

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0103

王何予, 田晶, 郭生练, 等. 考虑水文改变生态指标的丹江口水库多目标优化调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1041-1051. WANG H Y, TIAN J, GUO S L, et al. Multi-objective optimal operation for Danjiangkou Reservoir considering ecological indicators of hydrologic alteration[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1041-1051. (in Chinese)

考虑水文改变生态指标的丹江口水库多目标优化调度

王何予, 田晶, 郭生练, 王俊, 钟斯睿

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 对水文改变指标进行分类、筛选并赋权, 构建流量等级和流量波动 2 个生态指标; 使用高斯径向基函数拟合水库调度规则, 以供水量、发电量和水文改变生态指标为目标函数, 在丹江口水库开展多目标优化调度研究; 分析供水、发电与生态效益各指标间的竞争关系, 寻求社会经济和生态效益均较佳的调度方案, 论证生态流量的合理性。结果表明: 丹江口水库调度的供水、发电和生态效益之间存在目标冲突; 同时考虑供水、发电、流量等级、流量波动 4 个目标的推荐方案, 可在确保防洪安全并维持供水和发电量不变的前提下, 保证流量等级和流量波动水文改变生态指标与天然状态相近; 推荐方案尽可能达到适宜生态流量, 满足了汉江中下游水生生物自然繁衍需求。研究成果可为丹江口水库优化调度以及汉江中下游水生态环境保护提供参考。

关键词: 水文改变指标; 生态流量; 多目标; 优化调度; 丹江口水库

中图分类号: TV697 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



水库建设运行改变了原有的水文情势并影响水生生物繁衍生息。水库调度运行在满足防洪、发电等功能需求的前提下, 还应考虑河流生态保护, 实现自然和谐可持续发展^[1-2]。

水库调度运行中经济和生态双重效益的研究共有两大类^[3]。一类是将生态数据作为约束, 在满足生态约束的前提下实现经济效益最大化。如使用水文学方法或水力学方法^[4]等确定最大和最小生态流量, 将其作为水库下泄流量大小的约束^[5]。另一类比较常见于生态调度研究中, 将生态指标量化作为多目标调度模型的目标之一。Tsai 等^[6]提出了一种基于人工智能技术的新型混合方法, 用于量化河道生态系统需求, 并通过优化水库运行模式, 维持某水库河流和漫滩生态。谢雨祚等^[7]将生态流量缺额最小作为发电量最大以外的另一目标函数, 在清

江梯级水库进行生态调度研究。林梦然等^[8]在嘉陵江水库群构建发电较大和适宜生态溢缺水量较小的优化调度方案, 并采用模糊优选法找到生态与发电效益的平衡点。水库调度双重效益研究能够生成多种优化调度方案, 并通过比较生态指标大小寻求较优模式。然而大多数生态指标的确定都是考虑单一的目标如生态流量缺额等^[6-8], 但生态需求不只体现在流量量级上。生态需水目标的构建与确定有较多方法。Yang 等^[9]在长江中游的 6 座水电站中使用层次模型, 将流量、热力参数、水质及其复杂的相互影响结合起来, 发现应及时放水促进鱼类性腺发育。Li 等^[10]建立了梯级水库联合水量调度模型和耦合水轮发电机运行工况的坝下河流水力模型, 应用于三峡大坝和葛洲坝梯级水库, 有效扩大中华鲟的综合适宜空间。然而, 由于水生物对

收稿日期: 2022-03-30 修回日期: 2022-08-18 网络出版时间: 2022-11-07

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221107.1456.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U20A20317)

作者简介: 王何予(1997—), 女, 辽宁锦州人, 主要从事水库生态调度研究。E-mail: heyuwang@whu.edu.cn

通信作者: 郭生练(1957—), 男, 福建龙岩人, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: slguo@whu.edu.cn

