

基于改进累积前景理论的黄河梯级水库水沙-生态-经济多目标调度决策模型

李东林^{1,2,3}, 李睿⁴, 刘刚⁵, 王远见^{1,2,3}, 李洁玉^{1,2,3}

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 黄河实验室, 河南 郑州 450003;
3. 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 河南 郑州 450003; 4. 黄河水利委员会水文局, 河南 郑州 450004;
5. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001)

摘要:考虑黄河流域行洪输沙、生态环境、社会经济多维调度需求, 构建了梯级水库水沙-生态-经济多目标优化调度模型, 并基于改进的累积前景理论构建了决策模型用于优选调度方案。以黄河干流龙羊峡、刘家峡、海勃湾、万家寨、三门峡、小浪底梯级水库联合调度为例, 开展了丰、平、枯典型年的调度决策模型构建与验证计算。结果表明:排沙与生态目标表现为一定的竞争性, 排沙与发电目标表现为较强的竞争性, 生态与发电目标表现为一定的协同性, 且在枯水年三目标间的竞争-协同关系明显; 较于真实调度方案, 丰、平、枯水年决策方案的三目标值均有不同程度的提升; 较于常用决策方法, 基于 MCPT 的决策方法灵敏性提高数倍, 适用于大量方案优选决策的情况。

关键词:梯级水库; 多目标优化; 决策模型; 改进累积前景理论; 黄河流域

中图分类号:TV697.1;TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0173-07

A multi-objective scheduling decision-making model based on modified cumulative prospect theory for water-sediment, eco-environment, and socio-economy of cascade reservoirs in the Yellow River Basin//LI Donglin^{1,2,3}, LI Rui⁴, LIU Gang⁵, WANG Yuanjian^{1,2,3}, LI Jieyu^{1,2,3} (1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Yellow River Laboratory, Zhengzhou 450003, China; 3. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, MWR, Zhengzhou 450003, China; 4. Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China; 5. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Considering the multi-dimensional scheduling needs of flooding and sand transport, ecological environment and social economy in the Yellow River Basin, a multi-objective optimal scheduling model of water-sediment, eco-environment, and socio-economy is constructed for cascade reservoirs. The decision-making model is constructed based on modified cumulative prospect theory (MCPT) to optimize the scheduling scheme. Take Longyangxia, Liujiaxia, Haibowan, Wanjiashai, Sanmenxia and Xiaolangdi cascade reservoirs as an example to construct and calculate scheduling decision-making models in wet, normal, and dry years. The results show that the sediment discharge and ecological objectives are somewhat competitive, the sediment discharge and power generation objectives are strongly competitive, while the ecological and power generation objectives are somewhat cooperative. The competitive-cooperative relationship among the three objectives is obvious in the dry year. Compared with the real scheduling scheme, the three target values for wet, normal, and dry years are all improved to different degrees. Compared with the commonly used decision-making methods, the sensitivity of the MCPT-based decision-making method is improved by several times, which is applicable to the situation where a large number of schemes need to be optimized for decision-making.

Key words: cascade reservoirs; multi-objective optimization; a decision-making model; MCPT; the Yellow River Basin

水库调度具有防洪、发电、灌溉、供水、航运等多重功能, 可为流域可持续发展提供丰富的水电资源。

当前全世界库容大于 1 000 m³ 水库超过 280 万座, 且未来水库建设数量将持续增加^[1], 因此构建水库

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200400);国家自然科学基金项目(U2243601,52409090);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项经费项目(HKY-JBYW-2024-01);黄河水利科学研究院科技发展基金项目(黄科发 202401)
作者简介:李东林(1993—),男,工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:lidonglinl@163.com
通信作者:王远见(1984—),男,正高级工程师,博士,主要从事水沙调控研究。E-mail:wangyuanjian_yrcc@aliyun.com

多目标优化调度模型与优选调度方案一直是行业的研究热点。

针对水库多种调度需求,通常利用数学规划方法构建不同的多目标优化调度模型获得调度方案,如供水-发电调度^[2]、防洪-发电调度^[3]、航运-发电调度^[4]、发电-生态调度^[5-6]、防洪-发电-生态调度^[7]等水库多目标调度模型研究成果层出不穷。在多沙河流,水库减淤是一个重要调度目标,围绕防洪-排沙调度^[8]、发电-排沙调度^[9]、排沙-生态调度^[10]等多目标优化调度模型研究较多,但这些模型的调度目标仅涉及水沙-经济或水沙-生态两个维度,而对流域水沙-生态-经济多维调度需求考虑不足。

