

基于 GAMS 的水库群调度及风险补偿研究

李继清¹, 黄可¹, 陈思雨^{1,2}, 吴亮¹, 周志鹏¹

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206; 2. 江河水利开发中心有限责任公司, 北京 100161)

摘要: 为平衡流域水库群成员的风险与收益, 调动水库参与联合调度的积极性, 保障水库群稳定运行, 基于 GAMS 软件建立了水库群发电优化调度模型, 进而确定补偿效益。采用熵权法基于水库特征参数确定水库重要程度, 结合聚合降维思路改进了合作博弈理论的 Shapley 值法, 建立了风险指标体系评价水库兴利调度风险, 提出了基于调度风险修正效益分摊方案的水库群风险补偿方法, 进而实现不同运行调度方案、不同发电破坏情形下水库群风险效益平衡。长江上游 6 条干支流上 12 座控制性水库实例应用结果表明, 该风险补偿方法不仅考虑了水库个体特征和调度效益贡献, 还兼顾了水库调度风险, 可实现水库群补偿效益的合理化分摊。

关键词: 水库群调度; GAMS 软件; 补偿效益分摊; 风险补偿; 发电破坏

中图分类号: TV697 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)06-0010-10

Research on reservoir group scheduling and risk compensation based on GAMS//LI Jiqing¹, HUANG Ke¹, CHEN Siyu^{1,2}, WU Liang¹, ZHOU Zhipeng¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Rivers Water Resources Development Center Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: To balance the risk and benefit among reservoirs within a basin, enhance the enthusiasm of individual reservoir to participate in joint reservoir group scheduling, and maintain the stability of the reservoir group's operation, a reservoir group power generation optimization scheduling model was established based on GAMS software. The compensation benefits for each reservoir were determined. The entropy weight method was employed to calculate the importance of each reservoir based on characteristic parameter values of reservoirs. Aggregation dimensionality reduction thought was used to improve the Shapley value method in cooperative game theory, and the risk index system was established to evaluate the beneficial scheduling risks of reservoirs. A risk compensation method for reservoir groups based on scheduling risk correction benefit allocation scheme has been proposed, thereby achieving a balance of risk and benefit for reservoir groups under different operation scheduling schemes and power generation disruption situations. Taking 12 control reservoirs on 6 main and tributary rivers of the upper reaches of the Yangtze River as an example, the results show that this risk compensation method not only considers the individual characteristics of the reservoirs and the contribution of scheduling benefits, but also takes into account the scheduling risks of the reservoirs, achieving a rational allocation of compensation benefits for the reservoir group.

Key words: reservoir group scheduling; GAMS software; compensation benefit allocation; risk compensation; power generation disruption

水电能源是我国第二大能源主体, 在我国节能减排、能源革命中占据主力地位^[1]。水库的建设、运行或状态的变化会使相关对象在同样投资条件下获得利益发生变化^[2], 该部分利益称为水库补偿效益。随着水库大规模兴建投产, 流域水库群的联合调度趋于复杂, 联合调度过程中各水库间由于调蓄作用不同会产生补偿效益, 部分成员水库参与联合

调度的收益与其效益贡献以及风险承担水平不相匹配, 不利于水库群的稳定运行。亟须科学完备的理论体系和分配方法平衡流域水库群成员的风险与收益, 调动水库参与联合调度的积极性, 从而促进流域综合效益最大化。目前, 水库群补偿效益分摊方法主要包括单指标法、综合指标法、Shapley 值法等^[3]。其中, 单指标法仅考虑水库某一方面性能, 具有片面

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3002702); 国家自然科学基金项目(52179014)

作者简介: 李继清(1972—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文学水资源研究。E-mail: jqli6688@163.com

通信作者: 黄可(2000—), 女, 博士研究生, 主要从事水资源风险分析研究。E-mail: huangke_811@163.com

性,采用不同指标的分摊结果差异也较大^[4];综合指标法通过赋权同时考虑多种重要指标,在一定程度上弥补了单指标法的缺陷,但仍存在主观性较强、指标重要性有偏差等不足^[5];Shapley 值法能够合理地分配水库群调度效益,但由于水库群规模扩大、调度计算较为复杂,效益分配计算量随之增大,导致结果存在偏差。以上补偿效益分摊方法在实际应用中均存在不足,许多学者结合其优点对水库群补偿效益分摊方法进行了改进。例如,曹云慧等^[6-7]引入熵权法改进了 Shapley 值法;李英海等^[8]将变异系数与 Shapley 值法结合;何勇等^[9]为提高 Shapley 值法计算效率提出了水电站聚合降维思路。同时,不同规模和功能的水库参与联合调度面临的风险水平不同,依据调度风险大小进行风险补偿,从而实现高风险水库高收益的方法也具有重要的意义。例如,刘激等^[10-11]建立了梯级系统施工导流风险补偿模型;李建昌等^[12-13]构建了梯级水库风险补偿的框架。但针对大规模、多维度水库群在不同运行调度方案 and 不同发电破坏情形下的风险补偿方面还有待探索。

鉴于此,本文基于 GAMS 软件建立水库群发电优化调度模型,量化水库群联合调度补偿效益。在此基础上,根据水库群的运行关系和地理位置采用聚合降维思路将其划分为若干个梯级子联盟,基于水库特征参数采用熵权法确定水库重要程度,建立

风险评价指标体系评价成员水库调度风险,提出基于改进 Shapley 值法的水库群联合调度风险补偿方法。分别分析不同运行调度方案和不同发电破坏情形下梯级子联盟间和成员水库间的风险效益补偿关系,提出风险补偿方案,以调动水库群参与联合调度的积极性,为水库群优化调度提供决策依据。研究框架如图 1 所示。

1 研究方法

1.1 模型构建

1.1.1 水库群发电优化调度模型

以水库群发电量最大为目标,充分发挥水库群联合调度效用,综合各水库参数及约束条件,建立水库群联合调度发电优化混合整数非线性规划模型。目标函数为

$$\max E = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T N_{i,t} \Delta t \quad (1)$$

