

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.05.007

基于来水不确定性的三河口水库调度响应规律分析

马佳宁, 武连洲

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 来水过程不确定性是影响水利工程调度运行稳健性的重要因素。以引汉济渭工程中三河口水库为研究对象, 利用 MCMC 法生成来水不确定性情景, 基于标准供水策略构建考虑生态供水的三河口水库模拟调度模型, 分析三河口水库的调度响应规律。结果表明: 三河口水库调水量变幅主要受来水过程差异影响, 但由于水库多年调节能力, 在来水变动较大等不确定情景下可平稳的调水, 但保证率较低, 平水情景和枯水情景下年供水保证率分别为 80% 和 40%, 尤其是连续枯水序列中工程存在缺水风险。在标准供水策略运行下, 三河口水库无法应对连续枯水序列的影响, 应引入限制供水策略等优化调度方式, 提高调度过程的鲁棒性, 保障水库的运行效益。

关键词: 跨流域调水; 不确定性分析; 三河口水库; 调度响应规律

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0046-07

Analysis of the Scheduling Response Patterns at Sanhekou Reservoir Under Uncertain Inflow Conditions

MA Jianing, WU Lianzhou

(College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The uncertainty of inflow processes is a critical factor affecting the robustness of reservoir scheduling in water conservancy projects. This work focuses on the Sanhekou Reservoir within the Hanjiang to Weihe River Water Diversion Project. By using the MCMC method, inflow uncertainty scenarios were generated. A simulation scheduling model for the Sanhekou Reservoir, which incorporates ecological water supply was developed based on standard water supply policies to analyze the reservoir's scheduling response patterns. The results are as follows. The variation in water transfer volume from the Sanhekou Reservoir is primarily influenced by differences in inflow processes. However, owing to the reservoir's multi-year regulation capacity, it can maintain a stable water transfer process even under uncertain scenarios with significant inflow variations, albeit with a relatively low assurance rate. Under normal and dry hydrological scenarios, the annual water supply reliability rates are 80% and 40%, respectively. The project is particularly susceptible to water shortage risks during prolonged dry sequences. Under the standard water supply policy, the Sanhekou Reservoir cannot adequately address the impacts of consecutive dry sequences. It is essential to introduce optimized scheduling methods, such as restricted water supply policies, to enhance the robustness of the scheduling process and safeguard the operational benefits of the reservoir.

Keywords: inter-basin water transfer; uncertainty analysis; Sanhekou Reservoir; scheduling response patterns

跨流域调水工程主要通过人为调控, 使水资源在流域内及流域间由丰沛地区向匮乏区域转移^[1-2], 通过资源时空再分配缓解水资源供需压力。受水区生活和生产等用户持续、稳定的用水特性影

响, 对跨流域调水工程运行过程提出了更高的要求, 然而受气候变化和人类活动影响, 水循环过程稳态性发生变化, 受来水过程预报精度影响, 来水过程不确定性已成为影响工程调度过程稳健性与运行效益的

收稿日期: 2025-06-08

修稿日期: 2025-07-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2452021083)

作者简介: 马佳宁(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水库调度。E-mail: mjning9404@163.com

通讯作者: 武连洲(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水网运行与水资源配置等方面工作。E-mail: wulianzhou@nwafu.edu.cn

关键因素^[3],因此,亟需开展量化来水不确定性因素的影响研究,为工程开展适应性调度奠定坚实基础。

国内外学者对于来水不确定性下水库调度运行问题开展了广泛的研究。Liu等^[4]兼顾考虑预报前期、丰水期、枯水期预报不确定性差异,利用改进两阶段贝叶斯随机动态规划方法构建了水库发电调度模型,显著提高了发电量。徐茂林^[5]围绕水电站安全运行过程中面临的来水不确定性的影响,提出了基于高斯混合分布的日径流模拟方法,建立了来水不确定影响下考虑机组出力过发、欠发风险的水电站发电优化调度模型,为水电站高效运行提供决策依据。Shu等^[6]将来水区间预测、水库多目标优化调度的双层模型和灌区种植结构优化模型耦合,构建了“集成来水预测-调蓄运行策略-区间双侧调控-供水风险分析”的综合框架,实现了降低径流不确定下水库供水风险目标。综上所述,国内外学者从来水模型、调度模型、风险分析等视角切入,取得了丰富的研究成果和应用效果,但目前的研究多集中于发电调度,对于跨流域调水工程中调水风险量化的研究较少。

引汉济渭工程是陕西省最大的跨流域调水工程,三河口水库作为工程初期运行的主要水源,具有多年调节能力,有助于减轻西安市供水压力^[7]。本文重点探究三河口水库在来水不确定条件下的运行过程,量化来水不利条件对工程的影响程度。研究成果可丰富跨流域调水工程调度理论,同时可为三河口水库后期风险调度提供决策支撑。