由于水库多目标调度不存在所有目标都最优的情况,如何从众多非支配解中优选出符合决策者偏好的调度方案成为一个重要研究方向,被称为多属性决策^[11]。常用的水库调度多属性决策方法主要包括模糊集理论^[12-13]、层次分析法^[14-15]等主观评价方法,以及灰色关联分析法^[16]、TOPSIS 方法^[17]等客观分析方法。还有利用可视化方法定量分析 Pareto 前沿的几何关系来确定决策方案^[18-19]。但在真实的水库调度决策过程中往往存在主观风险偏好,会直接影响决策结果的可信性。累积前景理论(cumulative prospect theory, CPT)^[20]考虑决策者的风险偏好,将风险态度加入多目标决策过程,能获得更合理的决策结果,已成功应用于交通^[21]、物流^[22]、投资^[23]等领域。因此,本文尝试引入 CPT 刻画水库调度决策者面对收益和损失的风险态度,使决策过程更贴近实际情况。

水少沙多是黄河复杂难治的症结,梯级水库联合调度是减少黄河泥沙淤积、协调水沙关系的关键措施。目前黄河流域梯级水库多目标优化调度模型研究成果丰富。在调度目标上,防洪-发电调度^[24]、防洪-减淤调度^[25]、供水-生态调度^[26]、减淤-生态-发电调度^[27-28]等均取得显著进展;在梯级水库数量上,上游龙羊峡、刘家峡 2 库,中游万家寨、三门峡、小浪底 3 库,中下游三门峡、小浪底、故县、陆浑、河口村 5 库,以及全河龙羊峡、刘家峡、三门峡、小浪底 4 库等不同梯级水库组合的调度模型都有研究成果。但是,黄河梯级水库多目标优化调度依然面临以下挑战:①对流域行洪输沙、生态环境、社会经济多维调度需求考虑不足;②缺少全河梯级水库多目标优化调度模型;③难以有效量化决策者的风险偏好,决策方案不够符合真实情况。

本文考虑黄河流域行洪输沙、生态环境、社会经济多维调度需求,构建梯级水库水沙-生态-经济多目标优化调度模型。在求解优化调度模型获得

Pareto 解集后,利用改进的累积前景理论(modified cumulative prospect theory, MCPT)构建黄河梯级水库水沙-生态-经济多目标调度决策模型,并以干流龙羊峡、刘家峡、海勃湾、万家寨、三门峡、小浪底 6 座梯级水库联合调度为例对模型进行了验证。

1 模型构建

1.1 梯级水库水沙-生态-经济多目标调度模型

参考文献[28],在行洪输沙维度,调度目标为水库排沙量最大,在生态环境维度,调度目标为生态适宜流量满足率最大,在社会经济维度,调度目标为发电量最大,因此本文目标函数为水库排沙量最大、生态适宜流量满足率最大和发电量最大:

$$\max S = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T S_{lt} \quad (1)$$

$$\max E = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \frac{Q_{e,lt}}{Q_{s,lt}} \quad (Q_{e,lt} > Q_{s,lt}, Q_{e,lt} = Q_{s,lt}) \quad (2)$$

$$\max P = \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T K_l Q_{p,lt} H_{lt} \Delta t_p \quad (3)$$

式中: S 、 E 、 P 分别为水库排沙量、生态适宜流量满足率和发电量; S_{lt} 为第 l 个水库第 t 个时段的出库沙量; $Q_{s,lt}$ 为第 l 个水库下游河道在第 t 个时段的生态适宜流量, m^3/s ; $Q_{e,lt}$ 为第 l 个水库下游河道第 t 个时段的流量, m^3/s ; $Q_{p,lt}$ 为第 l 个水库第 t 个时段的发电流量, m^3/s ; H_{lt} 为第 l 个水库第 t 个时段的发电水头, m ; K_l 为第 l 个水库水电站的出力系数; Δt_p 为发电时长, s ; L 为水库数量, 个; T 为调度期, 共 36 旬。

约束条件主要包括水量平衡约束、出力约束、上下限水位约束、流量约束、期末水位约束等。

a. 水量平衡约束:

$$W_{lt+1} = W_{lt} + (Q_{i,lt} - Q_{o,lt} - Q_{w,lt}) \Delta t \quad (4)$$

式中: W_{lt} 为第 l 个水库第 t 个时段末的蓄水量, m^3 ; $Q_{i,lt}$ 为第 l 个水库第 t 个时段的平均入库流量, m^3/s ; $Q_{o,lt}$ 为第 l 个水库第 t 个时段的平均出库流量, m^3/s ; $Q_{w,lt}$ 为第 l 个水库第 t 个时段的供水流量, m^3/s ; Δt 为时段时长, s 。

b. 出力约束:

$$N_l \leq N_{in,l} \quad (5)$$

式中: N_l 为第 l 个水库的出力, kW ; $N_{in,l}$ 为第 l 个水库的装机容量, kW 。

c. 水位约束,包括汛限水位约束、凌汛水位约束:

$$Z_{\min, l} \leq Z_{lt} \leq Z_{\max, l} \quad (6)$$

式中: Z_{lt} 为第 l 个水库第 t 个时段末的水位, m ; $Z_{\min, l}$ 、 $Z_{\max, l}$ 分别为第 l 个水库第 t 个时段末的水位下限和上限, m 。

d. 流量约束, 包括汛期流量约束, 平滩流量约束, 生态基流约束:

$$Q_{\min, l} \leq Q_{o, l} \leq Q_{\max, l} \quad (7)$$

式中 $Q_{\min, l}$ 、 $Q_{\max, l}$ 分别为第 l 个水库/河段第 t 个时段的出库/出站流量下限和上限, m^3/s 。

e. 调度期末水位约束:

$$\begin{cases} W_{l0} = W_{lb} \\ W_{lT} = W_{le} \end{cases} \quad (8)$$

式中: W_{l0} 、 W_{lT} 分别为第 l 个水库的期初和期末蓄水量, m^3 ; W_{lb} 、 W_{le} 分别为第 l 个水库历史期初和期末蓄水量, m^3 。

由于 NSGA-III 算法具有收敛性强、非劣解分布均匀、处理高维问题强等优点, 本文采用该算法求解多目标优化调度模型获得 Pareto 解集。

1.2 基于 MCPT 的决策模型

1.2.1 CPT

CPT 能够描述决策者在不确定条件下影响选择行为的非理性心理变化, 并通过变形的累计概率体现决策者面对损失和收益时不同的风险态度, 更加符合决策者在决策过程中的实际心理^[20]。综合前景值 A 由价值函数 $v(x_{ij})$ 和概率权重函数 $w(p_j)$ 两部分组成。

1.2.2 MCPT

依据 TOPSIS 方法的思路, 最优方案应该是与正理想方案之间的距离最小, 且与负理想方案之间的距离最大。也就是说, 最优方案相对于正理想方案的综合前景损失值最小, 相对于负理想方案的综合前景收益值最大, 此为 MCPT。那么, 改进的综合前景值表达式为

$$M_i = \frac{|A_i^+|}{\max_{1 \leq i \leq m} |A_i^+|} - \frac{|A_i^-|}{\min_{1 \leq i \leq m} |A_i^-|} \quad (9)$$

式中: A_i^+ 为综合前景收益值, A_i^- 为综合前景损失值; M_i 为改进的综合前景值, 其值越大表示评价方案越接近正理想方案的同时距离负理想方案越远, 即评价方案越优。

1.2.3 决策模型计算步骤

步骤 1 建立决策矩阵。设水库多目标调度方案共有 m 个, 记为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$, 每个方案有 n 个属性的评价指标, 记为 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ 。第 i 个方案的 j 指标的属性值为 x_{ij} , 则评价特征值决策矩

阵为 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤 2 规范化决策矩阵。为了更好体现 CPT 中的收益与损失, 借鉴奖优罚劣的思想, 利用 $[-1, 1]$ 线性变换算子规范化决策矩阵。评价指标如果优于平均水平, 则赋予 $0 \sim 1$ 的正值; 反之, 则赋予 $-1 \sim 0$ 的负值。经变换后, 评价特征值决策矩阵转化为规范化决策矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

步骤 3 建立前景价值矩阵。由规范化决策矩阵容易求得正理想方案 B^+ 和负理想方案 B^- :

$$B^+ = \{r_1^+, r_2^+, \dots, r_n^+\} \quad (10)$$

$$B^- = \{r_1^-, r_2^-, \dots, r_n^-\} \quad (11)$$

其中

$$r_j^+ = \max \{r_{ij} \mid 1 \leq i \leq m\}$$

$$r_j^- = \min \{r_{ij} \mid 1 \leq i \leq m\}$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

将正理想方案与负理想方案作为参考点。由灰色关联分析法可知, 第 i 个方案与理想方案关于指标 I_j 的关联系数分别为 δ_{ij}^+ 和 δ_{ij}^- 。那么, 指标 I_j 的价值函数为

$$v(r_{ij}) = \begin{cases} a(1 - \delta_{ij}^-)^\gamma & \text{以负理想方案为参考点} \\ -b[-(\delta_{ij}^+ - 1)]^\lambda & \text{以正理想方案为参考点} \end{cases} \quad (12)$$

进一步地, 方案 S_i 关于指标 I_j 的正前景值为 $v^+(r_{ij}) = a(1 - \delta_{ij}^-)^\gamma$, 记为 v_{ij}^+ 。同理, 负前景值为 $v^-(r_{ij}) = -b[-(\delta_{ij}^+ - 1)]^\lambda$, 记为 v_{ij}^- 。那么, 评价方案的正负前景价值矩阵分别为 $(v_{ij}^+)_{m \times n}$ 和 $(v_{ij}^-)_{m \times n}$ 。