式中: E 为水库群总发电量; n 为水库数量; T 为计算时段数; $N_{i,t}$ 为 t 时段水库 i 的出力; Δt 为调度时段长度。

约束条件包括水量平衡约束、水位约束、出力约束、下泄流量约束,表达式见式(2)~(5),并且模型中所有的变量均满足非负条件。模型的水流联系方程见式(6)。

$$V_{i,t+1} - V_{i,t} = (Q_{i,t} - q_{i,t}) \Delta t \quad (2)$$

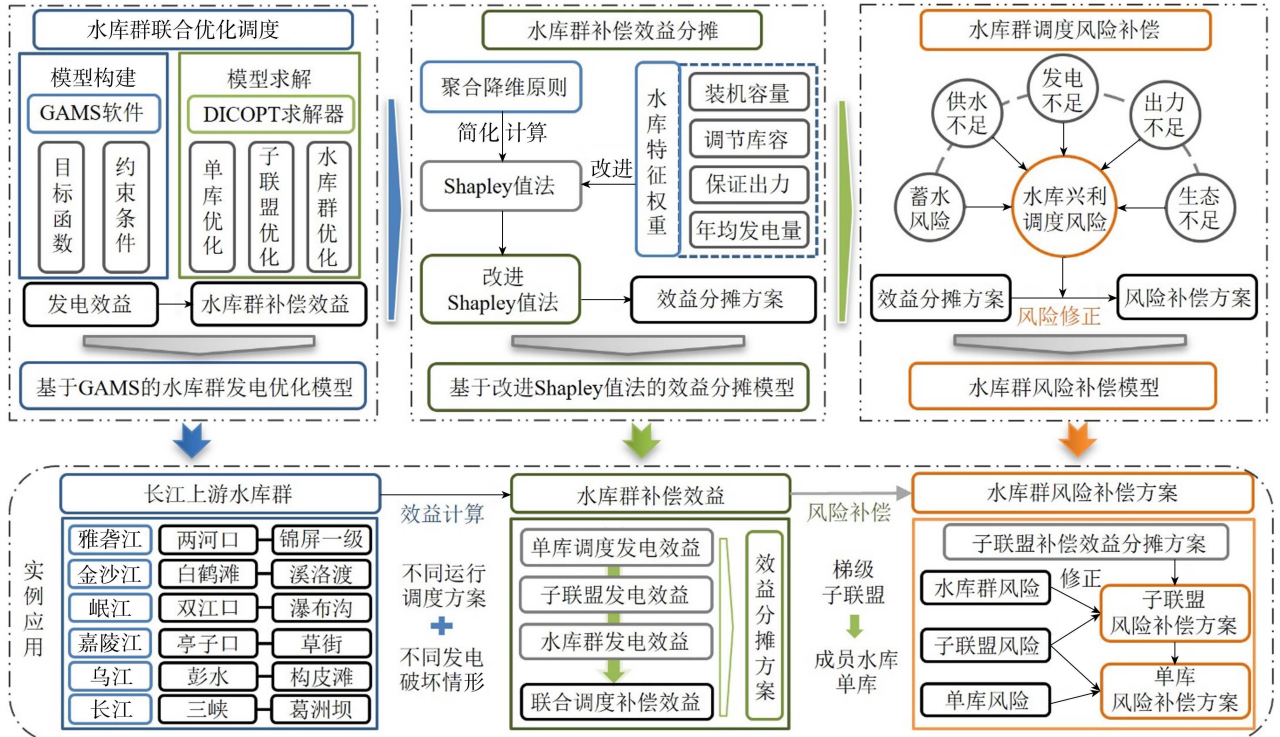


图 1 研究框架

Fig. 1 Study framework

$$Z_{i,\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,\max} \quad (3)$$

$$N_{i,\min} \leq N_{i,t} \leq N_{i,\max} \quad (4)$$

$$q_{i,\min} \leq q_{i,t} \leq q_{i,\max} \quad (5)$$

$$I_{i+1,t} = q_{i,t} + J_{i,t} \quad (6)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为 t 时段初、末水库 i 的蓄水量; $q_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为 t 时段水库 i 的下泄、入库流量; $Z_{i,\max}$ 、 $Z_{i,\min}$ 分别为水库 i 的上、下限水位, 其中汛期 $Z_{i,\max}$ 为汛限水位, 非汛期为正常蓄水位, $Z_{i,\min}$ 为死水位; $N_{i,\max}$ 、 $N_{i,\min}$ 分别为水库 i 的上、下限出力; $q_{i,\max}$ 、 $q_{i,\min}$ 分别为水库 i 的上、下限出库流量; $I_{i+1,t}$ 为 t 时段水库 $i+1$ 的入库流量; $J_{i,t}$ 为 t 时段水库 i 至水库 $i+1$ 的区间流量。

1.1.2 基于 GAMS 软件的水库群发电优化调度模型构建和求解

GAMS (general algebraic modeling system) 软件将关系数据技术与数学规划理论相结合, 能够灵活地根据实际需求建立数学模型, 并提高复杂数学问题求解效率, 在求解流域水库群联合调度中具有明显的优势^[14-16]。基于此, 选用 GAMS 软件建立水库群联合调度发电优化混合整数非线性规划模型, 对水库群发电优化调度模型涉及的集合进行定义, 确定各输入变量及约束条件, 声明各变量参数, 并调用 GAMS 内置的 DICOPT (discrete and continuous optimizer) 求解器求解。其模型结构可简化为如图 2 所示。DICOPT 求解器基于等式松弛策略、广义罚函数和外部逼近法, 将混合整数非线性规划问题松弛为混合整数规划主问题和非线性规划子问题进行求解, 适用于整数变量仅存在于线性函数内的混合整数非线性规划问题^[17-18], GAMS 软件可以调用多种最优化程序求解松弛后的问题^[19]。

1.2 风险补偿方法

为解决 Shapley 值法中参与人同质的问题, 引入可以体现水库个体特征与偏好的水库特征权重, 并结合水库之间的关联关系对水库进行聚合降维, 提高补偿效益分摊效率, 得到改进 Shapley 值法。同时, 为实现水库群风险效益平衡, 建立风险指标体系评价水库调度风险, 基于此修正改进 Shapley 值法的分摊结果, 得到水库群风险补偿方案。

1.2.1 水库重要程度分析

熵权法是一种客观赋权法, 根据指标信息熵判断指标变异程度, 能够有效排除决策主观性^[20-21]。综合考虑水库兴利库容、装机容量、多年发电量和保证出力 4 个水库特征指标, 采用熵权法确定各水库在流域内的重要程度, 计算得到各水库特征权重。步骤如下:

步骤 1 数据标准化。 设共有 n 个水库, 每个水库 4 个特性指标, 共 n 组特征指标 X_1, X_2, \dots, X_n , 水库 i 的一组指标初始值为 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}\}$ 。采用 Min-Max 标准化法^[22] 对特征指标进行标准化处理, 标准化后指标值为 Y_1, Y_2, \dots, Y_n , 其中 $Y_i = \{y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, y_{i4}\}$ 。

步骤 2 计算第 j 项特征指标熵值 E_j :

$$E_j = -\ln(1/n) \sum_{i=1}^n G_{ij} \ln G_{ij} \quad (7)$$

其中 $G_{ij} = (1 + y_{ij}) / \sum_{i=1}^n (1 + y_{ij})$ 式中: y_{ij} 为标准化后水库 i 的第 j 项指标值; G_{ij} 为水库 i 在第 j 项指标中占的比例。

步骤 3 计算第 j 项特征指标权重 α_j :

$$\alpha_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^4 (1 - E_j) \quad (8)$$

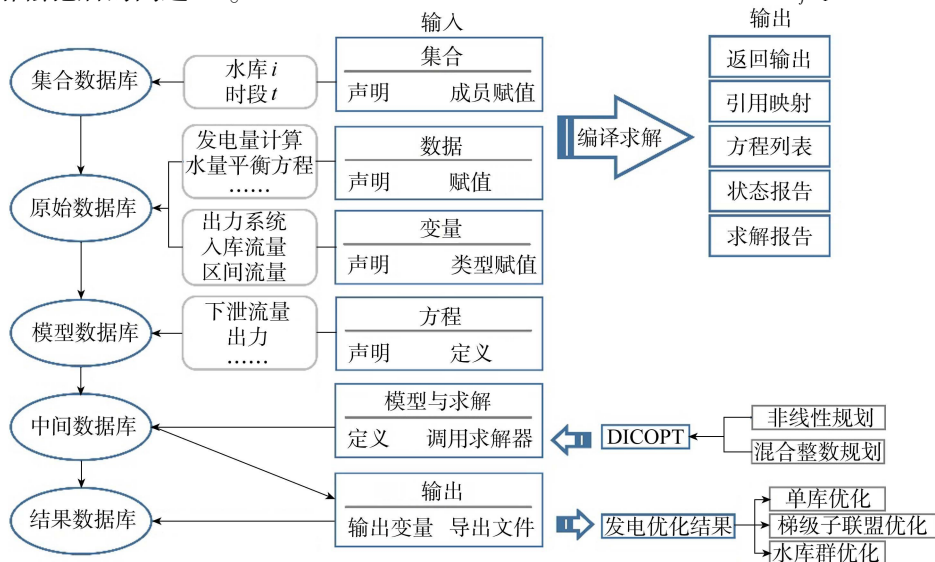


图 2 基于 GAMS 软件的简化模型结构

Fig. 2 Simplified model structure based on GAMS software

步骤 4 计算水库 i 综合得分 S_i 及其特征权重 θ_i :

$$S_i = \sum_{j=1}^4 \alpha_j y_{ij} \quad (9)$$

$$\theta_i = S_i / \sum_{i=1}^n S_i \quad (10)$$

1.2.2 改进 Shapley 值法

结合水库之间的关联关系对水库进行聚合降维,并引入水库特征权重改进 Shapley 值法,步骤如下:

步骤 1 采用聚合降维思路减少联盟成员数量。根据水库群的地理位置和运行关系,可将直接属于上下游或属于同一开发主体管辖范围内的梯级水库聚合为同一子联盟^[23]。

步骤 2 计算水库子联盟的 Shapley 值。假设水库群联盟 $G = [N, v]$ 中共有 m 个梯级子联盟,其中 $N = \{1, 2, \dots, m\}$, v 为联合调度的可能最大收益, Shapley 值表示各个水库子联盟对联合调度的贡献程度。在满足对称性、有效性、可加性公理的情况下, Shapley 值存在唯一解^[24-25]:

$$\sigma = [v(S) - v(S \setminus u)] \sum_{S \in N} W(|S|) \quad (11)$$

其中 $W(|S|) = (|S| - 1)! (n - |S|)! / n!$
式中: S 为 N 的子集; $|S|$ 为联盟 S 包含的水库数量; $W(|S|)$ 为联盟 S 出现的概率; $v(S) - v(S \setminus u)$ 为第 u 个成员对联盟 S 的边际贡献值。

步骤 3 梯级子联盟效益分摊。结合子联盟中水库特征权重,调整分摊方案,确定梯级子联盟效益分摊比例。

$$\beta_p = \sigma_p \theta_p / \sum_p (\sigma_p \theta_p) \quad (12)$$

其中 $\theta_p = \sum_{i \in P} \theta_i$
式中: β_p 为调整后梯级子联盟 P 的效益分摊比; θ_p 为梯级子联盟 P 的特征权重。

1.2.3 水库兴利调度风险分析

在保证水库防洪安全的基础上,考虑水库主要兴利功能,从发电、供水和生态 3 方面构建水库兴利调度风险评价指标体系,如图 3 所示。

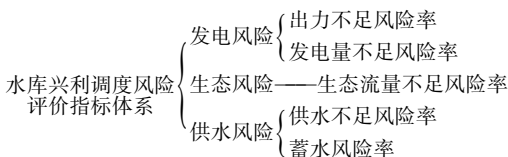


图 3 水库兴利调度风险评价指标体系

Fig. 3 Risk assessment index system for reservoir operation and utilization

基于指标体系分析水库兴利调度风险。首先,构建评价指标矩阵,设某个水库调度存在 c 个调度

方案、 d 个评价指标,则方案集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_c\}$, 评价指标集 $K = \{k_1, k_2, \dots, k_d\}$, 构成评价指标矩阵 $A_{c \times d}$ 。对水库调度风险评价指标进行标准化处理,得到标准化矩阵 $B_{c \times d}$ 。采用 Critic 法对风险指标进行加权计算,得水库调度风险率^[27-28]。最后,计算水库调度风险率占联盟中所有水库调度风险率的比例,作为水库的风险承担程度,计算公式为

$$f_i = F_i / \sum_{i \in P} F_i \quad (13)$$

其中 $F_i = (\sum_{s=1}^c \sum_{z=1}^d \eta_z b_{isz}) / c$
式中: f_i 为水库 i 的风险承担程度; F_i 为各调度方案下水库 i 的平均调度风险率; $\sum_{i \in P} F_i$ 为梯级子联盟 P 的调度风险率; η_z 为风险指标 z 的权重; b_{isz} 为标准化后水库 i 在方案 s 下风险指标 z 的值。

1.2.4 风险补偿计算

水库群联合调度过程中各水库所面临的风险有所不同,风险因素是水库群效益分摊需要考虑的重要因素之一,补偿效益分摊比例应与水库群联盟成员承担的调度风险大小相匹配,适当增加承担风险大的成员的补偿效益分摊比,使水库群做到效益共享,风险共担。基于水库兴利调度风险修正改进 Shapley 值法的分摊结果,结合改进 Shapley 值法中的聚合降维思路,分步计算梯级子联盟和成员水库单库风险补偿方案。

a. 梯级子联盟风险补偿计算。基于梯级子联盟风险承担程度,修正改进 Shapley 值法确定的效益分摊比,得到梯级子联盟风险补偿方案:

$$\omega_p = \beta_p f_p / \sum_p (\beta_p f_p) \quad (14)$$

其中 $f_p = \sum_{i \in P} f_i / \sum_p f_i$
式中: ω_p 为风险补偿后梯级子联盟 P 的补偿效益分摊比; f_p 为梯级子联盟 P 的风险承担程度。

b. 单库风险补偿计算。基于梯级子联盟风险补偿方案,考虑单库特征权重及调度风险,采用组合赋权法分摊梯级子联盟补偿效益,得到成员水库单库风险补偿方案:

$$\omega_i = \omega_p (\theta_i f_i) / \sum_{i \in P} (\theta_i f_i) \quad (15)$$

式中 ω_i 为风险补偿后梯级子联盟 P 中水库 i 的补偿效益分摊比。

2 实例应用

2.1 研究区概况及水库重要程度分析

长江全长约 6 400 km,集水面积约 180 万 km²,流域横跨我国 11 个省(自治区、直辖市),干支流包

括雅砻江、金沙江、岷江等。随着以三峡水库为代表的多座水利枢纽工程建成,长江流域总装机容量达到约 11.38 万 MW,总调节库容约 771.06 亿 m^3 ,总防洪库容约 496.65 亿 m^3 [29-30]。采用熵权法分析各干支流水库的重要程度,分别选取 6 条干支流中重要程度较高的两座梯级水库作为代表性水库参与水库群联合调度,水库分布如图 4 所示,水库部分特征参数及特征权重如表 1。根据聚合降维思路将水库群中直接属于上下游的梯级水库聚合为同一子联盟,共 6 组梯级子联盟分别编号为 A~F,并将同一梯级子联盟中的上、下游水库分别编号为 I 和 II。

2.2 不同调度方案下水库群风险补偿分析

采用典型平水年旬径流资料,从 6 月起以年为调度期、旬为调度时段开展水库群发电优化调度。为探究不同运行调度方案对水库群补偿效益分摊的影响,结合实际设计 3 种运行调度方案,不同调度方案下干支流和区间来水以及水库初始状态均相同,水库群起始蓄水时段分别设置为 9 月中旬、9 月下旬和 10 月上旬。基于水库群发电优化调度模型进