1 研究区概况

如图1所示,三河口水库地处秦岭中段汉江以北中低山区的子午河峡谷段,是陕西省最大的跨流域调水工程——引汉济渭工程的重要水源地之一,也是整个工程中具有较大调节能力的核心枢纽^[8]。三河口水库主功能包括:①调节与存蓄子午河流域内径流过程;②在联合调度运行时,与黄金峡水库联合调水;③黄金峡水库单独供水时,若供水量大于关中受水区用水需求,此时利用三河口可逆式机组抽水到三河口水库存蓄,用于后期调度^[9-10]。

根据三河口水库1954—2009年入库径流系列计算可得多年平均径流量8.61亿m³,丰水期7—10月经流量占年径流量的67.4%,水库年径流量及多年平均月径流量变化情况由图2所示。三河口水库年际径流周期性变化明显,有显著的丰枯变化趋势;年内径流季节性变化明显,汛期主要集中在7—10月。

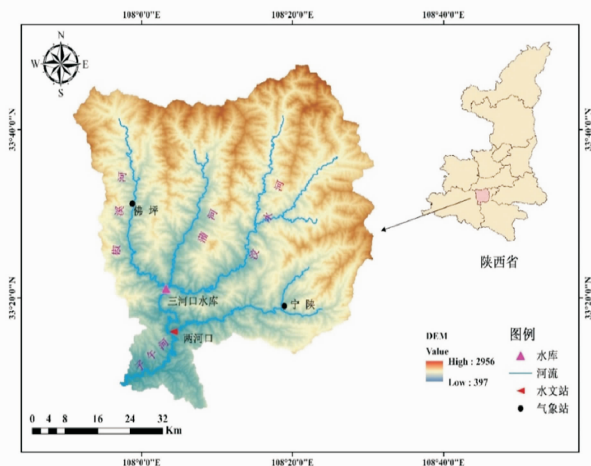
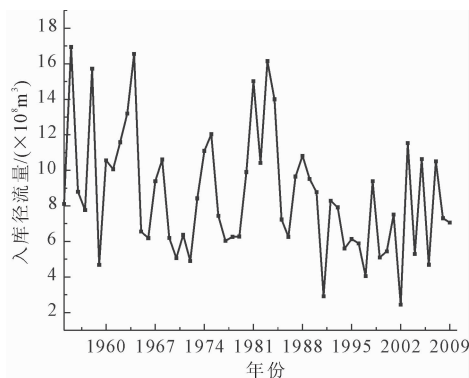
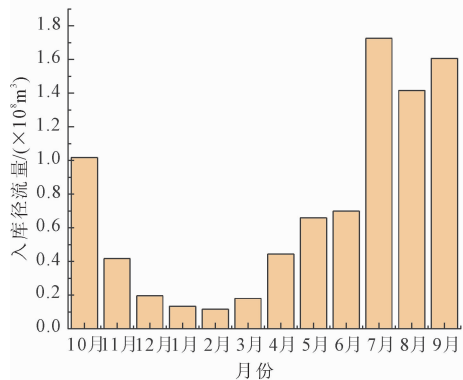


图1 三河口水库位置概况图



(a) 三河口年径流变化情况



(b) 三河口多年平均月径流

图2 三河口水库径流变化情况

2 研究方法

2.1 来水不确定性情景生成方法

2.1.1 最优边缘分布函数拟合

考虑区域气象、地理条件等自然条件差异,以及降水、径流等水文要素在年内、年际间所呈现的明显周期性规律,选择同一种分布来拟合及描述水文事件往往会降低其客观性^[9]。因此,为反映三河口水库来水过程最优分布^[10],本文选用伽马分布(Gam-

ma)、广义极值分布 (GEV) 和对数正态分布 (LOGN) 边缘分布函数, 三种分布函数拟合效果较好, 在水文统计中广泛使用。

基于三种已选择的边缘分布函数, 本文采用 KS 检验、RMSE 和 AIC 准则确定来水序列最优边缘分布函数拟合^[11], 共分三步执行: ①运用 KS 检验方法评估候选边缘函数的适用性; ②基于 RMSE 指标对边缘分布的拟合优度进行量化分析; ③通过 AIC 准则筛选最优的边缘分布函数。

2.1.2 马尔可夫-蒙特卡罗方法

马尔可夫-蒙特卡罗 (MCMC) 方法因高效的抽样机制使其成为解决多种模型参数不确定性问题的通用工具^[12]。MCMC 采用双阶段过程来推导参数的后验分布: 先验分布的设定阶段和马尔可夫链的构造阶段。前者依据领域先验知识确定参数初始分布, 后者通过特定的抽样算法实现马尔可夫链的构建与迭代优化^[13-14]。马尔可夫链能产生服从目标分布的样本系列, 并将其用于蒙特卡罗积分^[15]。

