

西江流域水库群调度对非一致性入库径流的敏感性响应特征

任 康^{1,2,3}, 周子航^{1,2}, 李昕媛^{1,2}, 黄 强³

(1. 三峡大学水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要:为揭示西江流域水库群调度对非一致性入库径流的响应特征,实现水库适应性调度运行,采用进化多目标直接策略搜索算法,构建了西江流域水库群多目标优化调度模型,求解得到权衡发电、生态、水位多目标的最优解,并在一致性和非一致性径流条件下,采用敏感性分析方法对最优解重新评估,揭示了调度目标对入库径流的敏感性响应特征。结果表明:梧州站生态缺水率和水位风险率与西江流域水库群平均出力存在显著竞争关系,调度目标对入库径流的敏感性在不同最优解间差异不显著,但对非一致性径流响应更敏感;非一致性径流丰枯变化更加显著,在一定程度上增大了梯级水库群平均出力,使梧州站生态缺水率和水位风险率更高。

关键词:水库群调度;非一致性径流;多目标优化调度模型;直接策略搜索算法;敏感性分析方法;西江流域

中图分类号:TV213 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2025)06-0139-10

Sensitivity response characteristics of reservoir group operation in the Xijiang River Basin to non-stationary inflow runoff//REN Kang^{1,2,3}, ZHOU Zihang^{1,2}, LI Xinyuan^{1,2}, HUANG Qiang³ (1. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To reveal the response characteristics of reservoir group operation to the non-stationary inflow runoff and achieve adaptive reservoir operation, the reservoir group in the Xijiang River Basin was used as a research object. An evolutionary multi-objective direct policy search algorithm was employed to construct a multi-objective optimization operation model for the reservoir group, and the optimal solutions that balance multiple objectives of power generation, ecology, and water level were obtained. Under both stationary and non-stationary runoff conditions, the sensitivity analysis method was used to re-evaluate the optimal solutions, and further to reveal the sensitivity response characteristics of operation objectives to inflow runoff. The results indicate that there are significant trade-off relationships between the rates of ecological water shortage and water level risk at the Wuzhou station and the average output of the reservoir group in the Xijiang River Basin. The sensitivity of operation objectives to inflow runoff does not show significant differences among different optimal solutions, but it is more responsive to non-stationary runoff. The wet-dry variations in runoff under non-stationary conditions are more pronounced, which to some extent enhances the average output of the cascade reservoir group, while also leading to higher rates of ecological water shortage and water level risks at the Wuzhou station.

Key words: reservoir group operation; non-stationary runoff; multi-objective optimization operation model; direct policy search algorithm; sensitivity analysis method; the Xijiang River Basin

在流域水资源综合管理中,水库群优化调度是实现流域水资源综合利用目标的重要保证^[1]。基于确定性径流的水库群中长期优化调度模型(如隐随机模型)需要通过对优化调度结果进行回归和拟合操作来得到优化调度规则,得到的优化调度规则

不可避免会失真^[2-3]。受到径流不确定性的制约,优化调度规则只能作为决策参考,不能直接指导水库群的实际运行调度。气候变化和人类活动改变了流域水循环,径流的一致性状态被破坏,非一致性径流进一步加剧了水库群优化调度在实际中难以实施的

问题^[4]。因此,水库群调度不仅需要应对径流的不确定性,还需要针对不同调度目标建立合理的调度模型,制定适用的调度规则^[5-6]。

目前的研究表明,不同调度目标对径流不确定性因素的响应存在显著差异,即不同的调度目标对不确定性因素的敏感性不同。Watson 等^[7]提出将不确定因素和进化多目标直接策略搜索(evolutionary multi-objective direct policy search, EMODPS)算法耦合,通过将不确定性径流状态整合到调度模型决策过程中,研究了不确定性因素对决策和效益目标的影响;Quinn 等^[8]应用 EMODPS 算法构建了包含防洪、发电和农业供水目标的水库群多目标优化调度模型,通过将调度规则在未来不确定性集合中重新评估,研究了不同调度目标对不确定性因素的敏感性响应关系;汪芸等^[9]考虑了丹江口水库长期兴利调度中的不确定性问题,将敏感性分析理论应用到水库优化调度不确定性分析中,探讨了不同的不确定性因素对兴利调度的影响;彭安帮等^[10]为了解决水库优化调度中“维数灾难”问题,构建了基于时段敏感性分析的水库优化调度降维模型,通过获得不同时段调度图参数对目标函数的敏感性程度,提高了算法的求解效率。以上研究表明,径流的不确定性不仅是影响水库群调度效益的核心要素,更是制约水资源管理效率与可持续性的关键因素。

径流的不确定性源于多方面的自然与人为因素,包括气候变化导致的降水模式变化、蒸发量的增减、土地利用方式的转变以及水文循环的内部变异性等^[11-12]。这些因素相互作用,共同塑造了径流在时间和空间上的高度不确定性和复杂性,为水库群调度带来了前所未有的挑战^[13]。此外,全球气候变化的加速对产汇流机制的影响日益显著,导致径流的一致性特征被打破,非一致性特征凸显^[14]。黄建雄等^[15]研究了黄河径流和输沙量的变异性,结果表明水利工程的调控使流域内水沙发生了显著变化;郭生练等^[16]采用非一致性洪水频率分析方法研究了运行期三峡水库调度方案,结果表明基于原单站设计洪水确定的三峡水库调度策略已无法满足非一致性入库径流下的调度需求;冯平等^[17]研究了径流变异对水库调度的综合影响,结果表明入库径流变异导致水库供水保证率显著下降。以上研究表明,径流的非一致性对水库群的蓄水、放水、发电、防洪及生态维护等多功能协调提出了更高的要求,使得传统基于确定性的调度策略难以适应新的水文情势。因此,揭示水库群调度对非一致性入库径流的响应特征,从而制定合理的非一致性径流条件下水

库群调度规则,是目前流域水库群调度和水资源管理面临的重要问题^[4]。

基于此,本文构建了基于 EMODPS 算法的西江流域水库群发电、生态、水位多目标优化调度模型,在径流不确定性状态下对最优调度结果重新评估,应用敏感性分析方法,揭示西江流域水库群发电、生态、水位多目标对一致性和非一致性径流的响应特征。研究成果可为水库群在变化环境下的适应性调度运行提供理论基础,对实现水库群科学调度运行具有重要意义。