行效益计算,分别对 6 个梯级子联盟和 12 座代表性水库进行效益分摊和风险补偿。

2.2.1 梯级子联盟风险补偿分析

a. 水库群发电优化调度。对 6 组梯级子联盟的投产进行组合,形成 63 种运行组合,对各运行组合进行发电优化调度,得到各梯级子联盟在水库群中的效益贡献值。因篇幅限制,二级、三级、四级、五级子联盟分别选取 2 种运行组合,与单级子联盟、六级子联盟的优化发电结果一并在表 2 列出。

b. 水库兴利调度风险分析。建立基于水库群起始蓄水时段分别设置为 9 月中旬、9 月下旬和 10 月上旬的 3 种运行调度方案的水库风险指标集,采用 Critic 法对评价指标进行客观赋权,得到蓄满风险、供水风险、出力不足风险、发电量不足风险和生态不足风险的权重分别为 0.10、0.17、0.28、0.26 和 0.19。根据评价指标值及其权重确定各水库面临的调度风险,如表 3 所示。由表 3 可见,两河口水库的调度风险最高,亭子口水库次之,风险率可达 30%;彭水水库的风险率低至 10%左右,是联合调度

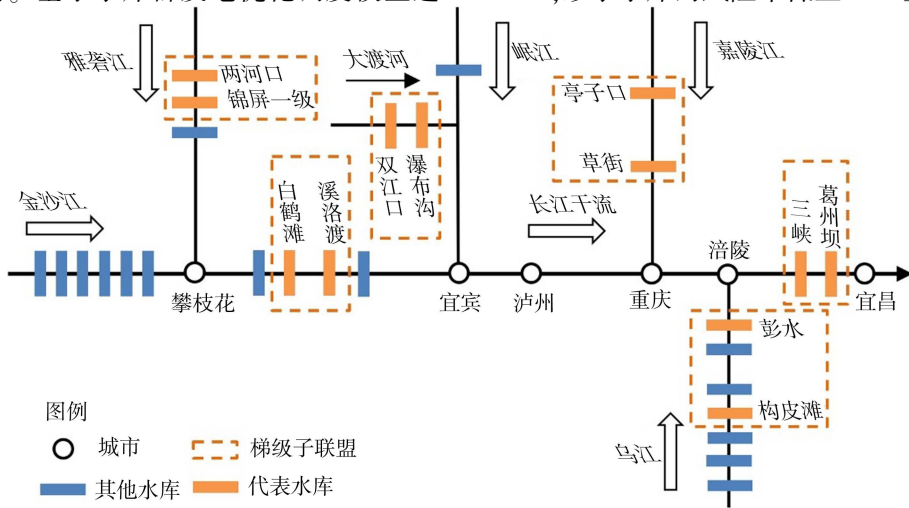


图 4 研究区水库分布

Fig. 4 Distribution of reservoirs in study area

表 1 水库特征参数及特征权重

Table 1 Characteristic parameters and feature weights of reservoirs

子联盟	水库名称	水库编号	调节性能	死水位/m	正常蓄水位/m	兴利库容/亿 m^3	装机容量/MW	特征权重
A	两河口	A-I	多年	2785	2860	65.60	3000	0.04
	锦屏一级	A-II	年	1800	1880	49.10	3600	0.05
B	白鹤滩	B-I	年	760	825	104.36	16000	0.22
	溪洛渡	B-II	不完全年	540	600	64.60	13860	0.19
C	双江口	C-I	不完全年	2420	2500	19.17	2000	0.03
	瀑布沟	C-II	不完全年	790	850	38.83	3300	0.05
D	亭子口	D-I	年	438	458	34.68	1100	0.01
	草街	D-II	季	200	203	4.87	500	0.01
E	构皮滩	E-I	多年	585	630	31.50	3000	0.04
	彭水	E-II	不完全年	278	293	5.18	1750	0.02
F	三峡	F-I	季	155	175	165.00	22500	0.30
	葛洲坝	F-II	日	63	67	0.85	3210	0.04

表 2 部分运行组合优化发电结果

单位:亿 kW·h

Table 2 Optimization of power generation results for part of production combinations unit:10⁸kW·h

梯级子联盟	运行组合	A	B	C	D	E	F	总和
单级子联盟		255.2	959.2	213.2	45.5	160.3	930.2	2563.5
二级子联盟	A、B	251.7	978.0					1229.8
	A、C	255.2		213.2				468.4
三级子联盟	A、B、C	251.7	978.0	213.2				1443.0
	A、B、D	251.7	978.0		45.5			1275.3
四级子联盟	A、B、C、D	251.7	978.0	213.2	45.5			1488.5
	A、B、C、E	251.7	978.0	213.2		160.3		1603.3
五级子联盟	A、B、C、D、E	251.7	978.0	213.2	45.5	160.3		1648.8
	A、B、C、D、F	250.4	973.0	212.3	45.1		949.4	2430.0
六级子联盟	A、B、C、D、E、F	250.9	975.7	211.8	44.9	159.5	950.7	2593.5

表 3 各方案下水库调度风险

Table 3 Risk of reservoir scheduling in various schemes

水库	调度风险/%		
	9月中旬蓄水方案	9月下旬蓄水方案	10月上旬蓄水方案
两河口	30.76	31.96	31.68
锦屏一级	19.07	18.94	19.02
白鹤滩	22.13	23.38	24.56
溪洛渡	16.28	17.91	19.57
双江口	19.24	21.94	21.78
瀑布沟	14.58	19.10	16.95
亭子口	28.02	27.70	30.75
草街	14.30	14.56	14.87
构皮滩	14.22	14.99	14.14
彭水	9.29	13.93	8.81
三峡	15.64	16.91	17.46
葛洲坝	14.53	15.49	15.51

风险承担水平最低的水库。由于不同运行方案下起调时间、干支流及区间来水、水库初始状态等因素不变,不同起始蓄水时段对水库兴利调度风险的整体影响不大。

c. 基于改进 Shapley 值法的水库群效益分摊及风险补偿。采用改进 Shapley 值法确定 3 种运行调度方案下梯级子联盟的效益分摊方案,并基于调度风险修正分摊结果,得到风险补偿方案及修正系数,结果如表 4 所示。由表 4 可见,基于改进 Shapley 值法分摊水库群补偿效益,位于干流上游的梯级子联盟 B 对水库群发电效益贡献最大,分摊比例超过 50%;水库规模较大的梯级子联盟 F 分摊比例可达到 40%;其余梯级子联盟水库规模较小且效益贡献程度较低,分摊比例均不超过 5%。补偿效益分摊比例与各子联盟的调节能力相匹配。经风险补偿,梯级子联盟 B 的分摊比例最高,超过 55%;梯级子联盟 D 的分摊比例最低,低于 0.20%。不同运行调度方案不会改变水库群分摊比例结构。梯级子联盟 F 水库规模较大,在联合调度中效益贡献程度较高,但考虑其面临风险较小,应适当减少该梯级子联盟的分摊比例;梯级子联盟 C、E 水库规模相对较小,

表 4 梯级子联盟风险补偿方案及修正系数

Table 4 Risk compensation plan and correction coefficient

方案	梯级子联盟	Shapley 值	效益分摊比例/%		修正系数/%
			风险补偿比例/%		
9 月中旬蓄水方案	A	269.08	3.09	4.40	1.30
	B	987.57	51.70	56.66	4.96
	C	215.59	2.20	2.12	-0.08
	D	46.6	0.12	0.14	0.02
	E	160.95	1.23	0.83	-0.41
	F	959.45	41.65	35.85	-5.80
9 月下旬蓄水方案	A	268.75	3.13	4.22	1.09
	B	976.21	51.72	56.59	4.87
	C	215.22	2.22	2.42	0.19
	D	45.9	0.12	0.13	0.01
	E	161.41	1.25	0.96	-0.29
	F	945.96	41.56	35.68	-5.88
10 月上旬蓄水方案	A	268.09	3.15	4.06	0.91
	B	967.09	51.69	58.02	6.33
	C	213.97	2.23	2.20	-0.03
	D	46.02	0.12	0.14	0.02
	E	160.88	1.26	0.73	-0.52
	F	937.45	41.55	34.85	-6.71

