

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.013

考虑河道内生态需水与径流情势的水库群优化调度

王 钦^{1,2}, 王银堂^{2,3}, 胡庆芳^{2,3}, 李伶俐^{2,3}, 刘 勇², 张 野², 吴海燕⁴

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 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; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 湖州市水利局, 浙江 湖州 313000)

摘要:针对目前水库生态调度研究重点考虑河道内生态需水量保障单一目标,忽略河道天然径流情势恢复的问题,将水文改变指标(IHA)分为两类,分别量化河道内生态需水与径流情势,定义河道内生态缺水最小和河道天然径流情势贴合度最大双生态目标,结合河道外社会经济供水目标,构建水库群多目标优化调度模型,对我国南方某水库群开展实例研究。结果表明:基于双生态目标调度模型优选的均衡调度方案可在保障河道外主要用水对象供水保证率不低于95%的同时,使河道内目标生态需水保证率达到91.67%;构建的模型能有效兼顾社会经济和河流生态环境效益,提升河道天然径流情势贴合度,与只考虑河道内生态需水的水库群调度模型相比,更有利于河流生态保护。

关键词:河道内生态需水;径流情势;水文改变指标;水库群优化调度;南方水库群

中图分类号:TV697.1⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0109-09

Optimization of reservoir group operation considering instream ecological water demand and flow regime//WANG Qin^{1,2}, WANG Yintang^{2,3}, HU Qingfang^{2,3}, LI Lingjie^{2,3}, LIU Yong², ZHANG Ye², WU Haiyan⁴ (1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. Water Conservancy Bureau of Huzhou, Huzhou 313000, China)

Abstract: In view of the problem that existing studies of ecological reservoir operation focus on the single objective of instream ecological water demand and ignore the restoration of instream natural flow regime, indicators of hydrologic alteration (IHA) were divided into two categories to quantify instream ecological water demand and instream flow regime, respectively, and ecological objectives of minimum instream ecological water shortage and maximum instream fit degree of natural flow regime were determined. Furthermore, a multi-objective reservoir group operation model was constructed by combining the target of out-stream socio-economic water supply, and a case study was carried out of a reservoir group in southern China. The results demonstrate that the optimal balanced operation scheme based on the double ecological objective model not only ensures the guarantee rate of water supply to main out-stream water consumers to exceed 95%, but also makes the guarantee rate of water supply to instream ecological objective water demand to reach 91.67%. The constructed model effectively balances both socio-economic and ecological river environment benefits, while enhancing the instream fit degree of natural flow regime, and it is more conducive to river ecological protection, compared with the model that only considers instream ecological water demand.

Key words: instream ecological water demand; flow regime; indicators of hydrologic alteration; optimization of reservoir group operation; reservoir group in southern China

水库是最重要的流域水量调蓄设施之一。长期以来,水库调度以防洪和兴利为主要目标,追求社会经济

效益最大化,但对生态环境影响的关注不足,扰动了河流生态系统健康^[1]。近年来,国内外学者围绕水库调度如何有效协调社会经济发展和河流生态

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3000104);国家自然科学基金项目(52009081);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y519007)

作者简介:王钦(1995—),女,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:wang_qin1@tju.edu.cn

通信作者:王银堂(1964—),男,正高级工程师,硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail:ytwang@nhri.cn

求的水库调度研究总体可分为两类。第一类将基于水文学^[2]、水力学^[3]、栖息地模拟^[4-5]等方法计算的河道内生态需水量作为水库调度的约束条件,即限定水库下游河道控制断面流量不低于特定生态需水量,以此为前提寻求水库兴利目标最大化。例如:胡和平等^[6]以生态流量为约束,以水电站年发电量最大为优化目标,建立了基于生态流量过程线的水库优化调度模型;徐淑琴等^[7]提出了将最小生态流量约束放大到适宜生态流量的非充分生态约束流量求解方法,以降低水库运行对河流生态系统的影响;刘百灵等^[8]考虑了河道内生态基流约束,提出了水库发电-供水多目标优化调度方案。第二类是将河道内生态需水作为水库调度的优化目标之一。例如:吕巍等^[9]通过加权法构建了考虑最小、适宜及理想生态需水的乌江干流梯级水电站多目标联合优化调度模型;李力等^[10]以河流生态需水满足度最大和梯级发电量最大为目标,研究了金沙江下游梯级水库优化调度问题;白涛等^[11]考虑外调水源补给,建立了水库发电量和生态需水保证程度双重目标的官厅水库优化调度模型。与第一类研究相比,第二类研究在一定程度上可更灵活地协调社会经济和生态保护之间的矛盾。

河道径流时程分布,即径流情势,影响水量水质输移和生物栖息地状况,并通过水文生态耦合作用,决定了水生生物物种分布和丰度,对生物群落构成和生物多样性具有重要影响^[12]。事实上,水库运行主要是通过改变河道径流情势影响水生生态系统演替。因此,营造适宜的径流情势应当作为水库调度的重要任务之一。然而,现有的两类研究构建水库调度模型一般只考虑下游河道内生态需水量对水库调度运行的约束或响应,忽视了水库下泄流量的时程分布,导致水库下游河道径流情势不一定能满足生态系统健康的要求^[13-14]。水文改变指标(indicators of hydrologic alteration, IHA)可以捕捉天然河流的流量大小、持续时间、极端流量出现时间和频次等特征要素,常用来表征河道径流情势^[15-16],但存在难以将 IHA 应用到调度模型的问题。近年来,Wang 等^[13]基于部分 IHA(月均流量和极端流量)构建混合线性规划模型作为水库调度约束条件;Li 等^[17]用数学公式计算 IHA 指标作为调度模型约束条件或目标函数。此类确定径流情势的方法存在地区适用性,难以指导实践操作。现多借助变化范围法(range of variability approach, RVA)评价典型调度方案中河道径流情势优劣,进而挑选综合效益最优调度方案^[18],高玉琴等^[19-20]基于 RVA 法构建生态目标径流情势,参与水库调度模型优化,提