步骤 4 确定决策权重。首先, 根据评价特征值决策矩阵, 利用熵权法^[29]确定客观权重 $w_o = (w_{oj})_{1 \times n}$, 再利用层次分析法^[30]确定主观权重 $w_s = (w_{sj})_{1 \times n}$; 其次, 将客观权重与主观权重加权平均得到原始权重 $w = (w_o + w_s)/2$; 最后, 通过计算获得概率权重 $w^+(p_j)$ 和 $w^-(p_j)$, 即为决策权重。

步骤 5 计算改进的综合前景值。采用式(9)计算改进的综合前景值。评价方案的改进综合前景值越大, 表明该方案越优。本文选择改进综合前景值最大的方案作为决策方案。

1.3 灵敏度分析

采用灵敏度 θ 来比较几种决策方法的区分度和优越性, 其定义为

$$\theta = \left| \frac{E_{\max}^* - E_{\sec}^*}{E_{\max}^*} \right| \quad (13)$$

式中 $E_{\max}^*$ 、 $E_{\sec}^*$ 分别为所有方案评价中的第一大值和第二大值。决策方法的灵敏度越大, 表明区分度和评价效果越好。

2 实例验证

2.1 水库概况与数据来源

黄河是世界上泥沙含量最多的第七长河,水资源十分短缺。黄河梯级水库不仅承担着供水、防洪、排沙、生态等调度任务,也是协调水沙关系的重要途径。黄河干流目前已建成 32 座水库,有调蓄能力有龙羊峡、刘家峡、海勃湾、万家寨、三门峡和小浪底 6 座。在黄河流域生态保护和高质量发展的背景下,如何充分发挥梯级水库联合调度作用,协调水沙-生态-经济多目标冲突,提高水资源利用效率是亟待解决的问题。

本文以上述 6 座水库为研究对象,选择典型水文年(2020 丰水年,水文频率 11.1%;2022 平水年,水文频率 64.2%;2016 枯水年,水文频率 95.5%)开展旬尺度优化调度与决策分析。6 座水库的基本情况如表 1 所示。出库沙量采用经验公式计算得到,进出库流量数据、输沙率数据均来自黄河水利委员会官网,水文站流量数据(包括凌汛流量、平滩流量等)均来自黄河水文年鉴,供水数据来自黄河水资源公报。采用 Tennant 法^[31] 计算河道生态适宜流量,黄河上中游和下游的生态适宜流量见表 2。

表 1 水库基本情况

Table 1 The basic information about the reservoirs				
水库	正常蓄水位/m	汛限水位/m	满发流量/(m ³ /s)	装机容量/(万 kW·h)
龙羊峡	2 600	2 594	1 192	128
刘家峡	1 735	1 726	1 200	135
海勃湾	1 076	1 071.5	1 270	9
万家寨	977	966	1 800	108
三门峡	315	305	1 500	41
小浪底	275	248	1 776	180

表 2 生态适宜流量

Table 2 The suitable ecological flow		
月份	流量/(m ³ /s)	
	上中游	下游
1	368	825
2	368	825
3	368	825
4	664	967
5	664	967
6	664	967
7	1464	2770
8	1464	2770
9	1464	2770
10	1464	2770
11	368	825
12	368	825

2.2 多目标优化结果

采用 NSGA-III 算法求解调度模型,随机生成

500 个种群,迭代 2000 次,Pareto 前沿如图 1 所示。丰水年排沙量、生态适宜流量满足率和发电量最大,平水年次之,枯水年最差。三目标之间的相关系数如表 3 所示。排沙-生态的相关系数为负且绝对值较大,说明排沙与生态目标之间表现为一定的竞争性。排沙-发电的相关系数为负且绝对值接近 1,说明排沙和发电之间呈现较强的竞争性。生态-发电的相关系数为正,在丰水年存在微弱的协同性,而在平水年和枯水年呈现一定的协同性。就典型年而言,丰水年三目标之间竞争-协同关系不明显,而在枯水年三目标之间竞争-协同关系十分明显,说明来水对各目标间的竞争-协同关系影响较大。