1 研究区概况与数据资料

珠江是我国第三大河,全长 2 320 km,流域面积 453 690 km²。珠江流域地处热带和亚热带气候区,降水总体空间分布由东向西呈递减趋势,主要集中在 6—8 月,流域暴雨强度大、持续时间长。目前,粤港澳大湾区特大城市群的继续扩张导致用水需求显著增加,特别是枯水季节,干旱持续威胁珠江三角洲供水的可靠性^[18],集中的降水和高密度的人口也导致珠江三角洲严重的洪涝灾害问题^[19]。此外,珠江三角洲入海径流减少以及海平面上升导致咸潮入侵,进一步影响了粤港澳大湾区的供水安全^[20]。在此背景下,政府部门在合理调度珠江流域现有水库群的同时,正在规划建设新的流域控制性水利工程(如大藤峡水利枢纽),以增加珠江入海口旱季的径流量,减轻汛期的洪水风险。

在珠江流域水资源综合管理中,主要的流域控制性水库基本位于西江流域(图 1),西江流域水库群调度对珠江流域防洪、供水和发电均有重要贡献。西江流域梧州水文站是国家重要的水文测站,其集水面积占流域总集水面积的 94.6%,控制了 85% 的来水。梧州站水位和流量变化直接反映了流域的水资源状况,在西江流域防汛抗洪中具有重要的地位和作用。由于梧州站的地理位置、水文特征以及在流域中的关键作用,本文选取该站作为评估西江流域水库群调度水位风险和生态缺水的重要站点。目前西江流域水库群调度中,要求梧州站最低环境(压咸)流量不低于 1 900 m³/s,水位不低于 3.3 m,以防止咸潮入侵和保证枯水期下游生态与供水安全;汛期要求其洪水位不超过 18.5 m,以保证下游防洪安全。西江水库群包含西江流域主要的防洪和发电水库,包括西江干流以及支流南盘江、北盘江和郁江 4 座年调节水库(光照、天一、龙滩和百色)和 4 座日调节水库(岩滩、西津、红花和长洲),8 座水库共同构成了一个水库群系统。不同水库的空间位置和水力联系如图 1 所示,特征参数如表 1 所示。

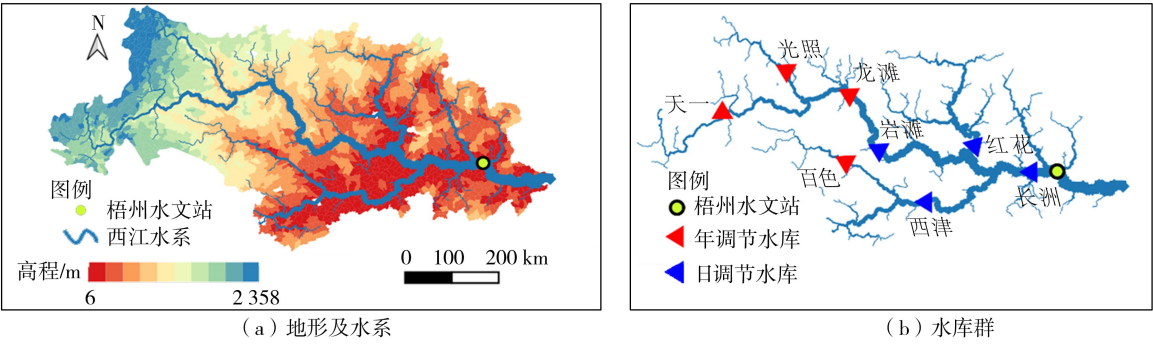


图 1 西江流域概况

Fig. 1 Overview of the Xijiang River Basin

表 1 西江流域水库群特征参数

Table 1 Characteristic parameters of reservoir group in the Xijiang River Basin

水库	总库容/ 亿 m ³	调节库容/ 亿 m ³	多年平均入库 径流量/亿 m ³	正常蓄 水位/m	死水位/m	防洪限制 水位/m	保证出力/ MW	装机容量/ MW
光照	32.45	20.37	81.0	745.0	691.0	745.0	180.2	1040.0
天一	102.57	57.96	193.0	780.0	731.0	776.4	405.2	1200.0
龙滩	162.10	111.50	517.0	375.0	330.0	359.3	1234.0	4900.0
百色	56.60	26.00	82.9	228.0	203.0	214.0	123.0	540.0
岩滩	34.30	15.60	558.0	223.0	212.0	222.5	245.0	1210.0
西津	30.00	14.00	504.0	63.6	59.6	63.6	46.5	234.4
红花	30.00	5.70	397.0	77.5	72.5	77.5	27.4	230.0
长洲	56.00	37.40	1923.7	20.6	18.6	18.6	247.0	630.0

西江流域水库群系统由水利部珠江水利委员会对汛期洪水进行集中调度,实现西江流域下游的防洪目标,各电力公司控制水库系统中不同水库的发电过程,各水库发电计划根据电力市场用户的电力需求决定。因此,集中式防洪调度和分散的发电调度导致西江流域水库群系统尚未建立起发电、生态、防洪多目标调度体系。

本文收集了水库群地理位置、特征参数、历史入库径流、区间径流及水库群调度规程等数据资料,水库群入库径流及区间径流时间系列为 1997 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日。水库群特征参数资料来源于文献[21],径流数据来源于水利部珠江水利委员会水文局等部门。

2 研究方法

2.1 水库群多目标优化调度模型

2.1.1 多目标优化调度模型目标函数及约束条件

20 世纪 60 年代以来,以效益最大化为目标的水库群优化调度已通过线性规划、动态规划和启发式优化算法得到了广泛研究^[22]。但线性规划和动态规划算法受到“维数灾难”、非线性建模和多目标权衡等问题的限制,无法有效应用于复杂的实际水库调度中。现有研究将 EMODPS 算法与非线性近似网络模型和多目标进化算法 (multi-objective evolutionary algorithm, MOEA) 相结合,为优化水库

调度规则提供了更加有效的设计框架^[23]。MOEA 受到自然选择和生物进化的启发,可用于解决非凸、非线性多目标优化问题^[24-25]。EMODPS 算法不需要离散决策变量,在解决复杂水库群多目标调度问题时,可以与 MOEA 耦合,得到权衡多个效益目标的优化调度规则。此外,本文采用非支配排序遗传算法 (NSGA-III)^[26] 对西江流域水库群多目标优化调度模型求解。