水库出流量的生态响应可能出现时间滞后的情况,并且实验对其效果的捕捉十分微观,无法准确控制水库操作^[11]。确定上述生态目标需要大量的实验和实测数据,成果仅适用于特定流域、保护特定生物^[10]。Bunn 等^[12]认为水流状态的改变是对河流及其相关漫滩湿地生态可持续性的最严重和持续的威胁,维持纵向和横向连接的天然状态对河流生态至关重要。水文改变指标(indicator of hydrologic alteration, IHA)是由 Richter 等^[13]于 1996 年提出用于描述平均流量、极限流量、时刻、频率、变化率的指标。IHA 指标可以完整全面地描述水文情势,普适性高,已广泛应用于分析各类河流水文情势变化^[14-15]。分析水文情势的变化过程并构造生态流量阈值可用于判断河流水文健康^[16-17]。研究者开始将 IHA 指标引入作为水库运行的目标,重建天然流量状态。Wang 等^[3]选择 IHA 指标中的月均流量和极值流量共 6 个指标,计算各指标与其理想范围的差距,并将差距进行线性组合作为生态指标加入 Philpott 大坝的运行调度中。Li 等^[18]将 33 个 IHA 指标通过 PCA 方法筛选,并将其加权为综合生态指数。Yan 等^[19]基于 IHA 提出流量等级指标及流量波动指标,并将两生态指标纳入刘家坪水电站水库调度模型中寻求发电和生态兼顾的最优策略。

现有水库生态调度相关研究主要考虑发电和生态两个目标,且生态目标采用单一的指标^[6-8]。如何考虑不同的生态需求以及引调水水库运行对下游生态环境的影响,尚待研究讨论。本文基于 IHA 选择能够反映下游生态需水流量和波动的水文改变生态指标,构建兼顾供水量、发电量、流量等级和流量波动 4 个目标函数,开展丹江口水库多目标优化调度研究,在确保防洪和供水安全的前提下,寻求“防洪-供水-生态-发电”相协调的优化方案,减少对汉江中下游生态环境造成的负面影响。

1 研究区域概况

1.1 丹江口水库

丹江口水库调度按照兴利服从防洪、区域服从流域、电调服从水调的原则,统筹上下游、左右岸、干支流,充分发挥水电工程的综合效益。南水北调中线工程从陶岔渠首引水,其设计流量 350 m³/s、加大流量 420 m³/s,一期设计年调水量 95 亿 m³。清泉沟渠首年供水 13.98 亿 m³,包括襄阳市的引丹工程(6.28 亿 m³)和鄂北水资源配置工程(7.7 亿 m³)两部

分,清泉沟隧洞渠首最大过流能力为 100 m³/s。

1.2 现有丹江口水库优化调度方案

按照水利部关于丹江口水库优化调度及生态调度方案规定^[20],在提高水资源利用率并兼顾通航要求的同时,满足最小下泄流量的要求,库水位位于降低供水区且低于 150 m 时:若来水大于 350 m³/s,汉江中下游流量不小于 490 m³/s;若来水小于 350 m³/s,汉江中下游流量不小于 400 m³/s。四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼)和长春鳊等是汉江中下游具有较大经济价值的鱼类^[21],其稳定生长繁殖标志着生态系统的稳定^[22]。汉江中下游流量大小和脉冲波动情况是鱼类繁殖的重要条件之一。本文立足全年逐月生态指标的构建,以鱼类栖息繁殖期流量是否满足 Tennant 法^[23]产卵育肥划分期的需水量加以验证。

2 生态指标构建

IHA 共 33 个,划分为 5 组^[13]。1 组中的指标为月尺度,2 至 5 组的指标为日尺度,大尺度参数反映的是量级的信息,小尺度参数反映的是波动信息。满足河流生态流量需求应考虑两个方面,即流量量级和流量波动。依照定义将 IHA 分类、赋权、筛选并组合归纳为两类新指标^[19]:保证流量序列量级的流量等级指标(water quantity level, WQL);控制各水文参数在可接受范围内波动的流量波动指标(hydrological alteration, HA)。基于 IHA 选择的 WQL 与 HA 水文改变生态指标,能有效反映河流生态需求信息。IHA 虽然可以全面描述水文情势,但指标过多存在潜在冗余^[24],将所有的 IHA 作为生态调度目标会造成“维数灾”。由于 IHA 之间存在相互关联和影响,可采用 PCA、CRITIC 等方法提取 IHA 中的“主要参数”^[3, 18-19]。指标赋权和筛选方法较多,其目标均是形成尽可能少的变量,且使这些变量尽可能保持原有的信息^[25]。本文选用的“熵权赋权法”比较客观,已经广泛应用于水质、环境等涉及多指标生态评价^[26-27]。计算流量等级指标 WQL 及流量波动指标 HA 都是与天然状态下(未经历建库等人为扰动)的流量进行比较。