出兼顾兴利效益与河流生态保护的水库优化调度方案。然而,RVA 法量化径流情势仅统计了各指标落入某阈值范围内的概率,忽略了阈值范围外的指标,导致径流情势变化评价不完整。为克服经典 RVA 法不足,Suen 等^[21]基于中度干扰假说^[22](intermediate disturbance hypothesis, IDH),引入高斯隶属函数量化了河流径流情势变化程度,刘阳等^[23-24]也开展了类似研究。但上述研究均未明确 IHA 与水库下游不同生态需求之间的复杂关系,导致定义的生态目标不完整。

总体上,现有考虑生态目标的水库调度研究侧重基于生态单目标的模型构建,多针对满足河道内生态需水量的问题,对基于 IHA 量化河道径流情势的应用及同时考虑两个生态目标的研究不足,而同时考虑河道内生态需水与径流情势恢复对构建河流完整健康生态系统具有重要价值。鉴于此,本文基于 IHA 分别确定河道内生态需水量和天然径流情势贴合度,并考虑河道外社会经济供水目标,构建水库群多目标优化调度模型。以我国南方某水库群为例,研究均衡河道外供水和河道内生态效益的水库群调度方案,并阐明增加河道径流情势的调控目标对河道内外兴利效益的影响。

1 研究方法

1.1 生态目标确定方法

本文建立的水库群调度模型生态目标涉及河道内生态需水和径流情势,两者均借助 IHA 量化。IHA 包含了 5 组 33 个水文变量:①月平均流量,分别为 1—12 月逐月平均流量,共 12 个变量;②年内极端流量,分别为年最小 1、3、7、30、90 d 流量和年最大 1、3、7、30、90 d 流量,以及基流指数、零流量日数,共 12 个变量;③年内极端流量出现时间,分别为年最大流量出现日期、年最小流量出现日期 2 个变量;④高低流量的平均持续时间及次数,分别为高流量发生次数、低流量发生次数、高流量平均历时、低流量平均历时 4 个变量;⑤流量改变率和频率,分别为年均涨水速率、年均落水速率、涨落变化次数 3 个变量,相应的可能生态影响见文献[12]。

1.1.1 河道内生态需水量计算方法

RVA 阈值描述了河川流量过程可变范围,也是生态系统可承受的变化范围,众多学者基于 RVA 阈值开展了河道内生态需水量的研究,以 RVA 阈值目标差值的百分数确定河道内生态需水最为常见。本文采用 RVA 法计算河道内生态需水量,将各 IHA 发生概率为 75% 和 25% 对应数值作为各指标 RVA 阈值的上、下限,参考文献[25-28],基于第 1 组 IHA

(月平均流量),采用 RVA 阈值目标差值的 25% 和 50% 分别确定河道内基本生态需水量和目标生态需水量。基本生态需水量指维持河流、湖泊、沼泽生态系统结构和功能不丧失,需要保留在河流、湖泊、沼泽内的最小流量,是河湖生态水量要求的底线;目标生态需水量指维护河流、湖泊、沼泽良好生态状况,需要保留在河道内的流量^[29]。生态对象需水量为

$$E_{j,m} = \alpha_j(R_{um} - R_{dm}) \quad (1)$$

($m = 1, 2, \dots, 12 ; j = 1, 2$)

式中: $E_{j,m}$ 为第 m 月第 j 个河道内生态对象需水量, $j = 1, 2$ 分别表示河道内基本生态需水和目标生态需水; α_j 为对应河道内生态需水百分数, $j = 1, 2$ 分别表示河道内基本生态需水百分数和目标生态需水百分数, $\alpha_1 = 25\%$, $\alpha_2 = 50\%$; R_{um} 、 R_{dm} 分别为第 m 月平均流量 RVA 阈值的上、下限。

1.1.2 河道径流情势量化方法

基于第 2~5 组 IHA 量化河道径流情势变化。考虑到变量数量较多,且各变量间存在一定相关性,采用主成分分析(principal component analysis, PCA)^[30]对 21 项 IHA 进行筛选,并进一步引入 IDH 理论^[22]计算各指标对应的河道天然径流情势贴合度。对于某一个 IHA,可设定一个中间水平的范围值作为管理目标,即基于受最小扰动的历史流量确定理想径流情势^[21]。通常采用高斯隶属函数计算水库调度后该 IHA 相对适宜值的隶属度,表征调度过程河道径流情势对理想径流情势的贴合度(式(2)),对于多个 IHA 通过权重法计算河道天然径流情势贴合度(式(3))。

$$\mu_n = \exp[-(x_n - \bar{x}_n)^2 / 2\sigma_n^2] \quad (2)$$

$$D = \sum_{n=1}^N w_n \mu_n \quad (3)$$

式中: μ_n 为第 n 个 IHA 的高斯隶属度; x_n 为待评价径流的第 n 个 IHA 值; \bar{x}_n 为天然径流的第 n 个 IHA 均值; σ_n 为天然径流的第 n 个 IHA 的标准差; w_n 为第 n 个 IHA 的权重; D 为河道天然径流情势贴合度; N 为 IHA 总数。

1.2 水库群多目标优化调度模型

1.2.1 水库供水调度规则

调度图是水库群调度规则的核心。对于以供水为主的水库,调度图由各用水对象限制供水线及确定的若干调度分区组成。调度图各运行控制线由高到低依次是运行水位上限(非汛期为正常蓄水位,汛期为汛限水位)、各用水对象限制供水线和死水位。各用水对象限制供水线的位置由综合保证率要