本文执行蒙特卡罗方法生成来水序列主要分为三步: ①初选使用的概率分布线型, 获取历史观测数据概率分布的随机取样; ②输入所有参数取样值的组合并运行模型; ③利用拉丁超立方抽样 (LHS), 对蒙特卡罗模拟输出侧进行抽样和统计学分析, 基本流程如图 3 所示。

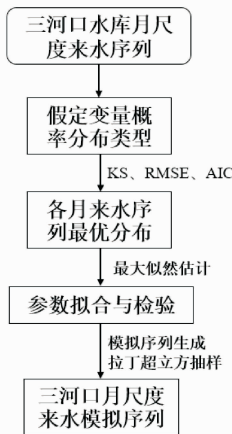


图 3 蒙特卡罗模拟流程图

马尔可夫过程, 也称无后效性随机过程, 满足平移不变性假设^[16]。通过假设当前观测值的条件概率分布只与最近一次观测有关, 而独立于其他之前所有的观测, 则可以得到实测条件下一阶马尔可夫链。将一阶马尔可夫链扩展, 引入隐含状态变量 $z_i \in \{1, \dots, M\}$, z_i 服从一阶马尔可夫过程, 其处于 z_i 的概率仅由其前一状态 z_{i-1} 所决定。 z_i 由某一状态转变

为另一状态的概率称为状态转移概率, 全部状态转移概率的组合可以通过状态转移矩阵 A 来表示。

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $A_{ij} = q(z_i = j | z_{i-1} = i)$ 表示状态变量由 i 转为 j 的概率。且 A 满足 $0 \leq A_{ij} \leq 1$ 及 $\sum_j A_{ij} = 1$ 。

2.1.3 来水量转移概率计算

由于水文变量在时空尺度上表现出较强依赖性, 区别于传统径流随机假设, 隐含马尔可夫模型中径流序列 X_{t_n} 取决于当前的状态变量 z_t 且仅与 z_t 相关, 称为独立输出假设^[17]。根据径流的分布特性, 其“丰枯遭遇”状态服从马尔可夫随机过程, 径流序列受“丰枯遭遇”状态影响, 从而构成了径流的隐含马尔可夫模型, 而径流的隐含状态变量可分为丰水、平水及枯水来表示。

本研究在计算来水过程转移概率时, 融合边缘分布函数与二元 Copula 联合分布函数, 采用边缘分布与相关结构分离处理的策略, 在保持边缘分布选择自由度的同时, 可准确表征变量间的复杂非线性关联特征, 具有较高的模型适应能力和应用弹性^[18]。二元 Coupla 函数的基本形式为:

设 x, y 为连续随机变量, 那么存在唯一的函数满足:

$$F(x, y) = C_\theta(F_X(x), F_Y(y)) \quad \forall x, y \quad (2)$$

式中: $C_\theta(u, v)$ 为 Copula 函数, θ 为 Copula 待定的参数。

Copula 函数共分为 3 类: 椭圆型、二次型和 Archimedean 型, 水文领域常用 Archimedean 型 Copula。因此, 本文首先利用 Kendall 秩相关系数初步计算三河口水库来水过程相关参数, 随后利用离差平方和准则法 (OLS) 以及 AIC 信息准则来评价拟合优度, 从而确定最优 Copula 函数。

2.1.4 误差概率分布法

在水库运行过程中, 不确定性因子模拟过程中产生的误差即为风险源。预测不确定性定义为实测值与模拟值之间的误差^[19]。误差概率分布法通过假定各因子误差的分布从而生成概率性预报^[20], 可得到具有模拟误差情景下的预测序列, 表示为:

$$q_i = x_i + \varepsilon_i = f(X_i) + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中: q_i 为不确定性因子的输出值; x_i 和 $f(X_i)$ 为不确定性因子的预测值及预测函数; ε_i 表示所对应的误差。

在以满足受水区用水需求为主要目标的调水工程中, 来水过程为主要的 uncertainty 因子。

2.2 来水不确定下三河口模拟调度模型构建

2.2.1 考虑生态供水的模拟调度模型构建

标准供水策略(Standard Operating Procedures, SOP)是水库所能提供的尽可能多的水量以满足当前时刻用户用水需求,是缺水量最小的调度方式^[21]。利用水量平衡原理,构建基于 SOP 策略的模拟调度模型,考虑各月水库的入库径流量及受水区的需水量^[22],计算水库理论可调水量,综合工程规划批复可调水量计算实际可调水量,在实际可调水量允许范围内最大程度向受水区调水,当调水后仍有余水时,则将余水存蓄,以供后续时刻使用。