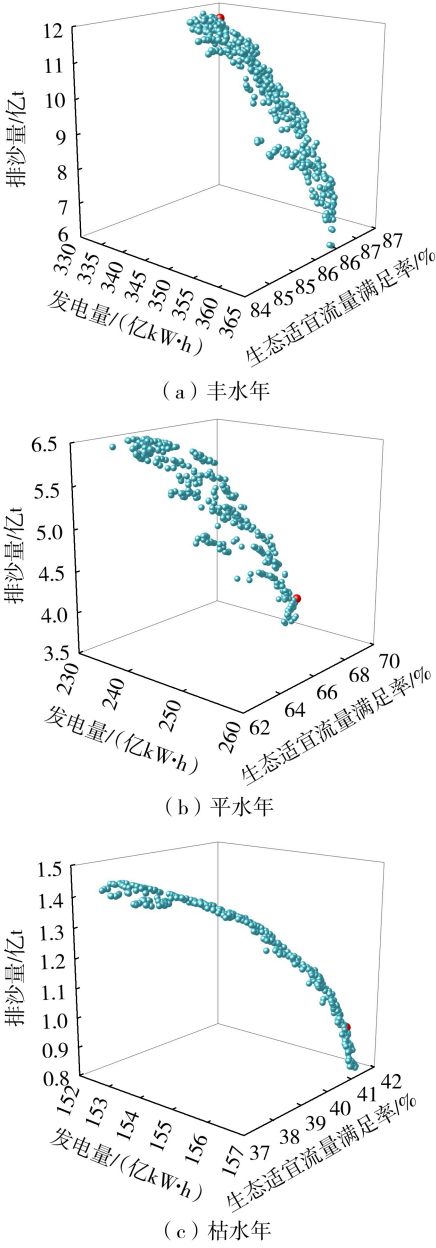


图 1 多目标优化调度模型的 Pareto 前沿
Fig. 1 The Pareto frontiers of the multi-objective optimization scheduling model

表 3 多目标间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between the objectives			
典型年	排沙-生态	排沙-发电	生态-发电
丰水年	-0.570	-0.786	0.075
平水年	-0.839	-0.954	0.699
枯水年	-0.958	-0.975	0.914

2.3 改进的综合前景值计算结果

各指标的权重计算结果如表 4 所示。丰水年排沙决策权重较大,生态与发电的决策权重相近。平水年三指标决策权重相近。枯水年发电决策权重最大,排沙次之,生态最小。说明梯级水库联合调度在丰水年偏重排沙,在枯水年偏重发电,这符合黄河水库真实调度情况。

表 4 权重计算结果

Table 4 Weight calculation results						
指标	丰水年		平水年		枯水年	
	原始权重	决策权重	原始权重	决策权重	原始权重	决策权重
排沙量	0.424	0.534	0.345	0.472	0.294	0.430
生态适宜流量满足率	0.275	0.413	0.340	0.469	0.271	0.410
发电量	0.301	0.436	0.315	0.448	0.435	0.542

改进的综合前景值计算结果如表 5 所示,丰、平、枯水年改进的综合前景值取值范围分别为-0.477~ -0.076、-1.029 ~ -0.115、-1.347~-0.196,丰水年改进的综合前景值取值范围小,且上下界均最大,平水年次之,枯水年最差,说明丰水年的优化调度方案集评价结果集中且较好。

表 5 改进的综合前景值计算结果

Table 5 Modified whole prospect value calculation results			
调度方案	丰水年	平水年	枯水年
S1	-0.270	-0.783	-0.289
S2	-0.176	-0.723	-1.012
⋮	⋮	⋮	⋮
S499	-0.302	-0.689	-0.301
S500	-0.178	-0.498	-0.893

2.4 决策方案

丰、平、枯水年改进的综合前景值最大取值分别为-0.076、-0.115、-0.196,对应的调度方案是S136、S98、S345,即为所选的决策方案。决策方案在 Pareto 前沿的位置如图 1 所示(图中红点)。在优化调度方案集中,丰水年决策方案偏重排沙,平水年与枯水年的决策方案均偏重发电。决策方案符合真实调度情况,在水多的时候,优先考虑排沙;在水少的时候,优先保证社会经济用水需求。

实际调度方案与决策方案的目标函数值如表 6 所示。相较于真实调度方案,平水年和枯水年的决策方案三目标值都有所提升,丰水年虽然发电量降

低 1.64%,但是排沙量增加 38.2%,生态适宜流量满足率增大 5.79%。因此,建议丰水年继续利用大流量过程持续水库排沙,恢复水库库容和冲刷下游河道,平水年和枯水年可参照决策方案进一步提高排沙量、生态适宜流量满足率和发电量。总之,通过构建全河梯级水库多目标优化调度模型,能实现黄河流域水沙、生态、经济多目标协同发展。

表 6 实际与决策调度方案目标函数值

Table 6 Real and decision-making scheduling scheme objective function values				
调度方案	典型年	排沙量/亿 t	生态适宜流量满足率/%	发电量/(亿 kW·h)
实际方案	丰水年	8.66	81.2	346.6
	平水年	3.58	64.9	241.2
	枯水年	0.89	37.7	154.5
决策方案	丰水年	11.97	85.9	340.9
	平水年	3.92	69.3	248.0
	枯水年	0.95	41.4	156.5