2.1 流量等级指标

WQL 涵盖 1—12 月各月平均流量,各月流量可依据 Tennant 法^[23]分为 8 个等级进行赋值评分。依据水生生物的季节性需求, Tennant 法将用水期划分为鱼类产卵育肥期(4—9 月)和一般用水期(10—次年 3 月)。使用模糊综合评价方法^[28]评估各月流

量隶属于各等级情况。

基于 Tennant 法推荐的基流标准,将不同用水期的流量具体化并分级为 8 个等级^[19]。依据 Tennant 法的分级数值可知:1 至 6 级为等级越高,流量越大,生态状况越好;7 至 8 级由于流量超过

Tennant 法规定的最佳值,等级越高生态状况越差。赋值的范围为 1~6 分,生态状况越好分值越高。分级及赋值情况见表 1。模糊综合评价隶属度函数选择各等级范围的中间值为界定,构建等级界定判断矩阵见式(1)。

表 1 不同用水期的流量分级及赋值

Tab. 1 Flow discharge grade and value for different water use periods

用水期流量	等级							
	极差	差	中	良好	极好	最佳	超出最佳	极限
一般用水期	$< 0.1\bar{x}$	$\geq 0.1\bar{x} \sim < 0.2\bar{x}$	$\geq 0.2\bar{x} \sim < 0.3\bar{x}$	$\geq 0.3\bar{x} \sim < 0.4\bar{x}$	$\geq 0.4\bar{x} \sim < 0.6\bar{x}$	$\geq 0.6\bar{x} \sim < \bar{x}$	$\geq \bar{x} \sim < 2\bar{x}$	$\geq 2\bar{x}$
产卵育肥期	$< 0.1\bar{x}$	$\geq 0.1\bar{x} \sim < 0.3\bar{x}$	$\geq 0.3\bar{x} \sim < 0.4\bar{x}$	$\geq 0.4\bar{x} \sim < 0.5\bar{x}$	$\geq 0.5\bar{x} \sim < 0.6\bar{x}$	$\geq 0.6\bar{x} \sim < \bar{x}$	$\geq \bar{x} \sim < 2\bar{x}$	$\geq 2\bar{x}$
赋值	1	2	3	4	5	6	5	1

注: \bar{x} 为各用水期天然状态下多年平均月流量。

$$\begin{aligned}
 Y_{dry} &= [0.1\bar{x} \quad 0.15\bar{x} \quad 0.25\bar{x} \quad 0.35\bar{x} \quad 0.5\bar{x} \quad 0.8\bar{x} \quad 1.5\bar{x} \quad 2\bar{x}] \\
 Y_{flood} &= [0.1\bar{x} \quad 0.2\bar{x} \quad 0.35\bar{x} \quad 0.45\bar{x} \quad 0.55\bar{x} \quad 0.8\bar{x} \quad 1.5\bar{x} \quad 2\bar{x}] ; Y = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \cdots & y_{1,8} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & \cdots & y_{2,8} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{12,1} & y_{12,2} & \cdots & y_{12,8} \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中: y_{ij} 为第 i 个月的第 j 等级界定值(当 $i=1\sim 3$ 或 $10\sim 12$ 时, $y_i=Y_{dry}$; $i=4\sim 9$ 时, $y_i=Y_{flood}$); Y_{dry} 和 Y_{flood} 分别为一般用水期(dry)和产卵育肥期(flood)的等级界定向量。

隶属度函数选择较为简单实用的“半梯形分布”方法,计算得到 1 至 12 月对应 1 至 8 等级的隶属度矩阵 $L_{12 \times 8}$; 采用熵值法^[29] 计算得到 12 个月均流量权重 $W_{1 \times 12}$; 各等级赋值构成 $K_{8 \times 1}$ 。WQL 指标值(I_{WQL}) 计算见式(2)。由表 1 赋值可推得 $WQL \in [1, 6]$, 其值越大, 流量等级越高, 生态效益越好。

$$I_{WQL} = W \times L \times K \quad (2)$$

2.2 流量波动指标

HA 反映了流量的日尺度变化。IHA 中日尺度指标共有 21 个, 用熵值法对指标筛选精简并得到其权重。日尺度指标依据 IHA 分类为第 2 至 5 组, 考虑到第 2 组包含的信息较多, 且描述最大和最小 2 种极端流量, 所以在第 2 组中筛选出 2 个熵权值最大的指标, 第 3 至 5 组中各筛选出一个熵权值最大的指标。设共筛选出 b 个指标, 指标变化情况 & HA 值(I_{HA}) 计算见式(3), I_{HA} 值越小, 表明“水文情势变化后的流量波动”相较于“天然流量波动”的