求、供水优先次序确定。

1.2.2 目标函数与约束条件

考虑河道外社会经济供水目标和河道内生态目标,取社会经济缺水水量 F_1 最小为第 1 目标函数(式(4))、河道内生态缺水水量 F_2 最小为第 2 目标函数(式(5))、河道天然径流情势贴合度 F_3 最大为第 3 目标函数(式(6))。水库群调度约束条件主要包括水量平衡约束、蓄水量上下限约束、泄流上下限约束、决策变量非负约束及其他约束等。

$$f_1 = \begin{cases} 0 & S_{i,t,u} \leq W_{i,t,u} \\ \min F_1 & S_{i,t,u} > W_{i,t,u} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_2 = \begin{cases} 0 & E_{j,t,u} \leq G_{j,t,u} \\ \min F_2 & E_{j,t,u} > G_{j,t,u} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_3 = \max F_3 \quad (6)$$

其中

$$F_1 = \sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (S_{i,t,u} - W_{i,t,u})$$

$$F_2 = \sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (E_{j,t,u} - G_{j,t,u})$$

$$F_3 = \left(\sum_{y=1}^Y D_y / Y \right)$$

式中: $S_{i,t,u}$ 、 $W_{i,t,u}$ 为第 u 个水库的第 i 个河道外用水对象在 t 时段的需水量和供水量; $E_{j,t,u}$ 、 $G_{j,t,u}$ 为第 u 个水库的第 j 个河道内生态用水对象在 t 时段的需水量和供水量; I 为河道外用水对象总数,包括城乡生活和工业、农业灌溉、跨区域供水等; J 为河道内生态用水对象总数,包括河道内基本和目标生态用水对象; T 为调度时期段数; U 为水库个数; D_y 为第 y 年的河道天然径流情势贴合度; Y 为调度期水文年数。

1.2.3 模型求解与方案优选

采用 NSGA-III^[8] 求解水库群多目标优化调度模型。NSGA-III 与 NSGA-II^[31] 具有类似框架,二者区别在于选择机制的改变,NSGA-II 主要靠拥挤度进行排序,这种机制对高维目标空间作用相对有限,而 NSGA-III 通过引入广泛分布参考点维持种群多样性,能够获得均匀的 Pareto 解集。基于 Pareto 解集,采用逼近理想点法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)^[32-33] 设定指标和权重,寻求协调河道内生态供水和河道外供水效益的水库群均衡调度方案。

2 实例分析

2.1 研究对象

选择我国南方某水库群开展实例研究。研究区是重要的水源涵养区和优质水资源供给区,区域内

有 A、B 两座大 II 型水库,二者均具有重要防洪、供水、发电等综合功能。A 水库总库容 1.17 亿 m^3 ,集水面积 258 km^2 ;B 水库总库容 2.18 亿 m^3 ,集水面积 331 km^2 。两库下游 C 水文站控制流域集水面积 1316 km^2 ,多年平均年降水量为 1500 mm,多年平均年径流量为 10.3 亿 m^3 。研究区主要位于山区,具有水质优良、水量充足的优点,满足本地“三生”用水(生活、生产和生态用水)后,尚有一定外调潜力。

研究区水资源配置网络见图 1。该研究区两座水库需要考虑保障本地河道外供水、维系河道内生态需水、向外部区域调水的三重任务。就本地河道外供水而言,A 水库分别供给 A 水厂、A 水库灌区,B 水库分别供给 B 水厂、B 水库灌区,以满足供水范围内城乡生活和工业需水及灌区农业灌溉需水。两库通过明渠和隧洞单向连通,即 B 水库可从 A 水库引水。就河道内生态需水而言,A、B 水库下泄流量共同满足下游 C 水文站河道内基本与目标生态需水量的要求;就向外部区域调水而言,若 A、B 水库满足本地用水需求后,仍有余水可向 D 市区供水。

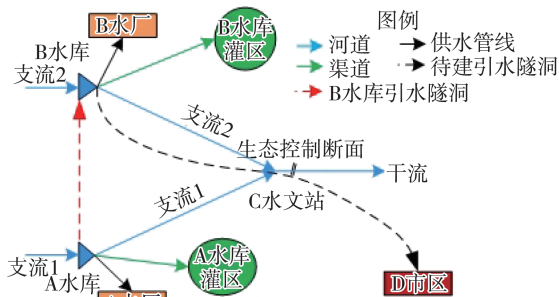


图 1 研究区水资源配置网络

Fig. 1 Water resource allocation network of study area

2.2 数据来源

a. 控制断面流量资料。C 水文站 1957—2018 年实测日径流由当地水文部门提供,资料经过整编和质量控制。

b. 入库径流资料。A、B 两水库 1957—2018 年逐月入库径流资料由水库管理局提供。

c. 社会经济需水资料。基于研究区水资源相

关规划,预测了 A、B 两水库供水范围内各用户 2030 年逐月需水量,包括城乡生活和工业需水量(全年 0.99 亿 m^3)、农业灌区需水量(全年 0.64 亿 m^3)及受水区需水量(全年 0.66 亿 m^3)。