本文基于 EMODPS 算法建立西江流域水库群多目标优化调度模型,该模型的调度目标为水库群平均出力最大、梧州站水位风险和生态缺水最低。使用非线性近似网络模型对水库群调度规则进行参数化,利用 MOEA 对调度规则参数 (即状态变量) 进行优化:

$$\begin{cases} P_{\theta}^* = \operatorname{argmin}_{\theta} (-J_p, J_h, J_E) \\ \text{s. t. } \begin{cases} \theta \in \Theta \\ h_{t+1} = f(h_t, q_{o,t}, q_{i,t+1}) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$J_p = \frac{1}{T} \sum_{r=1}^R \sum_{t=0}^{T-1} \eta_r g \gamma_w h_{N,t,r} q_{t+1,r}$$
$$J_h = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} u(h_{W,t+1})$$
$$u(h_{W,t+1}) = \begin{cases} 1 & h_{W,t+1} < 3.3 \text{ m 或 } h_{W,t+1} > 18.5 \text{ m} \\ 0 & 3.3 \text{ m} \leq h_{W,t+1} \leq 18.5 \text{ m} \end{cases}$$
$$J_E = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \max(e_{r,t} - e_{s,t}, 0) / e_{r,t}$$

式中: P_{θ}^* 为优化调度规则函数; J_p 为平均出力最大目标值; J_h 、 J_E 分别为下游梧州站水位风险和生态缺水最低目标值; T 为调度时长; θ 为调度规则参数集; Θ 为参数空间; h_t 为水库群 t 时刻的水位; $q_{o,t}$ 为 t 时刻水库群出库流量; $q_{i,t+1}$ 为 $t \sim t+1$ 时段水库群入库流量; $f(\cdot)$ 为状态转移函数; r 为水库编号; R 为水库总数, 本文取 $R=8$; η_r 为水轮机效率系数; g 为重力加速度; γ_w 为水的密度; $h_{N,t,r}$ 为 t 时刻净发电水头; $q_{t+1,r}$ 为 $t+1$ 时刻发电流量; $h_{w,t+1}$ 为梧州站 $t+1$ 时刻水位; $e_{r,t}$ 为梧州站 t 时刻需求的生态流量 ($e_{r,t}=1\,900\text{ m}^3/\text{s}$); $e_{s,t}$ 为梧州站 t 时刻实际生态流量。

水库群多目标优化调度模型的约束条件和常规模型没有显著差异, 主要约束条件的范围如表 1 所示, 包括: ①水量平衡约束, 要求水库水量变化满足水量平衡原理; ②水位限制约束, 要求水库水位保持在安全范围内; ③电站出力约束, 保证水电站的出力在允许范围内。

2.1.2 基于径向基函数的参数化调度规则

基于 EMODPS 算法的多目标优化调度模型的目标是找到参数集 θ 的帕累托最优集 θ^* , 使水库群平均出力最大、梧州站水位风险和生态缺水最低。采用径向基函数(radial basis function, RBF)将调度规则参数化, 研究表明 RBF 用于设计水库群帕累托近似调度规则时优于人工神经网络^[23]。参数化的水库调度规则映射了决策变量 $q_{o,t}$ 与输入变量之间的函数关系:

$$q_{o,t} = P_{\theta}(I_t) \quad (2)$$

式中: I_t 为 t 时刻输入变量; $P_{\theta}(\cdot)$ 为调度规则函数。

利用 RBF 将第 k 个决策变量表示为

$$q_{o,t,k} = \sum_{i=1}^N w_{i,k} \varphi_i(I_t) \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

其中 $\varphi_i(I_t) = \exp\left[-\sum_{j=1}^M (I_{t,j} - c_{j,i})^2 / b_{j,i}^2\right] I_{t,j}$

式中: $w_{i,k}$ 为第 i 个 RBF 的权重, $\sum_{i=1}^N w_{i,k} = 1$; n 为年调节水库数量; N 为 RBF 的个数, 本文取 $N=6$; M 为输入变量个数, 本文输入变量为 4 个年调节水库的时段蓄水量和入库流量, $M=8$; $I_{t,j}$ 为 t 时刻第 j 个输入变量; $c_{j,i}$ 、 $b_{j,i}$ 分别为经标准化后第 i 个 RBF 的 j 维中心和半径变量, 分别取值为 $-1 \sim 1$ 和 $0 \sim 1$ 。参数化后 $\theta = \{c_{j,i}, b_{j,i}, w_{i,k}\}$ 。

2.2 非一致性径流随机模拟方法

在评估水资源系统不确定性时, 水文、气象等物理模型基于气候系统和水文过程, 通过模拟不同气

候情景下的未来气候变量作为水文模型的输入, 进而得到评估水资源系统状态的径流条件^[27]。然而, 物理模型也面临着一些挑战, 例如模型参数的不确定性、输入数据的误差以及计算成本较高等问题。相比之下, 从统计学角度对径流进行随机模拟具有独特的优势。统计方法通过分析历史径流数据, 利用概率分布函数和随机过程理论, 能够生成具有更广泛取样范围的径流序列, 从而更好地再现历史径流的统计特征。研究表明, 径流随机模拟方法比物理模型更适用于评估水资源系统的状态, 尤其是在考虑多种不确定性因素和进行长期规划时, 能够为决策者提供更全面的风险评估^[28]。

基于以上考虑, 本文采用 Kirsch 等^[29]提出的径流随机模拟方法。该方法在模拟径流和实测径流样本统计参数(均值、方差等)一致的前提下, 能够模拟得到一致性径流时间序列。而随着气候变化和人类活动加剧, 径流的统计特征参数可能会发生变化, 即出现非一致性径流。非一致性径流对水资源系统的调度和管理提出了新的挑战。例如, 入库径流年均值或方差变化可能导致水库群调度方式显著改变, 增加系统的运行风险。为研究径流统计特征参数变化(即非一致性径流)对水库群调度的影响, 本文采用非一致性抽样方法^[8], 基于对数空间年均值乘数和方差乘数以及模拟得到的径流序列生成年均值和方差变化的非一致性径流序列。