差距越小, 水生物更能适应, 生态效益越好。根据定义, 当 I_{HA} 等于 0 时, 流量波动情况与天然波动状况完全吻合, 其生态效果达到最优。

$$\xi_s = \frac{|z'_s - \bar{z}_s|}{\bar{z}_s} \quad (s=1, 2, \dots, b); I_{HA} = \sum_{s=1}^b w_s \times \xi_s \times 100\% \quad (3)$$

式中: ξ_s 为第 s 个指标的变化幅度; \bar{z}_s 为天然流量下第 s 个指标的多年平均值; z'_s 为第 s 个指标的多年平均值; w_s 是第 s 个指标所占权重。

2.3 生态指标权重

天然流量指未受到人类活动(主要是水工程建设)影响的河川径流。汉江流域丹江口水库在 1967 年蓄水, 2014 年底南水北调中线工程通水, 选择还原后的黄家港水文站 1954—2020 年日均流量系列为天然流量。1954—1966 年丹江口水库还未建库, 黄家港水文站的实测资料即为天然流量。1967 年及以后的入库流量依据水量平衡方法进行还原计算得到, 所有流量数据由长江水利委员会水文汉江局提供。

使用熵权法并考虑数据合理性, 分析得到各指标及权重见表 2 和表 3。

表 2 流量等级指标权重

Tab. 2 Weight of water quantity level indicator

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
月均流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	360	320	511	912	1235	1265	2395	2029	2367	1650	739	448
指标权重	0.064	0.042	0.062	0.086	0.067	0.083	0.096	0.101	0.117	0.139	0.082	0.061

表 3 流量波动指标筛选及权重

Tab. 3 Screening and weighting of hydrological alteration indicator

筛选组别	提取指标	数值	熵权	权重
第2组	最小1日流量/(m ³ ·s ⁻¹)	101	0.069	0.217
	最大7日流量/(m ³ ·s ⁻¹)	51 554	0.063	0.196
第3组	最小流量出现时间/d	135	0.106	0.331
第4组	流量增加率	63	0.050	0.158
第5组	高流量脉冲次数/次	9	0.031	0.098

注：“权重”指归一化后的“熵权”大小。

3 丹江口水库多目标调度模型

3.1 调度模型构建

南水北调陶岔渠首与鄂北调水清泉沟渠首的调水量,统称为供水量,依照供水调度图供水。调走水量不参与发电。水库下泄流量包括汛期泄洪和发电流量。采用高斯径向基函数拟合水库调度规则^[30-31]。考虑到影响水库调度运行的因素包括入库流量、时段信息和水库当前蓄水量,设定径向基函数的决策因子为 Q_t 、 t 、 V_t 。采用 4 个径向基函数描述调度规则,每个径向基函数有 5 个参数 $c_{1,u}$ 、 $c_{2,u}$ 、 $c_{3,u}$ 、 b_u 、 w_u ,共有 20 个参数需要确定^[32]。

$$Q_{t, out} = \sum_{u=1}^U w_u \varphi_u(X_t) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad 0 \leq w_u \leq 1 \quad (4)$$

$$\varphi_u(X_t) = \exp \left[- \sum_{j=1}^M \frac{((X_t)_j - c_{j,u})^2}{b_u^2} \right] \quad c_{j,u} \in [-1, 1] \quad b_u \in (0, 1) \quad (5)$$

式中: U 为径向基函数个数,本研究为 4 个; w_u 为各径向基函数权重; φ_u 为第 u 个径向基函数; $(X_t)_j$ 为归一化后第 j 个决策因子状态值; M 为决策因子的个数,本研究为 3 个; c 、 b 为高斯径向基函数的参数。