2.3 生态目标结果

2.3.1 河道内生态需水量

河道内生态需水应在天然径流基础上进行计算。受气候变化和人类活动的共同影响,C 水文站实测径流系列统计规律发生了变异,且 1999 年为显著变异点^[28,34],此外,取用水规模增加和水利工程调控等人类活动的贡献率高于气候变化。本文以 1999 年为变异点,将 C 水文站 1957—1998 年实测径流作为天然径流,利用 RVA 法计算河道内基本与目标生态需水。图 2 给出了 C 水文站河道内基本与目标生态需水量过程,二者与天然径流的丰枯变化走势相似。为探讨 RVA 法确定河道内生态需水的合理性,图 2(b)(c)对比了 RVA 法与 Tennant 法确定的河道内基本与目标生态需水量过程。Tennant 法认为天然流量的 10% 为河道内基本生态需水,可以维持河道生物栖息地生存;天然流量的 30% 为河道内目标生态需水,能维持适宜的栖息地生态系统。两种方法确定的河道内基本和目标生态需水量在非汛期接近,而汛期差异较大。鱼类资源动态反映了河道内生态系统的健康状况,汛期大批鱼类将逆流而上到研究区产卵,在确定河道内生态需水时应充分结合水生物种繁衍所需^[35-37]。RVA 法计算的河道内生态需水可满足鱼类等水生生物在汛期的高流量需求,更具合理性。

2.3.2 河道径流情势

采用 PCA 法从第 2~5 组 IHA 中筛选出 C 水文站生态最相关水文指标(the most ecologically relevant hydrologic indicators, ERHIs),量化河道径流情势变化。主成分数量根据特征值大于 1 及累计贡献率超过 80% 确定。表 1 给出了 C 水文站 ERHIs 筛选结果,C 水文站 ERHIs 为年最小 30 d 流量、年最大 30 d 流量、低流量发生次数、高流量发生次数和年最小流量出现日期,对应权重分别为

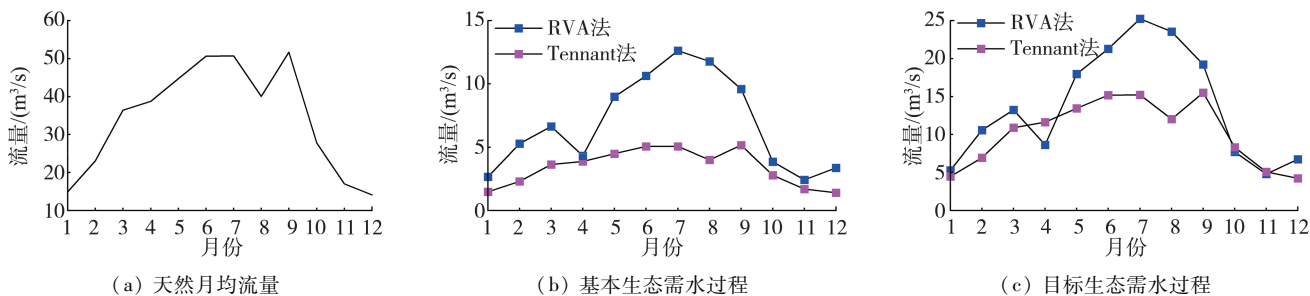


图 2 C 水文站河道内基本与目标生态需水量过程

Fig. 2 Instream basic and objective ecological water demand processes at C hydrological station

0.360、0.330、0.123、0.101 和 0.086。

表 1 PCA 法筛选 EHRIs 及对应权重

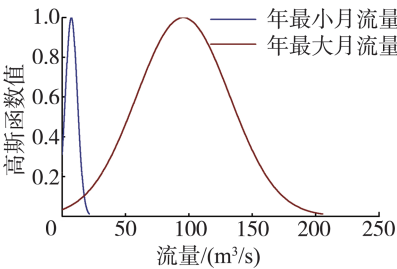
Table 1 EHRIs extracted by PCA and corresponding weights

主成分	权重	EHRIs	原始贡献率/%	校正贡献率/%
1	0.360	年最小 30 d 流量	29.50	35.98
2	0.330	年最大 30 d 流量	27.05	32.99
3	0.123	低流量发生次数	10.09	12.30
4	0.101	高流量发生次数	8.29	10.11
5	0.086	年最小流量出现日期	7.07	8.62
合计	1		81.99	100

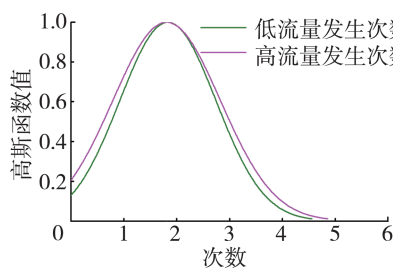
C 水文站变异前 1957—1998 年实测径流为天然径流^[28,34],此系列的径流干扰程度为适宜扰动。由于本次调度时段为月尺度,借鉴前人经验^[21],将 EHRIs 均简化为月尺度指标,分别是年最小月流量、年最大月流量、低流量发生次数、高流量发生次数和年最小月流量出现月份。图 3 给出了各 EHRIs 的高斯分布,年最小、年最大月流量平均值分别为 7.6 和 96.2 m³/s,标准差分别为 4.8 和 35.5 m³/s;高、低流量发生次数的平均值分别为 1.9 和 1.5 次,标准差分别为 0.8 和 0.9 次;年最小月流量平均值出现在 11—12 月,标准差为 2.6 月。5 个 EHRIs 的高斯分布均为中间型分布,与 IDH 理论较为相符。

2.4 水库群优化调度结果

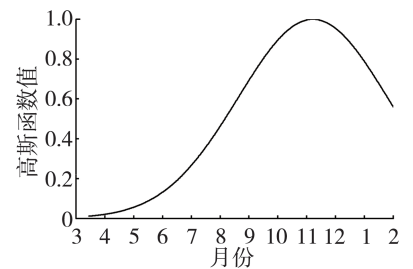
按照先本地后外地以及生态优先的原则,并考虑城乡生活和工业供水保证率目标高于农业灌溉供水,确定 A、B 水库调度图,从上到下依次是限制外供水线、限制域内河道内目标生态供水线、限制农业