本文结合三河口水库实际情况,设置模型边界条件:①工程外调水多年平均需水量为 5 亿 m³,各月需水过程均匀分配;②除考虑外调水需求外,模型考虑生态因素,设置生态供水模块,保障各时段供水均大于生态基流(2.71 m³/s);③拟定死水位(558 m)为起调水位,按月尺度进行模拟调度;④在输出侧获得工程各时段出库流量、调水量、生态供水量和发电量。

2.2.2 约束条件

本文所构建的模拟调度模型考虑以下约束条件:

①水库水量平衡约束条件

$$\begin{cases} V_{i+1,j,s} = V_{i,j,s} + I_{i,j,s} - Q_{i,j,s} \\ V_{1,j+1,s} = V_{N+1,j,s} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $V_{i,j,s}$ 和 $V_{i+1,j,s}$ 为第 s 情景下在第 j 年中第 i 时段的始、末库容; $I_{i,j,s}$ 和 $Q_{i,j,s}$ 分别为第 s 情景下在第 j 年中第 i 时段的水库入流和出流; $V_{1,j+1,s}$ 为第 s 情景下在第 $j+1$ 年的初始库容; $V_{N+1,j,s}$ 为第 s 情景下在第 j 年的末库容, N 为时段总数。

② 水库库容量约束条件

$$VL_i \leq V_{i,j,s} \leq VU_i \quad (\forall i,j,s) \quad (5)$$

式中: VU_i 和 VL_i 分别为水库库容的上、下限。

③ 生态基流约束条件

$$q_s(t,j) \geq 2.71 \quad (6)$$

式中: $q_s(t,j)$ 为除外调水以外留在子午河河道的流量。

④ 发电机组流量约束条件

$$q_p(t,j) \leq Q_p^{\max} \quad (7)$$

式中: $q_p(t,j)$ 和 Q_p^{\max} 分别为总发电流量和机组过流量最大值。

⑤ 非负约束条件

上述所有变量均大于等于 0。

3 结果与分析

3.1 三河口水库来水不确定性情景生成

3.1.1 历史来水序列边缘分布函数参数拟合

利用 KS 检验、RMSE 和 AIC 准则确定三河口水库 1954 年 7 月至 2010 年 6 月来水过程中各月来水序列分布判定结果,三种分布线型进行参数估计结果见表 1。

表 1 三河口水库月尺度来水过程概率密度函数分布类型判定结果

判定依据	7 月			8 月			9 月		
	Gamma	GEV	LOGN	Gamma	GEV	LOGN	Gamma	GEV	LOGN
KS	0.110	0.122	0.112	0.095	0.072	0.057	0.119	0.080	0.071
RMSE	0.045	0.045	0.040	0.034	0.029	0.023	0.054	0.032	0.029
AIC	164.07	171.21	166.06	148.08	150.97	146.38	164.96	163.90	159.65
判定依据	10 月			11 月			12 月		
	Gamma	GEV	LOGN	Gamma	GEV	LOGN	Gamma	GEV	LOGN
KS	0.076	0.048	0.059	0.098	0.050	0.059	0.099	0.103	0.097
RMSE	0.032	0.019	0.023	0.042	0.020	0.024	0.035	0.040	0.031
AIC	110.91	113.82	109.98	-4.40	-6.16	-7.95	-133.68	-131.36	-132.22
判定依据	1 月			2 月			3 月		
	Gamma	GEV	LOGN	Gamma	GEV	LOGN	Gamma	GEV	LOGN
KS	0.083	0.061	0.108	0.091	0.089	0.112	0.173	0.071	0.139
RMSE	0.030	0.026	0.040	0.032	0.032	0.040	0.068	0.026	0.048
AIC	-188.11	-188.66	-182.84	-209.03	-206.94	-207.32	-111.35	-123.44	-119.58
判定依据	4 月			5 月			6 月		
	Gamma	GEV	LOGN	Gamma	GEV	LOGN	Gamma	GEV	LOGN
KS	0.106	0.075	0.086	0.103	0.080	0.064	0.134	0.105	0.095
RMSE	0.051	0.032	0.031	0.041	0.034	0.027	0.059	0.037	0.034
AIC	3.90	-4.30	-4.04	61.25	61.71	58.77	75.80	66.89	64.20

注:黑色标记数字为最优分布优选评价参数。

经核验,三河口水库各月来水量变化呈现出特定概率分布规律,针对三种初选分布类型的假设检验结果均达到 0.05 的显著性水平,原假设成立。由表 1 可知各月来水量在三种预设概率分布中均呈现良好拟合,其中,7 月、12 月及次年 2 月的最优分布为 Gamma 型;次年 1 月、3 月和 4 月的数据更符合 GEV 分布特征;而 8—11 月以及次年 5—6 月的径流量则以 LOGN 分布拟合效果最佳。水库各月来水过程所选定最优概率分布函数所对应的概率密度参数拟合结果如表 2 所示。

