower Han River Basin, China [J]. Engineering, 2018, 4(5): 104-119.

[3] 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. (LYU 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))

[4] 陈立华,叶明,叶江,等. 红水河龙滩-岩滩生态调度发电影响研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(2): 45-53. (CHEN Lihua, YE Ming, YE Jiang, et al. Study on ecological operation and influence of power generation of Longtan-Yantan cascade reservoirs on Hongshui River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(2): 45-53. (in Chinese))

[5] 石建军,冯民权. 考虑生态径流过程的运行模式对文峪河梯级水库综合效益的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 222-227. (SHI Jianjun, FENG Minquan. Wenyuhe cascade reservoirs running with considering ecological runoff process and its impact on reservoirs original comprehensive benefits [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 222-227. (in Chinese))

[6] 于守兵,凡姚申,余欣,等. 黄河河口生态需水研究进展与展望[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1101-1110. (YU Shoubing, FAN Yaoshen, YU Xin, et al. Advances and prospects of ecological water demands in the Yellow River Estuary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1101-1110. (in Chinese))

[7] 杨盈,陈贺,于世伟,等. 基于改进调度图的西大洋水库综合调度研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 139-144. (YANG Ying, CHEN He, YU Shiwei, et al. Study on comprehensive operation of Xidayang Reservoir based on improved operation chart [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 139-144. (in Chinese))

[8] 金鑫,郝彩莲,王刚,等. 供水水库多目标生态调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 463-467. (JIN Xin, HAO Cailian, WANG Gang, et al. Multi-objective ecological operation of water supply reservoir [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 463-467. (in Chinese))

[9] 王霞,郑雄伟,陈志刚. 基于河流生态需水的水库生态调度模型及应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 59-61. (WANG Xia, ZHENG Xiongwei, CHEN Zhigang. Reservoir ecological regulation model based on ecological

- water need of river and its application [J]. Water Resources and Power, 2012, 30 (6): 59-61. (in Chinese))
- [10] 艾亚迪. 基于生态需水的北方河流闸坝调度规则优化研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2020.
- [11] 易雨君,徐嘉欣,宋劼,等. 黄河河口区生态需水量及流量过程核算[J]. 水资源保护,2022,38(1):133-140. (YI Yujun, XU Jiaxin, SONG Jie, et al. Ecological water demand and discharge process calculation in the Yellow River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 133-140. (in Chinese))
- [12] 游进军,薛志春,林鹏飞,等. 二层结构的流域生态调度研究 II :松花江流域生态调度实践与应用[J]. 水利学报,2022,53(1):11-19. (YOU Jinjun, XUE Zhichun, LIN Pengfei, et al. Study on the two-layer structure ecological operation at the watershed scale II : ecological operation application in the Songhua River Watershed [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (1): 11-19. (in Chinese))
- [13] 徐伟,董增川,罗晓丽,等. 基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):454-457. (XU Wei, DONG Zengchuan, LUO Xiaoli, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (5): 454-457. (in Chinese))
- [14] 黄强,赵梦龙,李瑛. 水库生态调度研究新进展[J]. 水力发电学报,2017(3):3-13. (HUANG Qiang, ZHAO Menglong, LI Ying. Advancements in studies on reservoir ecological operation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017(3):3-13. (in Chinese))
- [15] 石建军,冯民权,黄强,等. 水文变异条件下文峪河生态径流过程的推估方法[J]. 水力发电学报,2014,33(4):28-35. (SHI Jisunjun, FENG Minquan, HUANG Qiang, et al. An approach to estimation of environmental flow process in Wenyu River under hydrological variation conditions [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4):28-35. (in Chinese))
- [16] 尚文绣,彭少明,王煜,等. 小浪底水利枢纽对黄河下游生态的影响分析[J]. 水资源保护,2022,38(1):160-166. (SHANG Wenxiu, PENG Shaoming, WANG Yu, et al. Influence of Xiaolangdi Reservoir on ecological condition of the lower Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 160-166. (in Chinese))
- [17] 刘剑宇,张强,顾西辉. 水文变异条件下鄱阳湖流域的生态流量[J]. 生态学报,2015,35(16):5477-5485. (LIU Jianyu, ZHANG Qiang, GU Xihui. Evaluation of ecological flow with considerations of hydrological alterations in the Poyang Lake basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (16): 5477-5485. (in Chinese))
- [18] 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(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(7):1-9. (in Chinese))
- [19] 张召,张伟,廖卫红,等. 基于生态流量区间的多目标水库生态调度模型及应用[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(5):96-101. (ZHANG Zhao, ZHANG Wei, LIAO Weihong, et al. Model of multipurpose reservoir ecological operation based on ecological flow range and its application [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14 (5): 96-101. (in Chinese))
- [20] 王宗志,程亮,王银堂,等. 基于库容分区运用的水库群生态调度模型[J]. 水科学进展,2014,25(3):435-443. (WANG Zongzhi, CHENG Liang, WANG Yintang, et al. A multi-reservoir ecological operation model based on subdivision application of reservoir storage capacities [J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (3): 435-443. (in Chinese))
- [21] 孟钰,张翔,夏军,等. 河道内生态用水保证率的概念、内涵与计算分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2018,26(2):229-238. (MENG Yu, ZHANG Xiang, XIA Jun, et al. Concept, connotation and calculation of guarantee rate of instream ecological water [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26 (2): 229-238. (in Chinese))
- [22] 陈朝阳,徐金鹏,管新建,等. 径流变化特征分析及生态需水保证率评估[J]. 水力发电,2021,47(5):17-22. (CHEN Chaoyang, XU Jinpeng, GUAN Xinjian, et al. Analysis of runoff change characteristics and assessment of ecological water demand guarantee rate [J]. Water Power, 2021, 47 (5): 17-22. (in Chinese))
- [23] 刘中培,李鑫,窦明,等. 淮河干流河南段基本生态流量保证率研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(2):50-54. (LIU Zhongpei, LI Xin, DOU Ming, et al. Research on the guarantee rate of basic ecological flow in the main stream of the Huaihe River in Henan Section [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41 (2): 50-54. (in Chinese))
- [24] 高玉琴,刘钺,赵晨程,等. 南方季节性缺水河流逐月保证率设定法的改进[J]. 水资源保护,2021,37(2):95-101. (GAO Yuqin, LIU Yue, ZHAO Chencheng, et al. Improvement on monthly guarantee rate setting method for seasonal water shortagerivers in South China [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2): 95-101. (in Chinese))