(a) 年最小、年最大月流量



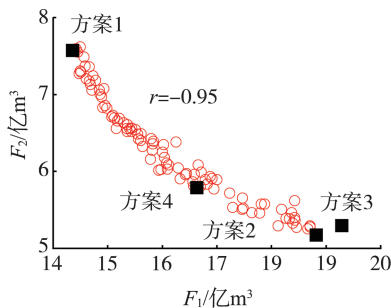
(b) 高、低流量发生次数



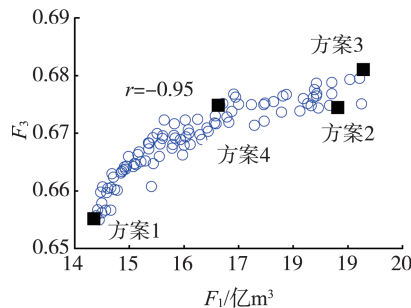
(c) 年最小月流量出现月份

图 3 C 水文站 EHRIs 的高斯分布

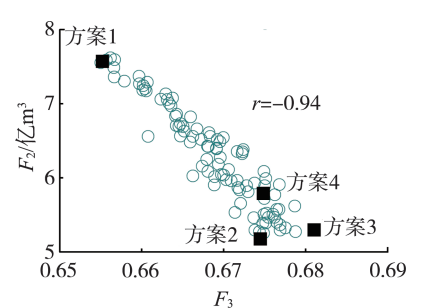
Fig. 3 Gaussian distributions of EHRIs at C hydrological station



(a) F_1 与 F_2 的关系



(b) F_1 与 F_3 的关系



(c) F_3 与 F_2 的关系

图 4 水库群多目标优化调度方案 Pareto 前沿解

Fig. 4 Pareto front strategies of multi-objective optimal operation scheme of reservoir group

灌溉供水线、限制河道内基本生态供水线和限制城乡生活和工业供水线。在满足水库自身供水范围内需水且有余水的条件下,可实施外供水(包括 B 水库向域外供水、A 水库向 B 水库供水),水库余水量定义为水库当前水位至限制城乡生活与工业供水线之间的蓄水量。以每年 3 月至翌年 2 月作为水利年,以月为模拟调度步长,计算时段为 1957 年 3 月至 2017 年 2 月,共 61 个水利年、732 月。NSGA-III 算法种群规模、迭代次数、交叉概率和变异概率分别设置为 100、200、0.9 和 0.1。

2.4.1 Pareto 前沿解

图 4 为水库群多目标优化调度方案 Pareto 前沿解。调度期社会经济缺水量 F_1 的取值范围为 14.35 亿 ~ 19.29 亿 m³,河道内生态缺水量 F_2 的取值范围为 5.18 亿 ~ 7.62 亿 m³,河道天然径流情势贴合度 F_3 的取值范围为 0.655 ~ 0.681。图 4(a) 表明目标函数 F_1 与 F_2 具有对抗关系,相关系数 r 为 -0.95;图 4(b) 表明目标函数 F_1 与 F_3 为协同关系, r 为 0.90;图 4(c) 表明目标函数 F_2 与 F_3 具有对抗关系, r 为 -0.94。

2.4.2 4 个方案分析

选取目标函数 F_1 、 F_2 、 F_3 分别达到最优时方案记为方案 1、方案 2 和方案 3,并利用 TOPSIS 法对各目标函数赋予等权重得到均衡调度方案,记为方案 4,如图 4 所示。表 2 给出了 4 个方案的用水对象保证率及河道天然径流情势贴合度均值。

表 2 4 个方案的用水对象保证率及河道天然径流形势贴合度均值

Table 2 Guarantee rate of water consumers and mean instream fit degree of natural flow regime of four schemes

方案	社会经济用水对象保证率/%			河道内生态用水对象保证率/%		河道天然径流形势贴合度均值
	城乡生活和工业	农业灌溉	外供水	河道内基本生态	河道内目标生态	
1	96.93	94.74	69.81	93.85	88.59	0.655
2	97.81	96.11	54.23	96.11	92.62	0.674
3	97.88	96.24	53.42	95.97	92.35	0.681
4	97.61	95.77	62.70	95.77	91.67	0.675

图 5 为 4 个调度方案的用水对象缺水水量。从图 5 可以看出,就河道外供水而言,城乡生活和工业及农业灌溉用水对象的缺水水量均为方案 1 最大,方案 4 次之,方案 2 和方案 3 较小,时段保证率从大到小排序均为方案 3、方案 2、方案 4 和方案 1,除方案 1 的农业灌溉保证率为 94.74% 外,其余方案用水对象保证率均超过了 95%;外供水的缺水从小到大大分别为方案 1、方案 4、方案 2 和方案 3,方案间差值最大达 6.4 亿 m^3 ,相应保证率分别为 69.81%、62.70%、54.23% 和 53.42%。受供水规则影响,外供水较城乡生活和工业及农业灌溉供水,在社会经济缺水水量中占比最高。