2.5 与其他决策方法对比

选择不同典型年改进的综合前景值取值最大的 5 个方案,采用 3 种常用的决策方法(灰色关联分析法、TOPSIS 方法、CPT)计算这些方案的排名,结果如表 7 所示。MCPT 与 3 种决策方法的排名结果都相同,这说明 MCPT 是可靠的。同时,较于其他决策方法,MCPT 的灵敏度都是最高的。例如在枯水年,灰色关联分析法、TOPSIS 方法和 CPT 的灵敏度分别是 0.003、0.001、0.079,而 MCPT 的灵敏度是 0.291,远高于常用方法。MCPT 在灵敏度有较大优势,适用于大量方案需要优选决策的情况。另外,MCPT 简单高效,不仅可以评价单个或多个水库等多空间尺度,还能应用于多时间尺度(如多年调度模型、典型年调度模型、场次洪水调度模型)的调度方案决策。

3 结 语

考虑黄河流域行洪输沙、生态环境、社会经济多维调度需求,构建梯级水库水沙-生态-经济多目标优化调度模型。在求解多目标调度模型获得 Pareto 解集后,引入 MCPT 构建决策模型优选调度方案,从而建立梯级水库多目标调度决策模型,不仅能平衡水沙-生态-经济多目标之间的冲突,还能量化决策者的风险偏好。以有调蓄能力有龙羊峡、刘家峡、海勃湾、万家寨、三门峡和小浪底 6 座为实例构建了全河梯级水库水沙-生态-经济多目标调度决策模型,检验了丰、平、枯水年多目标的协同竞争关系和决策方案。结果表明:①排沙与生态目标表现为一定的竞争性,排沙与发电目标表现为较强的竞争性,生态与发电目标表现为一定的协同性,且在枯水年三目

表 7 不同决策方法对比									
Table 7 Comparison of different decision-making methods									
典型年	调度方案	灰色关联分析法		TOPSIS 方法		CPT		MCPT	
		排名	敏感度	排名	敏感度	排名	敏感度	排名	敏感度
丰水年	S21	4		4		4		4	
	S76	5		5		5		5	
	S136	1	0.019	1	0.0002	1	0.103	1	0.395
	S137	3		3		3		3	
	S188	2		2		2		2	
平水年	S65	5		5		5		5	
	S98	1		1		1		1	
	S161	3	0.063	3	0.0011	3	0.036	3	0.209
	S227	4		4		4		4	
	S297	2		2		2		2	
枯水年	S75	5		5		5		5	
	S91	2		2		2		2	
	S113	3	0.003	3	0.0013	3	0.079	3	0.291
	S163	4		4		4		4	
	S345	1		1		1		1	

标间的竞争-协同关系明显;②丰、平、枯水年的决策调度方案分别是 S136、S98、S345,均符合真实调度情况,较于真实调度方案,三目标值均有不同程度提升;③较于常用决策方法,基于 MCPT 的决策方法灵敏性提高数倍,适用于大量方案需要优选决策的情况。

本文构建的模型还存在一些局限性,主要表现在两方面:一是典型年全河梯级水库多目标优化调度模型能提高流域水沙-生态-经济综合效益,但是对于减少黄河水库和河道的泥沙淤积依然不够。因此,今后将开展长系列年全河梯级水库多目标优化调度模型研究,以便充分发挥多年调节水库(龙羊峡)的潜力,进一步提高黄河梯级水库和下游河道排沙量。二是基于 MCPT 的决策模型能从众多调度方案集中确定决策方案,但是仅考虑了 Pareto 解集的 3 个指标,未来需要完善水沙-生态-经济评价指标体系,以便全面评估调度方案的优劣。

参考文献:

[1] WANG J, WALTER B A, YAO F, et al. GeoDAR: Georeferenced global dam and reservoir dataset for bridging attributes and geolocations [J]. Earth System Science Data Discussions, 2022, 14: 1869-1899.

[2] 钟加星,董增川,孟金玉,等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52 (6): 30-37. (ZHONG Jiaxing, DONG Zengchuan, MENG Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (6): 30-37. (in Chinese))

[3] 李继清,谢宇韬,孙凤玲. 基于 Vine Copula 的梯级水库

短期发电调度风险估计 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (4): 17-26. (LI Jiqing, XIE Yutao, SUN Fengling. Risk estimation of short-term power generation operation of cascade reservoirs based on Vine Copula [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (4): 17-26. (in Chinese))

[4] 周建中,李纯龙,陈芳,等. 面向航运和发电的三峡梯级汛期综合运用[J]. 水利学报, 2017, 48 (1): 31-40. (ZHOU Jianzhong, LI Chunlong, CHEN Fang, et al. Integrated utilization of the Three Gorges Cascade for navigation and power generation in flood season [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (1): 31-40. (in Chinese))