表 2 三河口水库各月来水量边缘分布函数参数值

月份	分布类型	ξ	Γ	μ	a	b
7 月	Gamma				2.0055	0.8604
8 月	LOGN		0.8627	0.0096		
9 月	LOGN		0.8974	0.0882		
10 月	LOGN		0.866	-0.3205		
11 月	LOGN		0.6416	-1.0766		
12 月	Gamma				7.0211	0.0281
1 月	GEV	-0.2035	0.0409	0.1169		
2 月	Gamma				9.8976	0.0117
3 月	GEV	0.4412	0.0500	0.1226		
4 月	GEV	0.4700	0.1454	0.2713		
5 月	LOGN		0.8312	-0.7399		
6 月	LOGN		1.0425	-0.9132		

3.1.2 来水不确定性情景生成

选取 Gumbel Copula 与 Clayton Copula 函数作为联接函数,函数拟合精度计算结果显示,三河口水库入库年径流最优拟合于 Calyton Copula。将三河口来水过程的丰枯遭遇分为 9 种情况。计算三河口水库天然来水量相邻月份间的转移概率矩阵,三河口调度期一般为 7 月到次年 6 月,各月来水量的极值均通过所用历史径流数据确定,离散份数为 10 等份,概率转移矩阵计算结果如表 3 所示。

表 3 概率转移矩阵计算结果

时间跨度	类型	枯	平	丰
$T=1$	枯	0.036	0.109	0.073
	平	0.127	0.218	0.145
	丰	0.055	0.164	0.073

三河口水库来水序列在时间上具有高度依赖性,年内与年际间有明显的丰枯变化趋势,且年际“丰枯遭遇”规律较为突出。马尔可夫蒙特卡罗法 (MCMC) 能够描述实测结果内部预先存在的规律,以及将生成的变化情景提取似然函数^[23],从而将数

据集转化为具有预测性的合理样本集。

综上,本研究基于误差概率分布法生成来水不确定性情景,其中控制误差模拟值上下限为 $\pm 5\%$,对三河口各月均生成 1 000 组离散径流预测序列,利用拉丁超立方抽样获得 1 000 组离散的年径流序列,依据状态转移矩阵 A ,将离散情景进行组合,得到 20 组 15 年径流模拟情景,来水过程模拟结果如图 4 和图 5 所示。

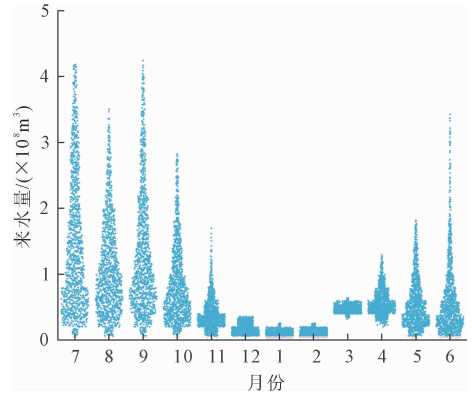


图 4 三河口各月来水过程模拟结果

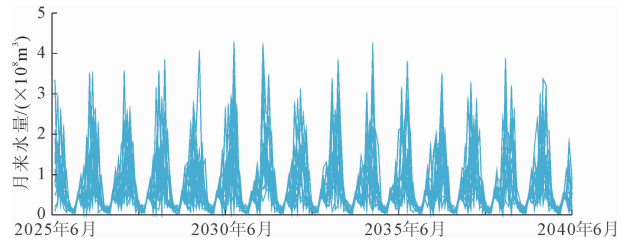


图 5 三河口来水量长系列模拟结果

由图 4 和图 5 可知,三河口月尺度来水及长系列模拟结果均有显著丰枯变化趋势,与实测样本序列一致性高,同时包含连续枯水和丰水情景,能较好反映现实条件下极端事件,长系列模拟结果中多年平均来水量约 7.4 亿 m^3 ,枯水情景和丰水情景序列年来水量分别为 4.07 亿 m^3 和 8.45 亿 m^3 ,情景序列多样性程度可满足调度模型计算样本要求。

以调水为主要运行目标的跨流域调水系统中,枯水或平水序列通常会对调水结果产生潜在影响。因此,在生成的 1 000 组离散来水序列情景中,通过调整枯水年组间的转移概率,兼顾来水过程丰枯与过程波动,生成枯水情景和平水情景作为模拟调度模型的输入,以评估模型应对来水不确定性的响应规律,工程不利调水情景序列变化过程如图 6 所示。