西江流域水库群上游光照、天一、百色和红花水库的入库径流未受到其他水库的影响, 而其余 4 座水库入库径流包括上游水库的下泄和区间入流。因此, 进行入库径流时间序列模拟时, 需要模拟上游 4 座水库的入库径流和其余 4 座水库的区间入流过程。以光照水库入库径流时间序列模拟为例, 与历史径流资料对比, 通过抽样算法得到的水库入库径流过程分布范围扩大, 且符合历史径流系列的统计分布特征, 如图 2(a) 所示。模拟得到的径流序列满足时间序列一致性要求, 表明抽样算法的合理性。通过对数空间的均值和方差乘数, 生成均值和方差变化的非一致性径流时间序列集合, 如图 2(b) 和 (c) 所示, 图中增大、减小径流的均值乘数分别为 1.05 和 0.95, 方差乘数分别为 1.5 和 0.5。均值和方差是径流时间序列的统计特征, 入库径流均值增大或减小表明水库可用水量的增大或减小; 入库径流方差增大表明水库入库径流序列在年内分布更加不均匀, 波动更大。因此, 可通过均值和方差变化的径流序列来评估水库群如何应对更加不均匀的来水过程。

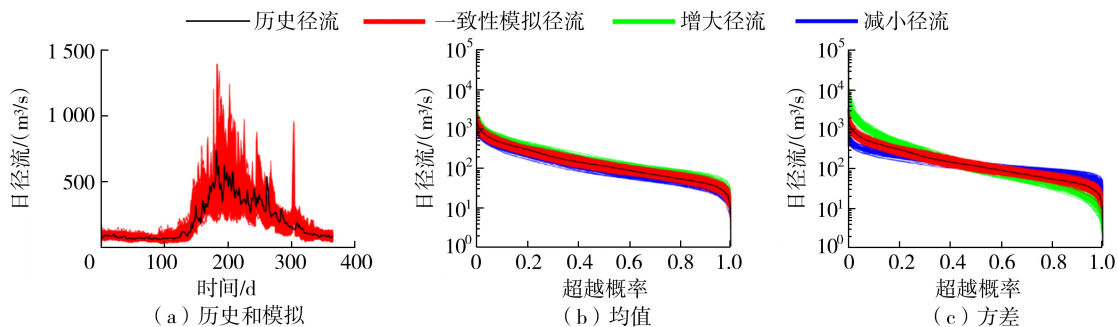


图2 径流随机模拟结果

Fig. 2 Stochastic simulation results of runoff

2.3 全局敏感性分析方法

全局敏感性分析方法主要用于量化模型中输入变量、模型参数和模型结构的不确定性对其输出变量变化的相对贡献^[30],该方法通过确定对模型输出影响最大的不确定性参数集合来提高模型率定的效率,可以用来评估模型预测结果对各种不确定性来源的稳健性。在全局敏感性分析方法中,应用最广泛的是基于方差的敏感性分析方法^[30],其将敏感度量度为每个不确定输入因素变化导致输出变量方差变化的比例。但是,当模型输出变量的分布为高度偏态分布或多模态时,基于方差的敏感性分析方法无法表征模型的全局敏感性。为了避免上述问题,本文采用基于概率分布的敏感性分析方法进行全局敏感性分析。

依据该敏感性分析方法,输出变量 y 对输入变量 x_i 的敏感性由改变所有输入变量所得到输出变量的无条件分布与改变除 x_i 以外的所有输入变量所得到输出变量的条件分布之差来衡量。该方法采用输出变量的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)来度量模型的全局敏感性。输出变量 y 对输入变量 x_i 的敏感性可表示为

$$K_i = \max_y |F_y(y) - F_{y|x_i}(y|x_i)| \quad (4)$$

式中: K_i 为 Kolmogorov-Smirnov 统计量,取值为 0~1,其值越接近于 1,表示输出变量 y 对输入变量 x_i 的敏感性越强; $F_y(y)$ 、 $F_{y|x_i}(y|x_i)$ 分别为变量 y 的无条件和条件 CDF。

3 结果与分析

3.1 多目标优化调度结果

基于历史日径流数据,采用 NSGA-III 算法求解西江流域水库群多目标优化调度模型,得到水库群发电、生态、水位多目标帕累托均衡解集,见图 3,图中的每一个标记均为一个可行解,每一个解均可以确定一个 RBF 形式,即西江水库群的优化调度规则。图 3 的结果显示,梧州站生态缺水率与水库群

平均出力呈现出显著竞争关系,水库群平均出力越大,梧州站生态缺水率越高;而梧州站水位风险率与生态缺水率为协同关系,梧州站水位风险率越低,其生态缺水率也越低。在最优解 1 下梧州站生态缺水率和水位风险率达到最小值,而水库群平均出力最小;在最优解 2 下水库群平均出力、梧州站生态缺水率和水位风险率达到最大值;最优解 3 为权衡了所有目标函数的最优解。模型求解结果显示,梧州站生态缺水率的范围为 0.044~0.059,水库群平均出力的范围为 3 546.16~3 593.82 MW,梧州站水位风险率的范围为 0.192~0.233。而西江流域水库群 1997 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日的实际调度中,梧州站生态缺水率、水位风险率和水库群平均出力分别为 0.12、0.30 和 3 250 MW。因此,多目标优化调度模型可以有效降低梧州站生态缺水率和水位风险率,提高水库群平均出力。

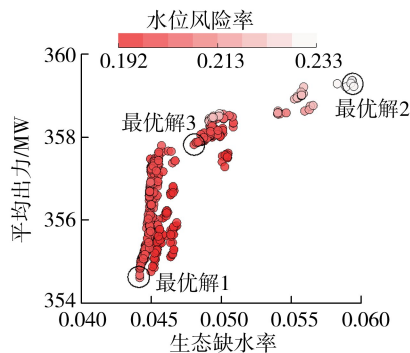


图3 优化调度模型求解结果

Fig. 3 Results of optimization operation model

表 2 给出不同水库平均出力与梧州站水位风险率和生态缺水率在不同最优解下的关系。对比最优解 1 和最优解 2 可以看出,光照和天一水库平均出力与水库群平均出力之间存在显著竞争态势,而与梧州站水位风险率和生态缺水率则显示出一定的协同效应。相反,龙滩和百色水库平均出力与水库群平均出力呈现协同关系,而与梧州站水位风险率和生态缺水率形成竞争关系。其他日调节水库的发电效益与水库群整体发电效益之间的关系则更为复