[5] 丁紫玉,方国华,毛莺池,等. 考虑发电与弃水风险的梯级水电站水库风险调度模型[J]. 水资源保护, 2024, 40 (2): 100-106. (DING Ziyu, FANG Guohua, MAO Yingchi, et al. Risk dispatching model of cascade hydropower station reservoirs considering power generation and water abandonment risks [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (2): 100-106. (in Chinese))

[6] 陈述,陈琼,任康,等. 考虑新能源消纳的黄河上游水电站群生态优化调度研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (3): 20-27. (CHEN Shu, CHEN Qiong, REN Kang, et al. Ecological optimal scheduling of hydropower stations on the upper Yellow River considering renewable energy accommodation [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (3): 20-27. (in Chinese))

[7] 张启凡,胡铁松,戴凌全,等. 考虑生态流量的梯级水库主从博弈优化调度研究[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5): 69-77. (ZHANG Qifan, HU Tiesong, DAI Lingquan, et al. Research on leader follower game optimal operation of cascade reservoirs considering ecological flow [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5): 69-77. (in Chinese))

- [8] BAI T, YU J, JIN W, et al. Multi-objective and multi-scheme research on water and sediment regulation potential of reservoirs in the upper Yellow River [J]. International Journal of Sediment Research, 2023, 38 (2) : 203-215.
- [9] CHEN L, GE L, WANG D, et al. Multi-objective water-sediment optimal operation of cascade reservoirs in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2022, 609 : 127744.
- [10] 彭少明, 尚文绣, 王煜, 等. 黄河上游梯级水库运行的生态影响研究 [J]. 水利学报, 2018, 49 (10) : 1187-1198. (PENG Shaoming, SHANG Wenxiu, WANG Yu, et al. Research on ecological impacts of the joint operation of cascade reservoirs in the upstream of the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (10) : 1187-1198. (in Chinese))
- [11] AGRAWAL A V, SONI M, KESHTA I, et al. A probability-based fuzzy algorithm for multi-attribute decision-analysis with application to aviation disaster decision-making [J]. Decision Analytics Journal, 2023, 8 : 100310.
- [12] 董增川, 陈牧风, 倪效宽, 等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (3) : 233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (3) : 233-240. (in Chinese))
- [13] 原彩萍, 刘原一, 职璐爽. 基于模糊集对法的山西省水资源脆弱性评价 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (5) : 112-116. (YUAN Caiping, LIU Yuanyi, ZHI Lushuang. Water resources vulnerability assessment in Shanxi Province based on fuzzy set pair method [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (5) : 112-116. (in Chinese))
- [14] 郭旭宁, 胡铁松, 曾祥, 等. 基于调度规则的水库群供水能力与风险分析 [J]. 水利学报, 2013, 44 (6) : 664-672. (GUO Xuning, HU Tiesong, ZENG Xiang, et al. The maximum water supply yield of the multi-reservoir system under the operating policy control with risk analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (6) : 664-672. (in Chinese))
- [15] 方国华, 李智超, 钟华昱, 等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (3) : 10-18. (FANG Guohua, LI Zhichao, ZHONG Huayu, et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (3) : 10-18. (in Chinese))
- [16] YANG Z, YANG K, WANG Y, et al. Multi-objective short-term hydropower generation operation for cascade reservoirs and stochastic decision making under multiple uncertainties [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276 : 122995.
- [17] 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))
- [18] LIU G, JIANG E, LI D, et al. Annual multi-objective optimization model and strategy for scheduling cascade reservoirs on the Yellow River mainstream [J]. Journal of Hydrology, 2025, 659 : 133306.
- [19] LI J, LI H, WANG Y, et al. Multi-objective synergy and competition relationship of water and sediment regulation of the Heishanxia reservoir in upstream of the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 56 : 102045.
- [20] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty [J]. Journal of Risk and uncertainty, 1992, 5 : 297-323.
- [21] 丁天贵, 谭衢霖, 王雪甜, 等. 基于云模型和累积前景理论的山区铁路绿色低碳线路优选 [J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21 (9) : 3822-3830. (DING Tianguai, TAN Qulin, WANG Xuetian, et al. Railway location optimization selection of green and low carbon railway in mountain areas based on cloud model and cumulative prospect theory [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21 (9) : 3822-3830. (in Chinese))
- [22] 张鹏, 石莎莎, 宁涛. 基于累积前景理论的物流配送干扰管理问题研究 [J]. 大连交通大学学报, 2021, 42 (4) : 94-100. (ZHANG Peng, SHI Shasha, NING Tao. Study on disruption management problem for logistics distribution based on cumulative prospect theory [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2021, 42 (4) : 94-100. (in Chinese))
- [23] 永贵, 田丽君, 李鹏博. 异质用户和内生市场渗透率下的自动驾驶收益: 基于累积前景理论的方法 [J]. 系统科学与数学, 2023, 43 (9) : 2328-2340. (YONG Gui, TIAN Lijun, LI Pengbo. The benefits for autonomous driving with heterogeneous users and endogenous market penetration—based approach of a cumulative prospect theory [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2023, 43 (9) : 2328-2340. (in Chinese))
- [24] WANG Y, TANG F, JIANG E, et al. Optimizing hydropower generation and sediment transport in Yellow River basin via cooperative game theory [J]. Journal of Hydrology, 2022, 614 : 128581.