(下转第124页)

983. (LAI Shanzheng, QU Simin, BAO Weimin, et al. Application of parameter calibration method based on parameter function surface in SAC model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45 (8): 973-983. (in Chinese))
 - [14] 杨姗姗,包为民,杨小强,等.微分响应在降雨误差修正中的应用[J].中国农村水利水电,2015(1):75-79.
 - (YANG Shanshan, BAO Weimin, YANG Xiaoqiang, et al. The application of differential response in rainfall error correction[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015 (1):75-79. (in Chinese))
 - [15] 郭晓英.气候变化和人类活动对闽江流域径流的影响[D].福州:福建师范大学,2016.
 - (收稿日期:2022-02-06 编辑:王芳)
-
- (上接第 108 页)
- [25] 黄显峰,贾永乐,方国华,等.基于 PP-RVA 法的水电站下游河流水文情势评价[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):479-485. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua, et al. Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the PP-RVA method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6):479-485. (in Chinese))
 - [26] 王鹏,华祖林,褚克坚,等.高度城镇化地区河网水系生态调控方案[J].水资源保护,2022,38(1):205-212. (WANG Peng, HUA Zulin, CHU Kejian, et al. Ecological regulation scheme of river network and water system in highly urbanized areas [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):205-212. (in Chinese))
 - [27] 邹磊,夏军,张印,等.海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J].水资源保护,2021,37(1):53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):53-60. (in Chinese))
 - [28] 雷红富,谢平,陈广才,等.水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J].水电能源科学,2007,25(4):36-40. (LEI Hongfu, XIE Ping, CHEN Guangcai, et al. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change-point testing methods [J]. Water Resources and Power, 2007, 25(4):36-40. (in Chinese))
 - [29] 魏健,潘兴瑶,孔刚,等.基于生态补水的缺水河流生态修复研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):64-69. (WEI Jian, PAN Xingyao, KONG Gang, et al. Study on ecological restoration of water-deficient rivers based on ecological water supplement method [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(1):64-69. (in Chinese))
 - [30] 康玲,黄云燕,杨正祥,等.水库生态调度模型及其应用[J].水利学报,2010,41(2):134-141. (KANG Ling, HUANG Yunyan, YANG Zhengxiang, et al. Reservoir ecological operation model and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2):134-141. (in Chinese))
 - [31] 郭利丹,夏自强,李捷.河流生态径流量常用计算方法的对比[J].人民黄河,2008,30(4):28-30. (GUO Lidan, XIA Zhiqiang, LI Jie. Comparison of common calculation methods for river ecological runoff [J]. Yellow River, 2008, 30(4):28-30. (in Chinese))
 - [32] 吴恒卿,黄强,徐炜,等.基于聚合模型的水库群引水与供水多目标优化调度[J].农业工程学报,2016,32(1):140-146. (WU Hengqing, HUANG Qiang, XU Wei, et al. Multi-objective optimal operation for multi-reservoirs for water diversion and supply by using aggregation model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1):140-146. (in Chinese))
 - [33] 负汝安,董增川,王好芳,等.基于 NSGA2 的水库多目标优化[J].山东大学学报(工学版),2010,40(6):124-128. (YUN Ru'an, DONG Zengchuan, WANG Haofang, et al. Multi-objective optimization of a reservoir based on NSGA-II [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(6):124-128. (in Chinese))
 - [34] 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(2):190-197.
 - [35] 王学斌,畅建霞,孟雪姣,等.基于改进 NSGA-II 的黄河下游水库多目标调度研究[J].水利学报,2017,48(2):135-145. (WANG Xuebin, CHANG Jianxia, MENG Xuejiao, et al. Research on multi-objective operation based on improved NSGA-II for the lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(2):135-145. (in Chinese))
 - [36] 金文婷,王义民,白涛,等.枯水年引汉济渭并联水库多目标调度及决策[J].水力发电学报,2019,38(2):70-83. (JIN Wenting, WANG Yimin, BAI Tao, et al. Multi-objective operation and decision making of parallel reservoirs for Hanjiang-to-Weihe Water Diversion Project in dry years [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(2):70-83. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-01-13 编辑:王芳)