表 2 不同水库平均出力与梧州站生态缺水率和水位风险率关系

Table 2 Relationship between mean power generation of different reservoirs and rates of ecological water shortage and water level risk at Wuzhou station

最优解	梧州站生态缺水率	梧州站水位风险率	平均出力/MW					
			水库群	光照水库	天一水库	龙滩水库	百色水库	其他水库
1	0.044	0.192	3 546.160	239.480	398.770	1 446.680	138.770	1 322.460
2	0.059	0.233	3 593.820	238.220	395.910	1 490.860	165.060	1 303.770
3	0.047	0.210	3 578.040	239.090	398.940	1 453.260	163.310	1 323.450

注:其他水库表示 4 座日调节水库的综合出力。

杂。在最优解 3 下,西江流域水库群优化调度模型的各个目标函数间达到了良好的平衡,能够兼顾不同水库的出力需求。因此,将水库群的平均出力设为优化目标之一,并不能确保每个单独水库的发电效益与水库群整体效益完全一致。特别是作为水库群核心的龙滩水库,其庞大的库容和发电装机容量使其发电效益与水库群总效益高度吻合,其平均出力与梧州站水位风险率和生态缺水率呈现出竞争态势。综上所述,水库群优化调度需综合考虑各水库特性及多重目标,以实现整体效益的最大化。

3.2 水库群调度对径流的敏感性响应

利用非一致径流集合对西江流域水库群多目标优化调度模型在历史数据下得到的最优解重新评估,并应用敏感性分析方法研究整个调度期内不同调度目标对径流的敏感性响应特征。

图 4 为一致性和非一致性径流条件下的最优解评估结果。结果显示,在相同径流条件下水库群平均出力和梧州站生态缺水、水位风险目标在不同最优解下的 CDF 曲线几乎重合,表明这些解在 3 个目标上的分布非常相似,没有因最优解的不同而显示出显著的差异。但是,平均出力、生态缺水和水位风险目标在一致性和非一致性径流条件下具有显著的差异。非一致性径流下所有目标的 CDF 曲线分布范围均大于一致性径流下的 CDF 曲线范围,表明在非一致性径流条件下西江流域水库群可能面临更加严峻的出力不足、生态缺水和水位风险。上述结果和目前针对径流变化下水库群调度的相关研究成

果^[16-17]均表明,径流的非一致性将显著改变流域水库群的调度方式,在后续研究中需要针对非一致性径流制定具备适应性和稳健性的调度规则,以减轻未来可能发生的风险。

图 5 为水库群发电、生态、水位多目标对径流的敏感性响应特征。为了减少敏感性度量 K 值的误差,对 K 值进行了多次计算。图 5(a)的结果显示,平均出力目标在一致性径流下,最优解 1、2、3 的 K 均值分别为 0.42、0.45 和 0.49;非一致性径流下的 K 均值相比一致性径流下的 K 均值分别增加了 50%、40%和 35%。图 5(b)结果显示,生态缺水目标在一致性径流下,最优解 1、2、3 的 K 均值分别为 0.56、0.65 和 0.69,非一致性径流下的 K 均值相比一致性径流下的 K 均值分别增加了 33%、25%和 3%。图 5(c)的结果显示,水位风险目标在一致性径流下,最优解 1、2、3 的 K 均值分别为 0.39、0.40 和 0.42,非一致性径流下的 K 均值相比一致性径流下的 K 均值分别增加了 44%、36%和 52%。结果表明,目标函数对径流的敏感性在不同最优解下的差异性小于其在一致性和非一致性径流下的差异性,对非一致性径流的敏感性显著强于对一致性径流的敏感性。且当径流由一致性向非一致性变化时,所有目标函数对径流的敏感性均有所增强,表明径流变化对水库群调度的影响显著增加。

3.3 水库群调度目标与径流的相关性

图 6 为一致性和非一致性径流下流域平均径流

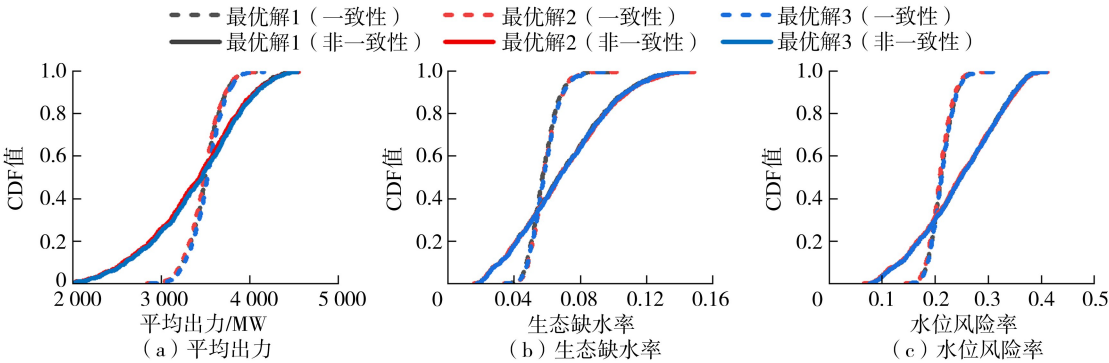


图 4 一致性和非一致性径流条件下的最优解评估结果

Fig. 4 Evaluation results of optimal solutions under stationary and non-stationary runoff

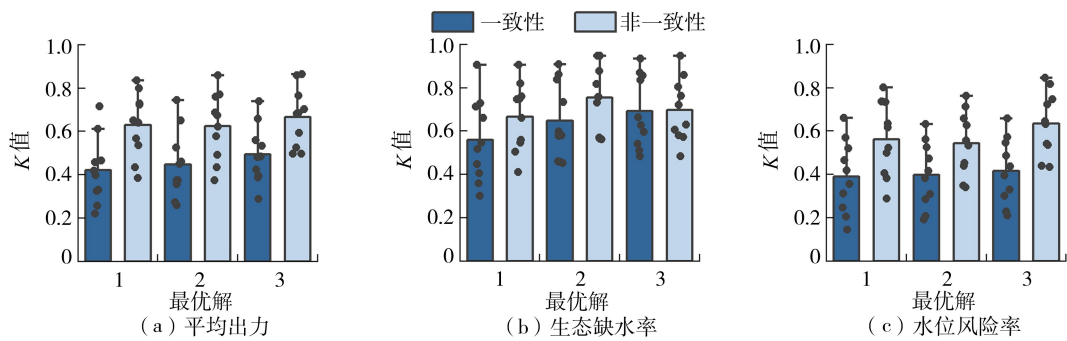


图 5 发电、生态、水位多目标对径流的敏感性响应特征

Fig. 5 Sensitivity response characteristics of multiple objectives of power generation, ecology, and water level to runoff