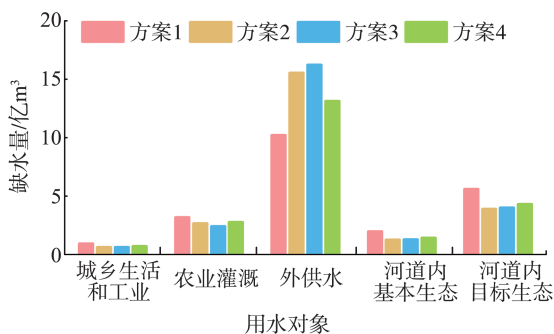


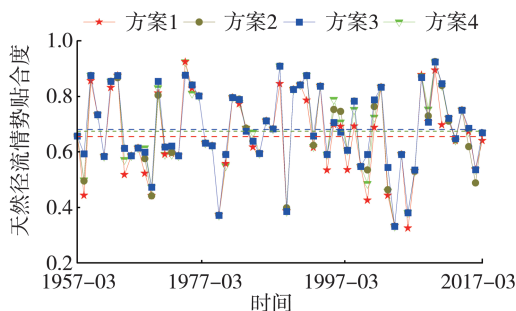
图 5 4 个方案的用水对象缺水水量

Fig. 5 Water shortage of water consumers of four schemes

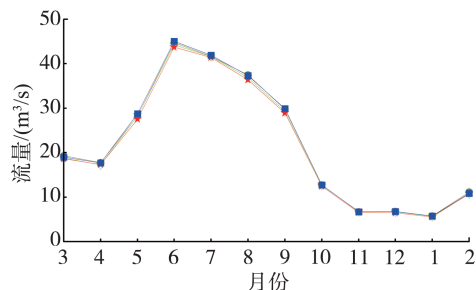
对于河道内生态供水,河道内基本和目标生态缺水水量从小到大大分别为方案 2、方案 3、方案 4 和方案 1,方案间河道内生态总缺水水量差值最大达 2.4 亿 m^3 。方案 2~4 河道内基本生态需水的保证率均超过了 95%,河道内目标生态需水的保证率均超过了 90%;方案 1 河道内基本和目标生态需水保证率分别为 93.85% 和 88.59%。

图 6 为 4 个方案在 C 水文站的河道天然径流形势贴合度及月均下泄流量。对于河道径流形势恢复程度,除极个别年份,方案 3 调度期内河道天然径流形势贴合度均大于其余方案(图 6(a)),4 个方案的河道天然径流形势贴合度均值从大到小依次为方案 3(0.681)、方案 4(0.675)、方案 2(0.674) 和方案 1(0.655)。C 水文站月均下泄流量在方案 2 和方案 3 较大,方案 1 和方案 4 较小(图 6(b))。4 个方案的下泄流量均大于河道内目标生态需水,但小于变

异前月均流量,尤其在非汛期,这是河道天然径流形势贴合度较低的主要原因。



(a) 天然径流形势贴合度



(b) 月均下泄流量

图 6 4 个方案在 C 水文站的河道天然径流形势贴合度及月均下泄流量

Fig. 6 Instream fit degree of natural flow regime and monthly mean released flow of four schemes at C hydrological station

2.4.3 与只考虑河道内生态需水调度模型的对比分析

参考已有研究^[9-11],构建生态目标仅考虑河道内生态需水量的水库群调度模型(情景 2),与本文增加河道天然径流形势贴合度的水库群调度模型(情景 1)进行对比。图 7 为情景 2 多目标优化调度方案 Pareto 前沿解,社会经济缺水水量 F_1 取值范围为 13.91 亿~18.96 亿 m^3 ,河道内生态缺水水量 F_2 取值范围为 5.38 亿~7.74 亿 m^3 。目标函数 F_1 与 F_2 具有对抗关系, r 为 -0.95。基于情景 2 Pareto 解集决策变量,模拟计算得到河道天然径流形势贴合度 F_3 的取值范围为 0.651~0.671。相比情景 2 的 Pareto 解集,情景 1 的社会经济缺水水量区间虽略有增大,但河道内生态缺水水量区间整体下降,且河道天然径流形势贴合度区间抬升幅度较大。情景 1 的 Pareto 解集更有利于河道内生态保护。

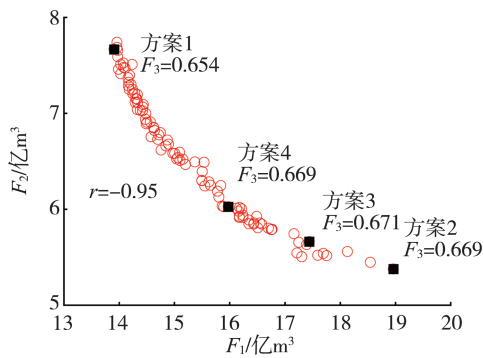


图7 情景2多目标优化调度的 Pareto 前沿解

Fig.7 Pareto front strategies of multi-objective optimal operation of scenario 2

情景1中由TOPSIS法优选出的调度方案4为均衡河道外供水效益和河道内生态需水效益的方案,在情景2中同样利用TOPSIS法对 F_1 、 F_2 、 F_3 赋予等权重得到均衡调度方案。图8为调度期内两种情景均衡调度方案的用水对象供、需水量和河道天然径流情势贴合度。就河道外社会经济供水而言,情景1、2城乡生活和工业的供水量分别为59.79亿和59.84亿 m^3 ,保证率分别为97.61%和97.75%;农业灌溉的供水量分别为36.3亿和36.2亿 m^3 ,时段保证率分别为95.77%和95.56%;对外供水的供水量分别为27.1亿和27.8亿 m^3 ,保证率分别为62.70%和65.57%。就河道内生态供水而言,情景

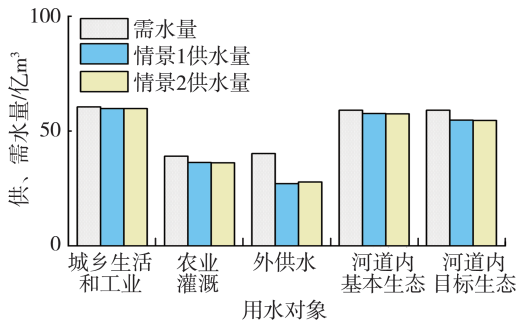
1、2在河道内基本生态的供水量分别为57.7亿、57.5亿 m^3 ,保证率分别为95.77%和95.42%;河道内目标生态的供水量分别为54.7亿和54.6亿 m^3 ,保证率分别为91.67%和91.60%。可见两个情景均衡调度方案在河道内外供水差异均较小。而情景1河道天然径流情势贴合度有超过2/3年份高于情景2,二者差值最大为0.099,情景1的河道天然径流情势贴合度均值为0.675,高于情景2的0.669。图7中黑色实心标记为情景2目标函数 F_1 、 F_2 、 F_3 分别达到最优和由TOPSIS法优选的均衡调度方案,当情景2取河道内生态缺水 F_2 最小时,河道天然径流情势贴合度 F_3 为0.669,小于情景1相应调度方案的0.674;情景2河道天然径流情势贴合度 F_3 最大值为0.671,也小于情景1中 F_3 的最大值0.681,因此,只考虑河道内生态需水的调度模型产生的水库下游河道径流情势,不能更好地满足对河道径流情势要求更严格的河流。