(下转第 230 页)

- 学,2023,44(5):2735-2745. (LI Wenqi, XIANG Qi, XIE Xuefeng, et al. Effect of *spartina alterniflora* invasion on soil C:N:P stoichiometry in coastal wetland of Hangzhou Bay [J]. Environmental Science, 2023, 44 (5) : 2735-2745. (in Chinese))
- [30] MAZIRIRI E T, MADINGA N W. Data to model the prognosticators of luxury consumption: a partial least squares-structural equation modelling approach (PLS-SEM) [J]. Data in Brief, 2018, 21: 753-757.
- [31] VINZI V E, TRINCHERA L, AMATO S. Handbook of partial least squares: concepts, methods and applications [M]. Berlin: Springer Verlag, 2009.
- [32] SONG M, JEONG J, KUMI L, et al. Analysis of the effect of outdoor thermal comfort on construction accidents by subcontractor types [J]. Sustainability, 2024, 16 (12) : 4906.
- [33] LÓPEZ J, FRANCÉS F. Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir indices as external covariates [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(8): 3189-3203.
- [34] SU Yongxian, CHEN Xiuzhi, LI Yong, et al. China's 19-year city-level carbon emissions of energy consumptions, driving forces and regionalized mitigation guidelines [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 35: 231-243.
- [35] 毕彩霞, 穆兴民, 赵广举, 等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2013, 11 (2) : 33-38. (BI Caixia, MU Xingmin, ZHAO Guangju, et al. Effects of climate change and human activity on streamflow in the Wei River Basin [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(2): 33-38. (in Chinese))
- [36] 王国庆, 张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望 [J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 1-8. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 1-8. (in Chinese))
- [37] 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 等. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51 (7) : 1080-1091. (ZHANG Baoqing, TIAN Lei, ZHAO Xining, et al. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the Loess Plateau in China [J]. Scientia Sinica Terrae, 2021, 51 (7) : 1080-1091. (in Chinese))
- [38] JI Lin, DUAN Keqin. What is the main driving force of hydrological cycle variations in the semiarid and semi-humid Weihe River Basin, China? [J]. Science of The Total Environment, 2019, 684: 254-264.

(收稿日期: 2025-03-03 编辑: 王芳)

(上接第 179 页)

- [25] 陈建国, 周文浩, 孙高虎. 论黄河小浪底水库拦沙后期的运用及水沙调控 [J]. 泥沙研究, 2016 (4) : 1-8. (CHEN Jianguo, ZHOU Wenhao, SUN Gaohu. Studies on operation scheme and water-sediment regulation of Xiaolangdi reservoir [J]. Journal of Sediment Research, 2016(4): 1-8. (in Chinese))
- [26] 郜国明, 李新杰, 马迎平. 小浪底水库生态调度的内涵、目标及措施 [J]. 人民黄河, 2014, 36(9): 76-79. (GAO Guoming, LI Xinjie, MA Yingping. Research on ecological scheduling of Xiaolangdi reservoir [J]. Yellow River, 2014, 36(9): 76-79. (in Chinese))
- [27] 陈秀秀, 叶盛, 洪艳艳, 等. 黄河骨干水库水沙调度的目标函数构建和应用 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(3): 727-739. (CHEN Xiuxiu, YE Sheng, HONG Yanyan, et al. The construction and application of objective function for water and sediment operation of major reservoirs in the Yellow River [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3): 727-739. (in Chinese))
- [28] 李洁玉, 李航, 王远见, 等. 黄河水沙调控多目标协同模型构建及应用 [J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 708-718. (LI Jieyu, LI Hang, WANG Yuanjian, et al. Construction and application of a multi-objective collaborative model of water and sediment regulation in the Yellow River [J]. Advances in Water Science, 2023, 34 (5) : 708-718. (in Chinese))
- [29] 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))
- [30] 杨卓媛, 黄宇云, 夏函, 等. 水利新质生产力评价方法及应用 [J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 92-98. (YANG Zhuoyuan, HUANG Yuyun, XIA Han, et al. Evaluation method and application of new quality productive forces of water conservancy [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 92-98. (in Chinese))
- [31] 黄冬菁, 李一平, 崔广柏, 等. 基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法 [J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 142-148. (HUANG Dongjing, LI Yiping, CUI Guangbo, et al. Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1) : 142-148. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-04-01 编辑: 彭桃英)