在水库联合调度中贡献较低,且运行过程中不承担高风险,分摊比例应降低。

计算水库群联合运行效益与各水库单独运行效益之和的差值,作为水库群联合调度的补偿效益,运用上述风险补偿方案,实现补偿效益分摊。不同蓄水方案下,各梯级子联盟单独运行、水库群联合运行及风险补偿后可得效益如图 5 所示,图中 1、2、3 分别表示梯级子联盟在单独运行、水库群联合运行、风险补偿后 3 种情况,如 A-1 表示梯级子联盟 A 单独运行时可获得效益。经过效益分摊和风险补偿,接受上游调蓄的梯级子联盟 B、F 需要分出一部分发电效益用于补偿上游梯级子联盟;付出补偿的梯级子联盟的分摊效益低于其联合运行时的发电效益,被补偿的梯级子联盟的分摊效益高于其联合运行时的发电效益,其中梯级子联盟 B 既是补偿方又是被补偿方,其分摊效益变化趋势与付出补偿和被补偿

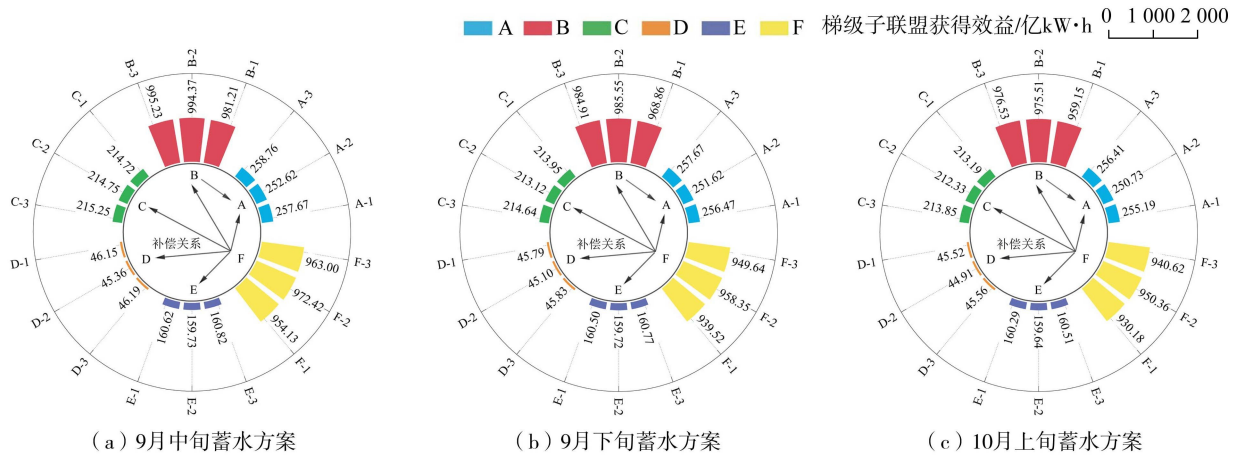


图5 不同蓄水方案下各梯级子联盟风险补偿结果

Fig. 5 Risk compensation results for cascade sub-alliances under different water storage schemes

的相对值有关;各梯级子联盟的分摊效益均高于其单独运行时的发电效益,保证了联盟的稳定性。

2.2.2 单库风险补偿分析

根据水库特征权重及调度风险,分配梯级子联盟补偿效益,确定单库风险补偿方案。各水库单独运行、水库群联合运行及风险补偿后可得效益如图6所示,图中1、2、3分别表示水库在单独运行、水库群联合运行、风险补偿后3种情况,如A-I-1表示梯级子联盟A中上游水库单独运行时可获得效益。由图6可见,各梯级子联盟中上游水库的调度风险均大于下游水库,下游水库需分出一部分发电效益对上游水库进行补偿。经风险补偿,梯级子联盟中上游水库分摊效益高于其联合运行时的发电效益,下游水库分摊效益低于其联合运行时的发电效益。其中,三峡水库在受到下游葛洲坝水库补偿的同时,需对上游各梯级子联盟进行补偿,经风险补偿,其分摊效益可能低于其联合运行时的发电效益。各水库的分摊效益均高于其单独运行时的发电效

益,且在联合调度中贡献高效益、承担高风险的水库可获得更多的补偿效益。风险补偿方案在维持水库联盟的稳定性的同时,有利于提高水库参与联合调度的积极性。

2.3 考虑发电破坏情形下的风险补偿分析

为探究不同发电破坏情形对水库群补偿效益分摊的影响,假定各水库中每台发电机组参数相同,统计机组数量,并以此为依据设计各水库不同发电破坏程度的运行方案(表5)。通过限制水库最大出力 N_{max} 模拟水库发电破坏时的发电结果,以未出现发电破坏时水库群运行方案作为对比方案,基于风险补偿方法确定不同发电破坏情形下的水库群风险补偿方案。

2.3.1 梯级子联盟风险补偿分析

计算48种不同发电破坏程度的运行方案和1种对比方案下梯级子联盟的风险补偿方案,结果如表6所示。其中,每个水库编号与其破坏程度的组合代表一种发电破坏情形,如A-I-1表示两河口

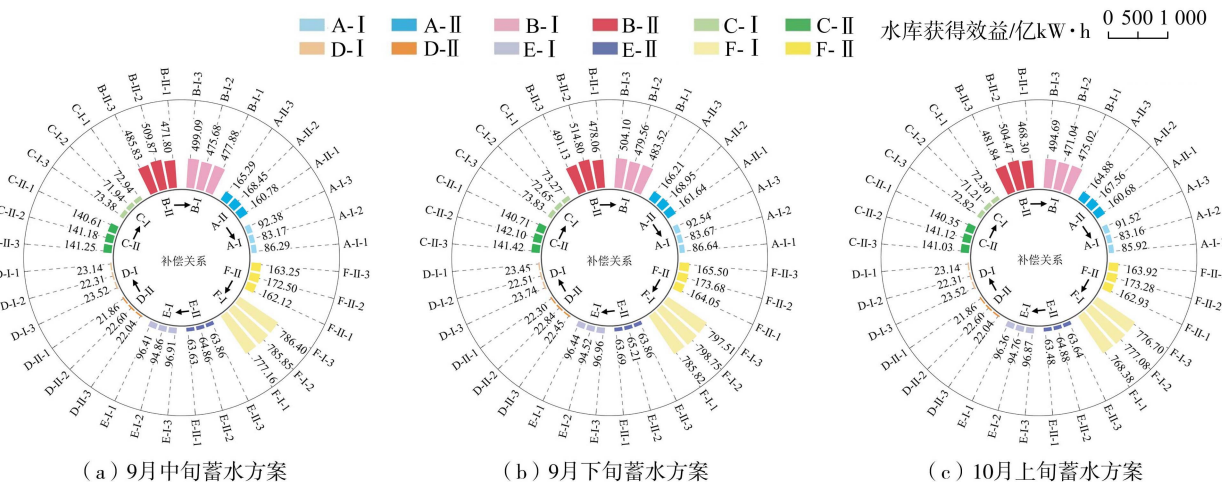


图6 不同蓄水方案下单库风险补偿结果

Fig. 6 Risk compensation results for single reservoir under different water storage schemes