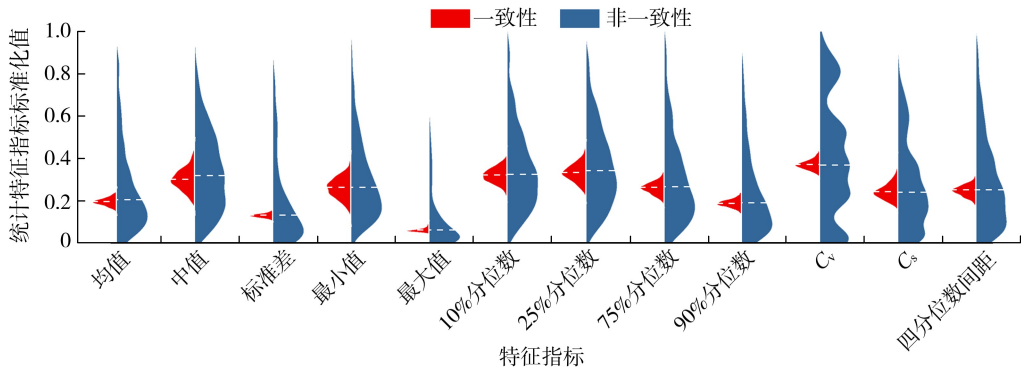


图 6 一致性和非一致性径流下流域平均径流统计特征指标标准化值分布

Fig. 6 Standardized value distribution of statistical characteristic indexes of average runoff under stationary and non-stationary runoff conditions

统计特征指标标准化值分布。结果表明,非一致性径流均值和中值范围显著大于一致性径流,表明非一致性径流分布更加离散,不确定性更强。非一致性径流标准差范围明显大于一致性径流,反映出其波动性显著增加。此外,非一致性径流最小值和最大值范围更大,表明极端径流事件(如极端低流量或极端高流量)发生更加频繁。各分位数(如 10%、25%、75%、90%)在非一致性径流下的范围也普遍大于一致性径流,进一步说明非一致性径流在不同概率分布区间内的变化幅度更大。非一致性径流的变异系数(C_s)范围更宽,反映出径流变化的不均匀性显著增强;非一致性径流的偏态系数(C_u)则出现更显著的偏移,表明非一致性径流的分布偏离对称性,可能表现出更强的正偏态或负偏态特征。四分位数间距的范围增大也进一步验证了非一致性径流的不确定性显著增强。尽管本文在模拟非一致性径流时仅对均值和方差进行了扰动,但是流域平均径流统计特征指标分布显示出较大差异,也反映了径流由一致性向非一致性变化的不均匀性。

为了进一步研究调度目标对非一致性径流的敏感性响应机制,计算了水库群多目标优化调度模型最优解与径流统计特征指标之间的相关性,结果如表 3~5 所示,表中“*”表示显著性水平 $p>0.05$,相

关性不显著。表 3 和表 4 的结果显示,在所有最优解下,梧州站生态缺水和水位风险目标与径流均值、75%分位数、90%分位数和四分位数间距之间的相关性由一致性径流的负相关向非一致性径流的正相关转变。上述径流的统计特征指标基本描述了径流的平均状态,特别是对于一致性径流,生态缺水和水位风险目标与径流均值和 75%分位数之间呈现中等程度的相关性,表明径流均值和 75%分位数越大,生态缺水率和水位风险率越低;而对于非一致性径流,径流均值和 75%分位数越大,生态缺水率和水位风险率越高。在所有最优解下,生态缺水和水位风险目标与径流标准差、最小值、最大值、25%分位数、10%分位数和 C_s 之间的相关性从一致性径流向非一致性径流变化时显著增强,由低—中程度的相关性向中—高程度的相关性转变。生态缺水和水位风险目标与径流最小值和 10%分位数之间的相关性在非一致性径流下进一步增强,即径流量级越小,生态缺水率和水位风险率越高;而生态缺水和水位风险目标与径流标准差和 C_s 由低度正相关增强到中等程度的正相关,即径流分布不均的加剧导致生态缺水率和水位风险率显著增加。上述结果在各最优解间不存在显著差异,因此,不同最优解对生态缺水和水位风险目标与径流统计特征指标之间的相

表 3 梧州站生态缺水率与径流统计特征指标之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between ecological water shortage rate at Wuzhou station and statistical characteristic indexes of runoff

径流 条件	最优解	均值	中值	标准差	最小值	最大值	10%分 位数	25%分 位数	75%分 位数	90%分 位数	C_v	C_s	四分位 数间距
一致性	1	-0.33	-0.52	0.02 *	-0.40	0.06	-0.67	-0.65	-0.34	-0.16	0.56	0.21	-0.23
	2	-0.34	-0.54	0.04 *	-0.42	0.05 *	-0.72	-0.70	-0.35	-0.14	0.59	0.20	-0.23
	3	-0.31	-0.51	0.04 *	-0.39	0.07	-0.66	-0.64	-0.33	-0.14	0.56	0.21	-0.22
非一致性	1	0.12	-0.52	0.30	-0.69	0.33	-0.86	-0.91	0.04 *	0.20	0.49	0.50	0.16
	2	0.16	-0.48	0.34	-0.70	0.37	-0.86	-0.91	0.08	0.24	0.53	0.54	0.20
	3	0.12	-0.51	0.30	-0.69	0.33	-0.86	-0.91	0.04 *	0.20	0.50	0.51	0.16

表 4 梧州站水位风险率与径流统计特征指标之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between water level risk rate at Wuzhou station and statistical characteristic indexes of runoff