3.2 来水不确定下三河口供水响应规律

以来水不确定性情景下枯水及平水典型序列作为输入,驱动三河口水库模拟调度模型,重点从调水

量、生态供水量、发电量等角度分析不确定性情景对于水库调度过程的影响规律。

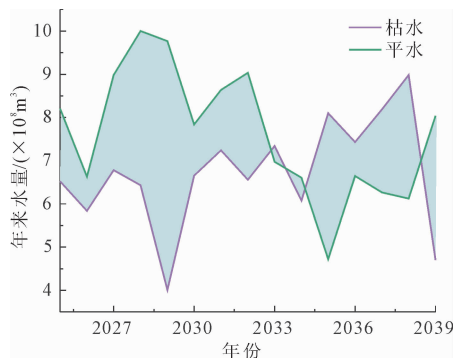


图 6 工程运行不利情景选取

3.2.1 调水量

三河口水库作为引汉济渭跨流域调水工程重要的调水区水库之一,具有多年调节功能,对维持受水区稳定的供需关系有重要的意义。因此,外调水量是评价三河口水库工程调度能力的重要指标之一。来水不确定性情景下三河口在模拟 15 年间枯水序列及平水序列的调水量和缺水量结果分布如图 7 所示。

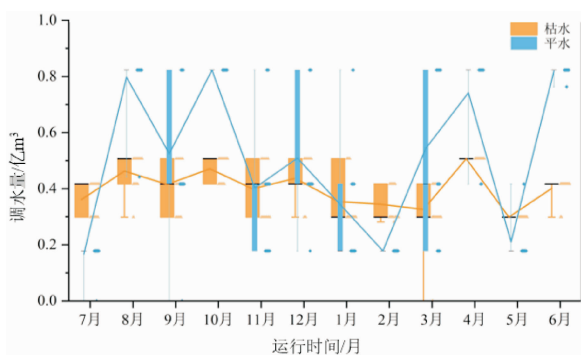


图 7 三河口月调水量箱线图

由图 7 可知:①三河口水库各月调水量较平稳,其中,枯水序列下多按照需求调水,多年平均调水量 4.78 亿 m^3 ,存在缺水现象,但获益于多年调节库容影响,调水过程的波动幅度较小,但枯水情景下年供水保证率仅为 40%,保证率较低;②在平水序列下,由于水库在汛期和非汛期期间所模拟来水量波动较为明显,故调度运行后各月调水量分布较大,与来水量同频变化,年供水保证率约为 80%,调水过程基本可满足受水区需水过程;③根据中值连接线可以看出,在汛期和非汛期转换的月份,三河口调水量的变动最为显著,此时来水对工程调水能力的影响最大,且汛期三河口水库调水量变化特征较非汛期较为显著。

3.2.2 生态供水量

在三河口水库调水过程中需保留一定的生态基流用水,以维持河道正常的生态需求,因此,在生态基流的约束下,不同来水情景的水库生态供水量如图 8 所示。

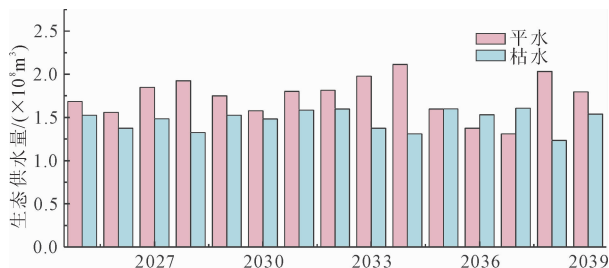


图 8 三河口年生态供水量计算结果

由图 8 可知:①在两种调水情景下,三河口水库生态供水量较为稳定,波动不明显,枯水情景下生态供水量明显低于平水情景;②平水情景和枯水情景中三河口水库多年平均生态供水量分别为 1.74 亿 m^3 和 1.47 亿 m^3 ,生态基流供水保证率均超过 90%,均能满足下游河道生态需求;③对照调水量变化过程,在优先保证生态基流的条件下,连续枯水序列会导致部分时段调水量和外调水保证率降低,因此,后续运行中应进一步重点关注连续枯水时水库运行中河道生态与外调水的权衡关系。

3.2.3 发电量

除调水、保证生态等功能外,三河口水库能在维持一定水位的时段,利用其调节库容,在满足外调水和基本下泄流量的基础上,创造发电等经济效益,故本文选择发电量指标进一步评价三河口调度运行结果。两种来水不确定条件下水库年发电量如图 9 所示。