表5 各水库发电破坏情形方案设计

Table 5 Design of power generation disruption scenarios for each reservoir

水库名称	水库编号	机组数量	发电破坏机组数量				
			对比方案	方案1	方案2	方案3	方案4
两河口	A-I	6	0	2	4	5	6
锦屏一级	A-II	6	0	2	4	5	6
白鹤滩	B-I	16	0	4	8	12	16
溪洛渡	B-II	18	0	5	9	14	18
双江口	C-I	4	0	1	2	3	4
瀑布沟	C-II	6	0	2	4	5	6
亭子口	D-I	4	0	1	2	3	4
草街	D-II	4	0	1	2	3	4
构皮滩	E-I	5	0	1	2	4	5
彭水	E-II	5	0	1	2	4	5
三峡	F-I	34	0	10	18	26	34
葛洲坝	F-II	21	0	5	10	15	21

水库存在2台机组发电破坏的运行方案,O代表对比方案。由表6可见,在保证防洪要求的基础上,不同破坏情形会对水库调度风险产生影响,但对水库群风险补偿后效益分摊比例结构影响不大。位于干流的梯级子联盟B和梯级子联盟F出现发电破坏时,对彼此的效益分摊比例影响较为明显。

对比梯级子联盟发电破坏对自身分摊比例的影响以及梯级子联盟B和梯级子联盟F出现发电破

表6 不同发电破坏情形下水库群各梯级子联盟风险补偿结果

Table 6 Risk compensation results of each cascade sub-alliance of reservoir group under different power generation disruption scenarios

发电破坏情形	效益分摊比例/%						发电破坏情形	效益分摊比例/%					
	A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F
O	4.06	58.02	2.20	0.14	0.73	34.85	O	4.06	58.02	2.20	0.14	0.73	34.85
A-I-1	3.93	60.39	2.69	0.08	2.10	30.81	D-I-1	4.67	58.62	2.40	0.10	1.66	32.56
A-I-2	3.68	52.14	2.88	0.09	3.41	37.79	D-I-2	5.04	58.82	1.78	0.10	0.48	33.79
A-I-3	4.67	58.22	2.11	0.09	3.64	31.26	D-I-3	4.57	60.56	1.59	0.00	1.23	32.06
A-I-4	7.68	58.17	2.42	0.02	2.08	29.63	D-I-4	3.29	60.70	1.67	0.36	1.44	32.53
A-II-1	4.24	61.14	0.55	0.02	0.64	33.41	D-II-1	4.34	60.42	2.01	0.13	0.46	32.65
A-II-2	4.10	61.16	2.45	0.14	1.09	31.06	D-II-2	4.16	58.54	1.99	0.21	2.01	33.09
A-II-3	5.44	59.93	0.36	0.16	1.96	32.16	D-II-3	4.39	58.38	2.24	0.14	1.93	32.92
A-II-4	8.40	59.73	0.62	0.01	0.54	30.70	D-II-4	4.75	57.82	2.17	0.31	0.89	34.06
B-I-1	4.36	62.14	1.46	0.06	1.03	30.95	E-I-1	4.22	57.65	2.99	0.08	1.46	33.61
B-I-2	2.98	74.50	1.33	0.05	1.14	20.00	E-I-2	4.28	57.80	1.59	0.01	1.58	34.74
B-I-3	3.50	66.05	1.21	0.08	1.36	27.80	E-I-3	4.19	59.12	1.00	0.04	1.24	34.42
B-I-4	2.27	66.72	1.44	0.04	1.11	28.42	E-I-4	3.78	54.81	2.79	0.01	5.23	33.38
B-II-1	2.39	65.97	0.86	0.06	1.12	29.60	E-II-1	4.20	57.44	2.34	0.16	1.64	34.22
B-II-2	2.63	74.70	0.53	0.01	0.48	21.65	E-II-2	3.94	55.15	2.41	0.01	2.87	35.62
B-II-3	1.97	79.25	0.53	0.01	0.45	17.80	E-II-3	4.20	57.35	3.14	0.11	1.79	33.43
B-II-4	2.16	49.60	1.15	0.04	1.31	45.74	E-II-4	4.64	57.08	2.57	0.02	4.08	31.62
C-I-1	4.26	60.73	0.77	0.01	1.66	32.58	F-I-1	3.38	57.11	0.85	0.07	3.33	35.26
C-I-2	4.38	59.37	2.17	0.24	0.57	33.27	F-I-2	2.14	46.65	2.67	0.12	1.52	46.91
C-I-3	4.60	61.14	0.27	0.01	0.46	33.52	F-I-3	2.66	77.41	0.91	0.04	0.71	18.27
C-I-4	3.93	55.67	4.66	0.01	1.95	33.78	F-I-4	2.72	72.63	0.12	0.03	2.61	21.89
C-II-1	3.96	54.52	4.96	0.03	2.18	34.36	F-II-1	4.03	56.38	1.50	0.06	2.17	35.85
C-II-2	3.98	54.83	4.95	0.04	1.68	34.52	F-II-2	3.94	51.89	2.19	0.16	0.99	40.84
C-II-3	3.68	55.38	6.97	0.01	2.16	31.80	F-II-3	4.37	61.19	2.17	0.28	0.50	31.49
C-II-4	3.13	49.91	11.40	0.01	1.99	33.55	F-II-4	2.46	45.02	0.79	0.06	2.63	49.05

坏对各梯级子联盟分摊比例的影响,结果如表7和表8所示。由表7可见,梯级子联盟的效益贡献度对风险补偿影响较大,效益贡献度较小的梯级子联盟补偿效益分摊比例主要随着机组破坏而呈现上升趋势;而贡献度较大的梯级子联盟B和F出现发电破坏时,调度风险上升,但其边际贡献值随着发电破坏变动较大,随着机组大面积失效,水库边际贡献陡然降低,导致其分摊比例出现不规则波动。同时,梯级子联盟风险补偿受其在流域中的地理位置影响。由表8可见,位于上游的梯级子联盟在水库群中起到重要的调蓄作用,受到其他梯级子联盟的补偿程度较大,其分摊比例的不规则波动程度相对较小。位于干流的梯级子联盟B和梯级子联盟F出现发电破坏时,其补偿效益变化规律相反且变化幅度相近。

2.3.2 单库风险补偿分析

基于梯级子联盟风险补偿方案分摊成员水库补偿效益,以梯级子联盟A发电破坏情形为例进一步分析。正常运行时,两河口和锦屏一级水库调度风险分别为30.76%和19.07%,相应效益分摊比例分别为61.78%和38.22%。不同破坏情形下,两水库的单库调度风险及相应补偿效益分摊比例变化如表9所示。由表9可见,由于不同发电破坏情形下

表7 梯级子联盟发电破坏对自身分摊比例影响

Table 7 Impact of power generation disruption of cascade sub-alliance on its own allocation ratio

发电破坏情形	梯级子联盟效益分摊比例/%					
	A	B	C	D	E	F
O	4.06	58.02	2.20	0.14	0.73	34.85
I-1	3.93	62.14	0.77	0.10	1.46	35.26
I-2	3.68	74.50	2.17	0.10	1.58	46.91
I-3	4.67	66.05	0.27	0.01	1.24	18.27
I-4	7.68	66.72	4.66	0.36	5.23	21.89
II-1	4.24	65.97	4.96	0.13	1.64	35.85
II-2	4.10	74.70	4.95	0.21	2.87	40.84
II-3	5.44	79.25	6.97	0.14	1.79	31.49
II-4	8.40	49.60	11.40	0.31	4.08	49.05