径流 条件	最优解	均值	中值	标准差	最小值	最大值	10%分 位数	25%分 位数	75%分 位数	90%分 位数	C_v	C_s	四分位 数间距
一致性	1	-0.39	-0.60	0.00 *	-0.36	0.08	-0.67	-0.71	-0.40	-0.21	0.61	0.27	-0.29
	2	-0.39	-0.62	0.01 *	-0.39	0.09	-0.70	-0.73	-0.41	-0.20	0.64	0.28	-0.29
	3	-0.38	-0.59	0.02 *	-0.36	0.09	-0.66	-0.70	-0.40	-0.20	0.62	0.28	-0.28
非一致性	1	0.37	-0.30	0.53	-0.74	0.55	-0.86	-0.85	0.28	0.44	0.63	0.64	0.39
	2	0.39	-0.28	0.55	-0.74	0.57	-0.85	-0.84	0.30	0.46	0.64	0.65	0.41
	3	0.38	-0.29	0.54	-0.75	0.56	-0.86	-0.85	0.29	0.45	0.64	0.65	0.40

表 5 水库群平均出力与径流统计特征指标之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between average output of reservoir group and statistical characteristic indexes of runoff

径流 条件	最优解	均值	中值	标准差	最小值	最大值	10%分 位数	25%分 位数	75%分 位数	90%分 位数	C_v	C_s	四分位 数间距
一致性	1	0.84	0.73	0.58	0.34	0.07	0.50	0.60	0.85	0.78	-0.32	-0.46	0.82
	2	0.84	0.73	0.58	0.34	0.08 *	0.50	0.60	0.85	0.78	-0.31	-0.45	0.81
	3	0.84	0.73	0.57	0.34	0.07	0.50	0.60	0.85	0.78	-0.32	-0.47	0.82
非一致性	1	0.65	0.86	0.50	-0.11	0.41	0.15	0.43	0.73	0.61	0.46	0.40	0.67
	2	0.63	0.86	0.48	-0.09	0.38	0.18	0.45	0.71	0.59	0.44	0.37	0.65
	3	0.64	0.86	0.49	-0.10	0.39	0.17	0.44	0.72	0.60	0.45	0.38	0.66

关性基本无影响。

表 5 的结果显示,从一致性径流向非一致性径流变化时,水库群平均出力目标与径流中值及最大值之间的相关性增强,与径流最小值之间的相关性由正相关转变为低度负相关,而与 C_v 和 C_s 之间的相关性由负相关转变为正相关。平均出力目标与其他径流统计特征指标之间的相关性在非一致径流下均有所减弱,特别是平均出力目标与径流均值和 25%分位数之间的相关性分别降低了 24% 和 27%。以上结果表明,一致性径流下径流的平均状态(均值和 75%分位数)是决定平均出力的首要因素,而非一致性径流下径流的平均状态对平均出力的影响有所减弱; C_v 和 C_s 与平均出力之间的相关性由一致性径流下的负相关转变为非一致性径流下的正相关,表明非一致性径流丰枯变化更加显著,在一定程度上增大了梯级水库群的平均出力。因此,对西江流域梯级水库群来说,水库群平均出力目标对径流非一致性的敏感性有所增强,对具体的径流统计特

征指标来说,导致敏感性增强的因素存在显著差异。

本文通过分析水库群调度目标与径流统计特征指标之间的相关性,揭示了径流非一致性变化对不同径流特征的影响以及影响调度目标的关键径流特征。在未来研究中,需要进一步对导致敏感性增强的因素进行归因分析,以更好地揭示径流非一致性对水库群调度的影响。

4 结 论

- a. 西江流域水库群平均出力与梧州站生态缺水率呈现出明显的竞争关系,梧州站水位风险率与生态缺水率为协同关系,即梧州站水位风险率和生态缺水率越低,水库群平均出力越小。
- b. 与一致性径流相比,非一致性径流下径流的平均状态对梧州站生态缺水和水位风险的影响逆转,而对水库群平均出力的影响减弱,但径流的丰枯变化却在一定程度上增加了水库群的平均出力。
- c. 在相同径流条件下,不同最优解间水库群调

度目标与径流统计特征指标之间相关性差异不显著,但一致性和非一致性径流对水库群调度目标的影响存在显著差异,未来需深入归因分析以更全面地理解径流非一致性对水库群调度的影响。

参考文献:

[1] 王本德,周惠成,卢迪.我国水库(群)调度理论方法研究应用现状与展望[J].水利学报,2016,47(3):337-345. (WANG Bende,ZHOU Huicheng,LU Di. The state-of-the-art review in the theory research and its application of multi-reservoir system operation in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (3): 337-345. (in Chinese))

[2] 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))

[3] RITTER J, CORZO G, SOLOMATINE D P, et al. Multiobjective direct policy search using physically based operating rules in multireservoir systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2020, 146 (4):05020002.

[4] 张玮,刘攀,刘志武,等.变化环境下水库适应性调度研究进展与展望[J].水利学报,2022,53(9):1017-1027. (ZHANG Wei,LIU Pan,LIU Zhiwu, et al. State-of-the-art review of reservoir adaptation operation in changing environment[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022, 53(9):1017-1027. (in Chinese))

[5] 彭勇.中长期水文预报与水库群优化调度方法及其系统集成研究[D].大连:大连理工大学,2007.

[6] 赵紫薇,杨哲,张全旺,等.考虑预报不确定性的梯级水库群联合优化调度[J].水利水电科技进展,2025,45 (4): 67-75. (ZHAO Ziwei, YANG Zhe, ZHANG Quanwang, et al. Joint optimal operation of cascade reservoirs considering forecast uncertainty[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45 (4):67-75. (in Chinese))

[7] WATSON A A, KASPRZYK J R. Incorporating deeply uncertain factors into the many objective search process [J]. Environmental Modelling & Software,2017,89:159-171.

[8] QUINN J D, REED P M, GIULIANI M, et al. Exploring how changing monsoonal dynamics and human pressures challenge multireservoir management for flood protection, hydropower production, and agricultural water supply[J]. Water Resources Research,2018,54(7):4638-4662.

[9] 汪芸,郭家力,郭生练,等.丹江口水库长期兴利调度的不确定性分析[J].水力发电,2016,42(7):97-102.