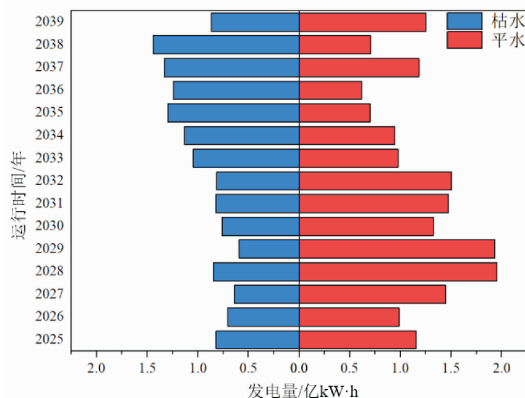


图 9 三河口年发电量计算结果

由图 9 可知:①三河口水库枯水情景下发电量明显低于平水情景,与两情景下来水过程变化对应,

来水不足时,水库没有足够的下泄水量与发电水头,导致发电量降低;②平水情景和枯水情景下多年平均发电量分别为 1.21 亿 kW·h 和 0.96 亿 kW·h。

4 结 论

本文基于来水不确定性情景下模拟调度模型,根据工程实际情况择定来水量为不确定性因子,利用 MCMC 构建不确定性情景,基于标准供水策略构建考虑生态供水的三河口水库模拟调度模型,分析来水不确定性工程运行相应规律,主要结论如下:

(1) 平水情景下多年平均调水量 7.06 亿 m³,多年平均生态供水量 1.53 亿 m³,多年平均发电量 1.21 亿 kW·h,其中,多年平均调水量高于年需水量,能满足实际用水需求。枯水情景下多年平均调水量 4.78 亿 m³,多年平均生态供水量 1.89 亿 m³,多年平均发电量 0.96 亿 kW·h,其中,多年平均调水量低于年需水量,易发生供水破坏。

(2) 三河口水库调水量变幅主要由来水过程差异性所引起,三河口的多年调蓄能力,在来水变动较大以及不确定性因素较高的情景下仍能保持较为平稳的调水过程,但保证率较低,平水情景和枯水情景下年供水保证率分别为 80% 和 40%,尤其是连续枯水序列中工程会面对较大的缺水风险。

(3) 按照标准供水策略运行情况下,三河口水库无法应对连续枯水序列的影响,应引入限制供水策略等优化调度方式,提高受水区调水过程鲁棒性,保障水库的调水安全。

参考文献:

- [1] Duan Kai, Caldwell Peter, Sun Ge, et al. Climate change challenges efficiency of inter-basin water transfers in alleviating water stress[J]. *Environmental Research Letters*. 2022,17(4):044050.
- [2] Zhong Huayu, Liao Tao, Fang Guohua, et al. Deriving water allocation schemes for interbasin water transfer projects using a novel multiobjective cuckoo search algorithm[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2024,150(6):04024016.
- [3] Nikoo Mohammad Reza, Karimi Akbar, Kerachian Reza. Optimal long-term operation of reservoir-river systems under hydrologic uncertainties: Application of interval programming[J]. *Water Resources Management*. 2013,27(11):3865-3883.
- [4] Liu Hongrui, Sun Yuanyuan, Yin Xinan, et al. A reservoir operation method that accounts for different inflow forecast uncertainties in different hydrological periods[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,256:120471.
- [5] 徐茂林. 考虑来水不确定性的水电站发电优化调度研究[D]. 长沙:华中科技大学,2021.
- [6] Shu Zhan, Kang Yan, Gao Ying, et al. An interval bilateral regulation framework of water resources supply and demand in irrigation area under water sources uncertainty[J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 307: 109266.
- [7] 任 康. 基于风险传递的水库群多目标调度敏感性与稳健性研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.
- [8] 王思汗. 三河口水库蓄水初期水质变化特征及其影响要素[D]. 西安:西安建筑科技大学,2023.
- [9] 赵紫谷. 径流不确定性下黄河上游梯级水库联合调度研究[D]. 西安:西安理工大学,2024.
- [10] Katz R W, Parlange M B, Naveau P. Statistics of extremes in hydrology[J]. *Advances in Water Resources*, 2002,25(8-12):1287-1304.
- [11] 武连洲. 引汉济渭跨流域调水工程多目标风险调度研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [12] 刘 松. 基于近似贝叶斯计算的水文模型不确定性估计方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2023.
- [13] Zhang Li, Zhang Xinyan, Leach Justin M, et al. Bayesian compositional generalized linear mixed models for disease prediction using microbiome data[J]. *Bmc Bioinformatics*, 2025,26(1):98.
- [14] Casarin Roberto, Craiu Radu V, Wang Qing. Markov switching multiple-equation tensor regressions[J]. *Journal of Multivariate Analysis*, 2025,208:105427.
- [15] 林桂元. 计算机断层成像中的拟蒙特卡罗方法[D]. 北京:清华大学,2022.
- [16] Cho Minjae, Sun Xin. Bootstrap, Markov Chain Monte Carlo, and LP/SDP hierarchy for the lattice Ising model[J]. *Journal of High Energy Physics*, 2023(11):1-26.
- [17] Chai Fuxin, Peng Feng, Zhang Hongping, et al. Stable improved dynamic programming method: an efficient and accurate method for optimization of reservoir flood control operation[J]. *Water Resources Management*, 2023,37(14):5635-5654.
- [18] 武连洲. 引汉济渭工程调水区并联水库多目标调度研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [19] Huang Xin, Xu Bin, Zhong Pingan, et al. Robust multiobjective reservoir operation and risk decision-making model for real-time flood control coping with forecast uncertainty[J]. *Journal of Hydrology*, 2022,605:127334.
- [20] Xu Bin, Sun Yu, Huang Xin, et al. Scenario-based multiobjective robust optimization and decision-making framework for optimal operation of a cascade hydropower system under multiple uncertainties[J]. *Water Resources Research*, 2022,58(4):1-28.