表8 梯级子联盟发电破坏对其他子联盟分摊比例影响

Table 8 Impact of power generation disruption of cascade sub-alliance on other sub-alliance allocation ratio

子联盟	发电破坏情形	梯级子联盟效益分摊比例/%					
		A	B	C	D	E	F
B	I-1	4.36	62.14	1.46	0.06	1.03	30.95
	I-2	2.98	74.50	1.33	0.05	1.14	20.00
	I-3	3.50	66.05	1.21	0.08	1.36	27.80
	I-4	2.27	66.72	1.44	0.04	1.11	28.42
	II-1	2.39	65.97	0.86	0.06	1.12	29.60
	II-2	2.63	74.70	0.53	0.01	0.48	21.65
	II-3	1.97	79.25	0.53	0.01	0.45	17.80
	II-4	2.16	49.60	1.15	0.04	1.31	45.74
F	I-1	3.38	57.11	0.85	0.07	3.33	35.26
	I-2	2.14	46.65	2.67	0.12	1.52	46.91
	I-3	2.66	77.41	0.91	0.04	0.71	18.27
	I-4	2.72	72.63	0.12	0.03	2.61	21.89
	II-1	4.03	56.38	1.50	0.06	2.17	35.85
	II-2	3.94	51.89	2.19	0.16	0.99	40.84
	II-3	4.37	61.19	2.17	0.28	0.50	31.49
	II-4	2.46	45.02	0.79	0.06	2.63	49.05

表9 不同发电破坏情形下单库调度风险及补偿效益分摊比例变化

Table 9 Changes in proportion of risk and compensation benefit allocation for single reservoir scheduling under different power generation disruption scenarios

发电破坏水库	发电破坏程度	调度风险/%		效益分摊比例/%	
		两河口	锦屏一级	两河口	锦屏一级
两河口	2台失效	35.43	17.23	62.19	37.81
	4台失效	33.78	16.75	61.73	38.27
	5台失效	45.02	17.03	67.89	32.11
	全部失效	72.00	15.82	78.45	21.55
锦屏一级	2台失效	31.23	19.76	56.62	43.38
	4台失效	29.45	22.31	51.33	48.67
	5台失效	29.59	42.03	36.36	63.64
	全部失效	30.15	69.78	25.53	74.47

水库特征权重相等,调度风险的大小主导了单库补偿效益分摊比例变化。发电失效导致梯级子联盟成员水库调度风险增大,补偿效益分摊比例随着调度风险成正相关变化。

3 结论

a. 基于改进 Shapley 值法的水库群风险补偿方法不仅考虑了水库个体特征和调度效益贡献,还兼顾了水库调度风险,降低了求解的烦琐程度,使贡献高效益、承担高风险的水库获得更多的补偿效益,有利于调动水库参与联合调度的积极性。

b. 在水库正常运行时,不同运行调度方案对水库群补偿效益分摊比例结构影响不大。梯级子联盟中,下游水库的调度风险均小于上游水库,需分出一部分发电效益对上游水库进行补偿。

c. 在发电破坏情形中,梯级子联盟补偿效益分摊比例主要受其效益贡献程度及地理位置影响,效益贡献程度较大且位于下游的梯级子联盟,其效益分摊比例随着机组破坏易出现不规则波动;单库补偿效益分摊比例的变化受调度风险主导,随着机组失效台数增加呈现上升趋势。

参考文献:

[1] 黄显峰,王宁,刘志佳,等.基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度[J].水利水电科技进展,2024,44(4):51-58. (HUANG Xianfeng, WANG Ning, LIU Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(4):51-58. (in Chinese))

[2] 张长征,李洪梅.基于可变模糊评价法的小型水库运行管理评价研究[J].水利经济,2023,41(6):30-36. (ZHANG Changzheng, LI Hongmei. Study on the evaluation of small reservoir operation and management based on variable fuzzy evaluation method [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023,41(6):30-36. (in Chinese))

[3] 杨雄.梯级水电站中长期优化调度及补偿效益分摊:以金沙江中游为例[D].北京:华北电力大学(北京),2018.

[4] 钟平安,曹静,蔡杰.梯级水电站实时补偿增益多因素综合分配方法探讨[J].水力发电学报,2008,27(6):22-26. (ZHONG Pingan, CAO Jing, CAI Jie, et al. Discussion on multifactor distribution method of real-time compensation operation of cascade hydropower stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008,27(6):22-26. (in Chinese))

[5] 肖杰.水电站群联合调度效益分摊机制研究[D].武汉:华中科技大学,2018.

[6] 曹云慧,王丽萍,王春超,等.基于熵权 Shapley 值法的梯级水电站补偿效益分摊[J].水电能源科学,2013,31(2):91-94. (CAO Yunhui, WANG Liping, WANG Chunchao, et al. Sharing compensation benefits of cascade hydropower stations based on entropy weight and Shapley

- value method[J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(2):91-94. (in Chinese))
- [7] 张剑亭,郭生练,陈柯兵,等. 基于信息熵的梯级水库联合优化调度增益分配法[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(2): 94-102. (ZHANG Jianting, GUO Shenglian, CHEN Kebing, et al. Benefit distribution method based on information entropy for optimal joint operation of cascade reservoirs[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(2):94-102. (in Chinese))
- [8] 李英海,汪利,李清清,等. 梯级补偿效益分摊的变异系数-Shapley 值法[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(9): 11-22. (LI Yinghai, WANG Li, LI Qingqing, et al. Variation coefficient-Shapley value method for compensation benefits allocation of cascade hydropower stations[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(9): 11-22. (in Chinese))
- [9] 何勇,张乐辰,李文斌,等. 梯级电站聚合降维发电补偿效益分配机制[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(4): 25-34. (HE Yong, ZHANG Lechen, LI Wenbin, et al. Power generation benefit distribution mechanism of cascade hydropower stations grouped by aggregation and dimensionality reduction [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(4): 25-34. (in Chinese))
- [10] 刘激,胡志根,崔金铁,等. 上游水电站控泄条件下的施工导流风险补偿研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(2): 243-249. (LIU Lian, HU Zhigen, CUI Jintie, et al. Risk compensation of construction diversion based on upstream flow control[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(2): 243-249. (in Chinese))
- [11] 刘激,胡志根. 上游水电站调蓄下施工导流风险效益分摊模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(6): 559-564. (LIU Lian, HU Zhigen. Construction diversion risk benefit sharing model based on water diversion and storage at upstream hydropower station[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(6): 559-564. (in Chinese))
- [12] 李建昌. 水库群调度风险利益补偿研究:以长江上游水库群为例[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2019.
- [13] 李继清,黄可,李建昌. 基于突变理论和相对风险的水库群联合调度风险补偿[J]. *水利水电工程学报*, 2023(4): 52-61. (LI Jiqing, HUANG Ke, LI Jianchang. Risk compensation of cascade reservoirs operation based on catastrophe theory and relative risk model [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(4): 52-61. (in Chinese))
- [14] 岳卫峰,高鸿永,陈爱萍,等. 基于 GAMS 的内蒙古河套灌区水资源联合利用分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(3): 12-16. (YUE Weifeng, GAO Hongyong, CHEN Aiping, et al. Study on conjunctive use of water resources in Hetao Irrigation district of Inner Mongolia based on GAMS simulation and optimization[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(3): 12-16. (in Chinese))
- [15] 冯胜凯. 考虑不确定性因素的多目标路面养护决策优化研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
- [16] 张程飞,刘纯,王跃峰,等. 基于模糊多目标优化的电网日前风电接纳能力评估模型[J]. *电网技术*, 2015, 39(2): 426-431. (ZHANG Chengfei, LIU Chun, WANG Yuefeng, et al. A fuzzy multi-objective optimization based evaluation model of wind power accommodation capability [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(2): 426-431. (in Chinese))
- [17] BERNAL D E, VIGERSKE S, TRESPALACIOS F, et al. Improving the performance of DICOPT in convex MINLP problems using a feasibility pump [J]. *Optimization Methods and Software*, 2020, 35(1): 171-190.
- [18] 田雨. 长江上游复杂水库群联合调度技术研究[D]. 天津:天津大学, 2011.
- [19] 刘明明. 混合整数非线性规划算法及多阶段随机优化应用[D]. 湘潭:湘潭大学, 2016.
- [20] 杜现增,袁榆梁,孟钰,等. 基于复合模糊物元-熵权组合模型的淮河干流健康综合评价[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 145-151. (DU Xianzeng, YUAN Yuliang, MENG Yu, et al. Comprehensive health evaluation of Huaihe River mainstream based on compound fuzzy matter element-entropy weight combination model [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 145-151. (in Chinese))
- [21] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese))
- [22] 季小江,杜三宝,王冠东. 应用 min-max 标准化分析法测定区域经济增长差异:以陕西省榆林地区为例[J]. *经济与管理*, 2016, 30(3): 54-56. (JI Xiaojiang, DU Sanbao, WANG Guandong. Using Min-Max normalization to measure the differences of regional economic growth: a case study of Yulin Area, Shanxi Province [J]. *Economy and Management*, 2016, 30(3): 54-56. (in Chinese))
- [23] 陈思雨. 长江上游梯级水库联合调度风险利益补偿机制研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2021.
- [24] SUN Panfei, HOU Dongshuang, SUN Hao. The Shapley value for cooperative games with restricted worths [J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2021, 495(2): 124762.