(WANG Yun, GUO Jiali, GUO Shenlian, et al. Uncertainty analysis of long-term beneficial operation for Danjiangkou Reservoir[J]. Water Power, 2016, 42 (7): 97-102. (in Chinese))

[10] 彭安帮,王小军,刘九夫,等.考虑调度时段敏感性的水库供水优化调度[J].水力发电学报,2017,36(7):45-54. (PENG Anbang, WANG Xiaojun, LIU Jiufu, et al. Optimal operation of water-supply reservoirs in consideration of sensitiveness on operation periods [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (7): 45-54. (in Chinese))

[11] WANG Hong, LIU Junguo, KLAAR M, et al. Anthropogenic climate change has influenced global river flow seasonality [J]. Science, 2024, 383 (6686): 1009-1014.

[12] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(7):779-790. (in Chinese))

[13] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. On critiques of “stationarity is dead: whither water management?” [J]. Water Resources Research, 2015, 51 (9):7785-7789.

[14] JOHN A, NATHAN R, HORNE A, et al. Nonstationary runoff responses can interact with climate change to increase severe outcomes for freshwater ecology[J]. Water Resources Research,2022,58(2):e2021WR030192.

[15] 黄建雄,冶运涛,曹引,等.黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):25-33. (HUANG Jianxiong, YE Yuntao, CAO Yin, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of Yellow River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (3): 25-33. (in Chinese))

[16] 郭生练,王俊,谢雨祚,等.面向新时期新需求的三峡水库运行方案研究[J].水利学报,2024,55(4):379-388. (GUO Shenglian, WANG Jun, XIE Yuzuo, et al. Three Gorges Reservoir operation scheme facing the new era and new demands [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(4):379-388. (in Chinese))

[17] 冯平,白粟,张婷,等.径流变异对滹沱河流域水库生态调度的影响[J].水资源保护,2023,39(5):99-108. (FENG Ping, BAI Su, ZHANG Ting, et al. Impacts of runoff change on ecological operation of reservoirs in the Hutuo River Basin [J]. Water Resources Protection,2023, 39(5):99-108. (in Chinese))

[18] 周照强,邹华志,史海匀.珠江流域干旱时空变化特征及驱动力分析[J].中国防汛抗旱,2023,33(6):1-11.

(ZHOU Zhaoqiang, ZOU Huazhi, SHI Haiyun. Spatial-temporal characteristics and driving forces of drought in the Pearl River Basin [J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(6): 1-11. (in Chinese))

[19] WU Zhiyong, LU Guihua, LIU Zhiyu, et al. Trends of extreme flood events in the Pearl River Basin during 1951-2010[J]. Advances in Climate Change Research, 2013, 4(2): 110-116.

[20] 刘金贵,李谊纯,仇天宇. 珠江河口咸潮入侵研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(1): 134-140. (LIU Jingui, LI Yichun, ZHANG Tianyu. Review of salinity intrusion in the Pearl River Estuary [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2023, 43(1): 134-140. (in Chinese))

[21] LIU Zhanwei, HE Xiaogang. Balancing-oriented hydropower operation makes the clean energy transition more affordable and simultaneously boosts water security [J]. Nature Water, 2023, 1(9): 778-789.

[22] 王浩,王旭,雷晓辉,等. 梯级水库群联合调度关键技术的发展历程与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 25-37. (WANG Hao, WANG Xu, LEI Xiaohui, et al. The development and prospect of key techniques in the cascade reservoir operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 25-37. (in Chinese))

[23] GIULIANI M, CASTELLETTI A, PIANOSI F, et al. Curses, tradeoffs, and scalable management: advancing evolutionary multiobjective direct policy search to improve water reservoir operations[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2016, 142(2): 04015050.

[24] REED P M, HADKA D, HERMAN J D, et al. Evolutionary multiobjective optimization in water resources: the past, present, and future [J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 438-456.

[25] 周建中,杨佩瑶,覃晖,等. 水库(群)随机优化调度研究进展与展望[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 19-26. (ZHOU Jianzhong, YANG Peiyao, QIN Hui, et al. Research progress and prospect of multi-reservoir system stochastic optimal operation [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(8): 19-26. (in Chinese))

[26] 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.

[27] DANG T D, CHOWDHURY A F M K, GALELLI S. On the representation of water reservoir storage and operations in large-scale hydrological models: implications on model parameterization and climate change impact assessments [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(1): 397-416.

[28] BRUNNER M I, GILLELAND E. Stochastic simulation of streamflow and spatial extremes: a continuous, wavelet-based approach [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(8): 3967-3982.

[29] KIRSCH B R, CHARACKLIS G W, ZEPP H B. Evaluating the impact of alternative hydro-climate scenarios on transfer agreements: practical improvement for generating synthetic streamflows [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2013, 139(4): 396-406.

[30] PIANOSI F, BEVEN K, FREER J, et al. Sensitivity analysis of environmental models: a systematic review with practical workflow [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 79: 214-232.

(收稿日期:2024-11-21 编辑:施业)

(上接第 122 页)

[32] 顾朝军,朱永清,李仁华,等. 鄱阳湖流域降雨侵蚀力变化及其对入湖悬移质输沙量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 45-54. (GU Chaojun, ZHU Yongqing, LI Renhua, et al. Change of the rainfall erosivity in Poyang Lake Basin and its influence on suspended sediment load into the lake[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 45-54 (in Chinese))

[33] 李微,李昌彦,吴敦银,等. 1956~2011 年鄱阳湖水沙特征及其变化规律分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 832-838. (LI Wei, LI Changyan, WU Dunyin, et al. Characteristics of runoff-sediment into and out of the Poyang Lake from 1956 to 2011 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 832-838 (in Chinese))

[34] 谢彪,关兴中,卢静媛,等. 鄱阳湖入出湖水沙通量演变及输沙量归因分析[J]. 水文, 2023, 43(6): 80-85. (XIE Biao, GUAN Xingzhong, LU Jingyuan, et al. Analysis on the evolution of water and sediment fluxes into and out of Poyang Lake and the attribution of sediment transport [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(6): 80-85. (in Chinese))

[35] 齐述华,熊梦雅,廖富强,等. 人类活动对鄱阳湖泥沙收支平衡的影响[J]. 地理科学, 2016, 36(6): 888-894. (QI Shuhua, XIONG Mengya, LIAO Fuqiang, et al. Impacts of human activities on sediments budget in Poyang Lake [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(6): 888-894. (in Chinese))

(收稿日期:2024-12-27 编辑:施业)