结构失稳或坍塌。

致谢: 本文的试验得到了福州大学结构实验室和相关教授们的支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 潘毅,任宇,李路,等. 积石山6.2级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. 建筑结构学报,2024,45(S2): 71-84.
- [2] 魏智辉,潘毅,邱洪兴,等. 勾缝加固砖砌体墙的抗压性能试验[J]. 哈尔滨工业大学报,2017,49(12): 184-188.
- [3] 陈伟宏,罗劲,韩春晖,等. ECC面层加固URM墙抗剪性能研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2025,55(5):1426-1434.
- [4] 刘新强,刘明,由世岐. FRP加固实心黏土砖短柱轴心受压试验研究[J]. 土木工程学报,2009,42(10):1-7.
- [5] 邓明科,李彤,范丽玮. 钢筋网高延性混凝土加固砖柱偏心受压性能试验及计算方法研究[J]. 工程力学,2021,38(5):61-71.
- [6] Ranade R, Stults M D, Li V C, et al. Development of high strength high ductility concrete [C]//2nd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites. Rio de Janeiro, Brazil, 2022:1-8.
- [7] 翁志英,胡海楠,耿丽,等. 考虑材料组分影响因素的HP-FRCC流动性能及力学性能[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(5):125-133.
- [8] 吴应雄,郑新颜,黄伟,等. 超高性能混凝土-既有普通混凝土界面粘结性能研究综述[J]. 材料导报,2023,37(16):144-154.
- [9] 方霄鹏,陈善权,金捷,等. 两层双开间既有石砌体结构振动台试验[J]. 南昌大学学报(工科版),2024,46(4):420-428.
- [10] Billington S, Kyriakides M. Cyclic response of nonductile reinforced concrete frames with unreinforced masonry infills retrofitted with engineered cementitious composites [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2014, 140(2):441-454.
- [11] 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T 50129—2011[S]. 北京:建筑工业出版社,2011.
- [12] 砌体结构工程施工质量验收规范:GB 50203—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [13] 张德和,商吴江,吴应雄,等. UHP-ECC加固180mm厚砖砌体墙抗震性能试验研究及应用[J]. 工程抗震与加固改造,2025,47(2):166-174.
- [14] 胡海楠. UHP-ECC加固既有砖砌体柱受压性能试验研究[D]. 福州:福州大学,2024.
- [15] 砌墙砖试验方法:GB/T2542—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [16] 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [17] Huang W, Kazemi-Kamyab H, Sun W. Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. Cement & Concrete Composites, 2017,77:86-101.
- [18] 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法:JC/T 2461—2018[S]. 北京:中国建材工业出版社,2018.
- [19] Deng Mingke, Han Jiao, Liu Haibo, et al. Analysis of compressive toughness and deformability of high ductile fiber reinforced concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015,2015:1-7.

(上接第52页)

- [21] Alimohammadi Hassan, Bavani Ali Reza Massah, Rozbahani Abbas. Mitigating the impacts of climate change on the performance of multi-purpose reservoirs by changing the operation policy from SOP to MLDR [J]. Water Resources Management, 2020, 34(4): 1495-1516.
- [22] Ngamsert Ratsuda, Kangrang Anongrit. Applying of marine predators algorithm linked with reservoir simulation model considering sedimentation for reservoir operation [J]. Advances in Civil Engineering, 2022,2022:1-15.
- [23] Zolghadr-Asli Babak, Bozorg-Haddad Omid, Enayati Maedeh, et al. Sensitivity of non-conditional climatic variables to climate-change deep uncertainty using Markov Chain Monte Carlo simulation [J]. Scientific Reports. 2022,12(1):1813.