- Landsat 8 and Sentinel-2 data for mangrove phenology information extraction and classification [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26 (6) : 1121-1142. (in Chinese))
- [36] 李一阳,王红瑞,杨默远,等. 基于多重检验 EKC 的中国用水与产业发展关系分析[J]. 水资源保护, 2023, 39 (2) : 190-198. (LI Yiyang, WANG Hongrui, YANG Moyuan, et al. Analysis of relationship between water consumption and industrial development in China based on multiple testing Kuznets curve [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2) : 190-198. (in Chinese))
- [37] 何秋琴,王京伟,毕旭,等. 2005—2020 年山西省水源涵养功能时空格局及其演变驱动力分析[J]. 环境科学研究, 2024, 37(4) : 861-873. (HE Qiuqin, WANG Jingwei, BI Xu, et al. Temporal and spatial dynamics of water conservation in Shanxi Province (2005-2020) : patterns and influence analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(4) : 861-873. (in Chinese))
- [38] 田智慧,尹传鑫,王晓蕾. 鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析[J]. 环境科学, 2023, 44(2) : 816-827. (TIAN Zhihui, YIN Chuanxin, WANG Xiaolei. Dynamic monitoring and driving factors analysis of ecological environment quality in Poyang Lake Basin [J]. Environmental Science, 2023, 44 (2) : 816-827. (in Chinese))
- [39] 周昊昊,杜嘉,南颖,等. 1980 年以来 5 个时期珠江三角洲滨海湿地景观格局及其变化特征 [J]. 湿地科学, 2019, 17 (5) : 559-566. (ZHOU Haohao, DU Jia, NAN Ying, et al. Landscape patterns of coastal wetlands in Pearl River Delta and their changes for 5 periods since 1980 [J]. Wetland Science, 2019, 17 (5) : 559-566. (in Chinese))
- [40] WANG Xinxin, XIAO Xiangming, ZOU Zhenhua, et al. Tracking annual changes of coastal tidal flats in China during 1986-2016 through analyses of Landsat images with Google Earth Engine [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 238 : 110987.
- [41] 程子浩,刘先锋,林港特,等. 近 40 年粤港澳大湾区桑基鱼塘演变监测和分析[J]. 湿地科学与管理, 2021, 17 (3) : 29-35. (CHENG Zihao, LIU Xianfeng, LIN Gangte, et al. Changes in fish ponds in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area over the past 40 years [J]. Wetland Science & Management, 2021, 17(3) : 29-35. (in Chinese))
- [42] 张凌,江志坚,黄小平. 粤港澳大湾区大气、水环境及滨海湿地的保护研究 [J]. 环境科学与管理, 2022, 47 (11) : 160-165. (ZHANG Ling, JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping. The protecting strategies about the atmosphere, water and wetland in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(11) : 160-165. (in Chinese))
- [43] 杨晨晨,甘华阳,万荣胜,等. 粤港澳大湾区 1975—2018 年海岸线时空演变与影响因素分析 [J]. 中国地质, 2021, 48 (3) : 697-707. (YANG Chenchen, GAN Huayang, WAN Rongsheng, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of coastline in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1975 to 2018 [J]. Geology in China, 2021, 48 (3) : 697-707. (in Chinese))
- [44] 王长建. 粤港澳大湾区城市群生态系统及人地关系可持续 [J]. 科技管理研究, 2021, 41(13) : 71-76. (WANG Changjian. Coupling human and natural systems for sustainability of complex ecosystem in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(13) : 71-76. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-18 编辑:王芳)

(上接第 19 页)

- [25] 戴建华,薛恒新. 基于 Shapley 值法的动态联盟伙伴企业利益分配策略 [J]. 中国管理科学, 2004, 12(4) : 33-36. (DAI Jianhua, XUE Hengxin. The strategy of profit allocation among partners in dynamic alliance based on the Shapley value [J]. Chinese Journal of Management Science, 2004, 12(4) : 33-36. (in Chinese))
- [26] 段金长,宋雅坪,纪昌明,等. 东北电网水库群发电调度风险分析 [J]. 水电能源科学, 2010, 28(5) : 163-165. (DUAN Jinchang, SONG Yaping, JI Cangming, et al. Risk analysis of multi-reservoir generation dispatch in northeast power grid [J]. Water Resources and Power, 2010, 28 (5) : 163-165. (in Chinese))
- [27] 杨雄,李继清. 基于 Critic-Shapley 法的梯级水电站补偿效益分摊 [J]. 中国农村水利水电, 2018(4) : 185-189. (YANG Xiong, LI Jiqing. Sharing compensation benefits of cascade hydro-power stations based on Shapely and Critic value method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(4) : 185-189. (in Chinese))
- [28] 关涛,陈普瑞,肖一峰. 高拱坝时序多属性施工方案随机智能优化方法 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5) : 45-51. (GUAN Tao, CHEN Purui, XIAO Yifeng. Stochastic and intelligent optimization method of time-series multi-attribute construction schemes for high arch dams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5) : 45-51. (in Chinese))
- [29] 欧阳硕. 流域梯级及全流域巨型水库群洪水资源化联合优化调度研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2014.
- [30] 卢程伟. 流域水库群蓄滞洪区综合防洪调度研究与应用 [D]. 武汉:华中科技大学, 2019.

(收稿日期:2024-05-30 编辑:王芳)