虽然河道内生态缺水量与河道天然径流情势贴合度具有一定的协同性,众多研究也试图通过满足河道内生态需水间接达到恢复河道径流情势的目标^[38],但满足河道内生态需水量和恢复河道天然径流情势两个生态目标不能同时实现最优,Yan等^[20]研究也表明满足单一的生态需求会牺牲另一个生态需求。

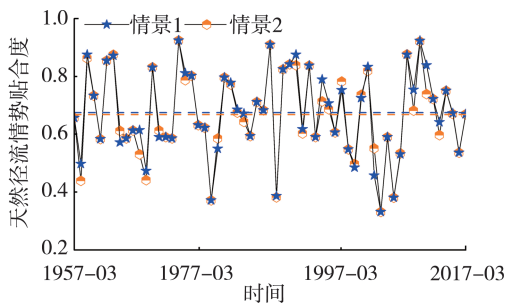
3 结论

a. 以河道内生态缺水量最小和河道天然径流情势贴合度最大为生态目标,结合河道外社会经济供水目标构建的多目标水库群优化调度模型在我国南方某水库群的应用中表明,基于TOPSIS法优选的均衡调度方案得到的城乡生活和工业、河道内基本生态及农业灌溉供水保证率均超过95%,河道内目标生态和外供水保证率分别为91.67%和62.70%,兼顾了社会效益和河流生态保护,可作为水库群推荐调度方案。

b. 增加了河道天然径流情势贴合度的水库群优化调度模型的均衡调度方案与仅考虑河道内生态需水调度模型的均衡调度方案相比,两者对河道内外的供水差异较小,但本文提出的模型提升了河道天然径流情势贴合度,更有利于维系河流生态系统健康,也可为其他流域水库构建更加完整健康的生态系统提供参考。



(a) 各用水对象供、需水量



(b) 河道天然径流情势贴合度

图8 两种情景均衡调度方案各用水对象供、需水量和河道天然径流情势贴合度

Fig.8 Accumulated water supply and demand of water consumers and instream fit degree of natural flow regime in balanced operation scheme of two scenarios

参考文献:

[1] DONG Ningpeng, YANG Mingxiang, YU Zhongbo, et al. Water resources management in a reservoir-regulated basin: implications of reservoir network layout on

- streamflow and hydrologic alteration [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124903.
- [2] 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))
- [3] 樊皓,李薇,张登成. 金沙江旭龙水电站生态流量及过程研究[J]. 水文, 2022, 42(5): 56-61. (FAN Hao, LI Wei, ZHANG Dengcheng. Study on ecological discharge and process of Xulong hydropower station in Jinsha River [J]. Journal of China hydrology, 2022, 42(5): 56-61. (in Chinese))
- [4] 于子铖,张晶,赵进勇,等. 考虑关键物种全生命周期的减脱水河段生态流量研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 175-184. (YU Zicheng, ZHANG Jing, ZHAO Jinyong, et al. Study on ecological flow of dewatered river sections considering whole life cycle of key species [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 175-184. (in Chinese))
- [5] 南军虎,刘一安,陈垚,等. 裁弯河道内生物栖息地改造及生态流量估算[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 189-197. (NAN Junhu, LIU Yi'an, CHEN Yao, et al. Reconstruction of biological habitat and ecological flow estimation in curving cut-off river channel [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 189-197. (in Chinese))
- [6] 胡和平,刘登峰,田富强,等. 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, 2008, 19(3): 325-332. (HU Heping, LIU Dengfeng, TIAN Fuqiang, et al. A method of ecological reservoir reoperation based-on ecological flow regime [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 刘百灵,李仓水,刘芳业. 基于 NSGA-III 的黄河上游梯级水库多目标调度研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(4): 140-144. (LIU Bailing, LI Cangshui, LI Fangye. Study on multi-objective operation of cascade reservoirs in the upper reaches of the Yellow River based on NSGA-III [J]. Yellow River, 2022, 44(4): 140-144. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 李力,周建中,戴领,等. 金沙江下游梯级水库蓄水期多目标生态调度研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 62-66. (LI Li, ZHOU Jianzhong, DAI Ling, et al. Study on multi-objective ecological operation of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinshajiang River during impoundment period [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(11): 62-66. (in Chinese))
- [11] 白涛,徐燕,孙宪阁,等. 官厅水库多目标调度规律与方案研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 101-108. (BAI Tao, XU Yan, SUN Xiange, et al. Study on multi-objective ecological operation of Guanting Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 101-108. (in Chinese))
- [12] 谷红梅,朱志鹏,王鸿翔,等. 1956-2019 年乌江水文情势变化及其对鱼类的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(4): 24-31. (GU Hongmei, ZHU Zhipeng, WANG Hongxiang, et al. Hydrological regime change and its influence on fish in Wujiang River from 1956 to 2019 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(4): 24-31. (in Chinese))
- [13] WANG H, BRILL E D, RANJITHAN R S, et al. A framework for incorporating ecological releases in single reservoir operation [J]. Advances in Water Resources, 2015, 78: 9-21.
- [14] SHIAU J T, WU F C. Optimizing environmental flows for multiple reaches affected by a multipurpose reservoir system in Taiwan: restoring natural flow regimes at multiple temporal scales [J]. Water Resources Research, 2013, 49(1): 565-584.
- [15] BARBOUR E J, HOLZ L, KUCZERA G, et al. Optimisation as a process for understanding and managing river ecosystems [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 83: 167-178.
- [16] YANG Tao, CUI Tong, XU Chongyu, et al. Development of a new IHA method for impact assessment of climate change on flow regime [J]. Global and Planetary Change, 2017, 156: 68-79.
- [17] LI Dongnan, WAN Wenhua, ZHAO Jianshi. Optimizing environmental flow operations based on explicit quantification of IHA parameters [J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 510-522.
- [18] 王加全,马细霞,李艳. 基于水文指标变化范围法的水库生态调度方案评价[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 107-112. (WANG Jiaquan, MA Xixia, LI Yan. Evaluation of reservoir ecological operation schedule by range of variability approach [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 107-112. (in Chinese))
- [19] 高玉琴,周桐,马真臻,等. 考虑天然水文情势的水库调度图优化[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 60-67. (GAO Yuqin, ZHOU Tong, MA Zhenzhen, et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological

- regime[J]. *Water Resources Protection*,2020,36(4):60-67. (in Chinese))
- [20] YAN Min, FANG Guohua, DAI Linghui, et al. Optimizing reservoir operation considering downstream ecological demands of water quantity and fluctuation based on IHA parameters[J]. *Journal of Hydrology*,2021,600:126647.
- [21] SUEN J P, EHEART J W. Reservoir management to balance ecosystem and human needs: incorporating the paradigm of the ecological flow regime [J]. *Water Resources Research*,2006,42(3):W03417.
- [22] IMAI N, SAMEJIMA H, DEMIES M, et al. Response of tree species diversity to disturbance in humid tropical forests of Borneo[J]. *Journal of Vegetation Science*,2016,27(4):739-748.
- [23] 刘阳. 城市河流水文情势分析及生态调度研究[D]. 济南:山东大学,2020.
- [24] 王海霞. 考虑生态目标的水库引水与供水联合调度研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [25] 马晓超. 基于生态水文特征的渭河中下游生态环境需水研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [26] 舒畅,刘苏峡,莫兴国,等. 基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算[J]. *生态环境学报*,2010,19(5):1151-1155. (SHU Chang, LIU Suxia, MO Xingguo, et al. Estimation of instream ecological flow based on RVA [J]. *Ecology and Environmental Sciences*,2010,19(5):1151-1155. (in Chinese))
- [27] 张志广,金弈,李克锋,等. 基于RVA法的河流生态基流过程研究[J]. *水利水电技术*,2017,48(9):155-160. (ZHANG Zhiguang, JIN Yi, LI Kefeng, et al. RVA method-based study on river ecological baseflow hydrograph [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*,2017,48(9):155-160. (in Chinese))
- [28] WANG Qin, WANG Shuwen, HU Qingfang, et al. Calculation of instream ecological water requirements under runoff variation conditions:taking Xitiaoxi River in Taihu Lake Basin as an example [J]. *Journal of Geographical Sciences*,2021,31(8):1140-1158.
- [29] 中华人民共和国水利部. 河湖生态环境需水计算规范:SL/T 712—2021 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2021.
- [30] 任锦豪,乔长录,赵进勇,等. 基于主成分分析法的玛纳斯河水文情势分析[J]. *水电能源科学*,2022,40(1):25-29. (REN Jinhao, QIAO Changlu, ZHAO Jinyong, et al. Analysis of river hydrological regime in Manas River based on principal component analysis [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40 (1): 25-29. (in Chinese))
- [31] 李伶杰,王银堂,马敬梅,等. 基于改进NSGA-II的龙江和瑞丽江梯级水电站联合优化调度[J]. *水资源保护*,2022,38(2):83-90. (LI Lingjie, WANG Yintang, MA Jingmei, et al. Joint optimal scheduling of Longjiang and Ruilijiang cascade hydropower stations based on improved NSGA-II [J]. *Water Resources Protection*,2022,38(2):83-90. (in Chinese))
- [32] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重TOPSIS模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. *水资源保护*,2020,36(2):1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. *Water Resources Protection*,2020,36(2):1-7. (in Chinese))
- [33] 朱洁,冯建刚,高玉琴,等. 基于BWM-CRITIC-TOPSIS的幸福河湖综合评价模型[J]. *水利水电科技进展*,2022,42(6):8-14. (ZHU Jie, FENG Jiangang, GAO Yuqin, et al. Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2022,42(6):8-14. (in Chinese))
- [34] 代晓颖,许有鹏,林芷欣,等. 太湖西苕溪流域径流变化归因分析[J]. *长江流域资源与环境*,2018,27(6):1279-1286. (DAI Xiaoying, XU Youpeng, LIN Zhixin, et al. Attribution analysis for runoff change in Xitiaoxi Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2018,27(6):1279-1286. (in Chinese))
- [35] LI Ruonan, CHEN Qiuwen, 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.
- [36] 易雨君,徐嘉欣,宋劫,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 Jiabin, 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))
- [37] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. *水利水电科技进展*,2021,41(2):8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2021,41(2):8-14. (in Chinese))
- [38] 程俊翔,徐力刚,姜加虎. 生态最相关水文指标的优选及其在洞庭湖环境流量估算中的应用[J]. *湖泊科学*,2018,30(5):1235-1245. (CHENG Junxiang, XU Ligang, JIANG Jiahu. Optimal selection of the most ecologically relevant hydrologic indicators and its application for environmental flow calculation in Lake Dongting [J]. *Journal of Lake Sciences*,2018,30(5):1235-1245. (in Chinese))

(收稿日期:2022-11-03 编辑:施业)