丹江口水库具有防洪、供水、发电等功能,考虑生态指标后,共涉及 4 个目标函数,计算公式为

$$W(T) = \max \sum_{t=1}^T [Q_{S,t} M_t K_t] \quad (6)$$

$$E(T) = \max \sum_{t=1}^T (P_t M_t) = \max \sum_{t=1}^T (K Q_{P,t} H_t M_t);$$

$$Q_{P,t} = I_t - Q_{S,t} - S_t$$

$$I_{WQL}(T) = \max(I_{WQL}); \quad I_{HA}(T) = \min(I_{HA})$$

式中: $W(T)$ 、 $E(T)$ 、 $I_{WQL}(T)$ 和 $I_{HA}(T)$ 分别为计划调度时长 T 内的供水量, m³、发电量, kW·h、流量等级指标和流量波动指标; $Q_{S,t}$ 、 P_t 分别为 t 时段平均供水

流量, m³/s 和平均出力, kW; M_t 为 t 时段内的时间间隔, h; K_t 为时间转换系数, 等于 3 600 s/h; K 为电站综合出力系数; $Q_{P,t}$ 为 t 时段的发电流量, m³/s; H_t 为 t 时段的平均发电净水头, m; I_t 和 S_t 分别为 t 时段的入库流量和泄流弃水量, m³/s。

式(7)表示优化调度过程中的约束条件,包括汛期运行水位、水位消落、水量平衡、水库蓄水量、水库下泄流量、电站出力约束和过流能力限制等。

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_{S,t} - Q_{P,t} - S_t) \Delta t \quad (7)$$

$$V_{t, \min} \leq V_t \leq V_{t, \max}; \quad Q_{t, \min} \leq Q_t \leq Q_{t, \max};$$

$$P_{t, \min} \leq P_t \leq P_{t, \max} \quad \forall t \in T$$

$$Q_{t, \text{tc}} \leq Q_{\max, \text{tc}}; \quad Q_{t, \text{qqg}} \leq Q_{\max, \text{qqg}}; \quad Z_{S,t} \leq Z_{S,m}$$

式中: V_t 、 V_{t+1} 为 t 时段初和时段末的水库蓄水量, m³; $V_{t, \max}$ 、 $Q_{t, \max}$ 、 $P_{t, \max}$ 、 $Q_{\max, \text{tc}}$ 、 $Q_{\max, \text{qqg}}$ 分别为 t 时段保证的水库最大蓄水量, m³、最大允许下泄流量, m³/s、水电站最大出力, kW、陶岔渠首的最大供水流量, m³/s、清泉沟渠首的最大供水流量, m³/s; $Z_{S,m}$ 为丹江口水库汛期允许的最高水位, m; 最小约束同理。

3.2 优化方案构建

丹江口水库调度在满足防洪任务的同时,考虑全年的供水、发电效益,水文改变生态指标 WQL 和 HA 共 4 个目标。为了对比不同目标组合下生态和经济效益的优化情况,寻求各指标之间的响应关系,验证两个生态目标的必要性,将目标分解为方案 A~D 见表 4。方案 A 为现有调度,或传统优化调度即供水和发电双目标优化^[32-33]; 方案 B~D 在现有调度方案基础上考虑水文改变生态指标 WQL 和 HA。

4 结果分析

4.1 不同方案 Pareto 前沿

选择 2015—2020 年丹江口水库日入库流量系列资料,采用 NSGA-II 优化算法求解,设置每一代

种群数为 200, 进化代数为 1000 代, 进行丹江口水库多目标优化调度。寻找使水位过程线合理并满足 4 个目标相协调的最优调度函数。A~D 这 4 种

优化调度方案下 Pareto 最优前沿见图 1, 图中优化调度解集分布较广、趋势明显, 能够很好地反映出供水、发电及两个生态指标之间的竞争协调关系。

表 4 丹江口水库多目标生态调度方案

Tab. 4 Multi-objective ecological operation schemes of Danjiangkou Reservoir

调度方案	目标函数
现有方案A	丹江口水库优化调度及生态调度方案 ^[20] (供水、发电效益较大)
优化方案B	供水、发电效益较大, 水文改变生态指标WQL较大
优化方案C	供水、发电效益较大, 水文改变生态指标HA较小
优化方案D	供水、发电效益较大, 水文改变生态指标WQL较大、HA较小

注: “供水效益”指陶岔渠首及清泉沟渠首的总调水量。

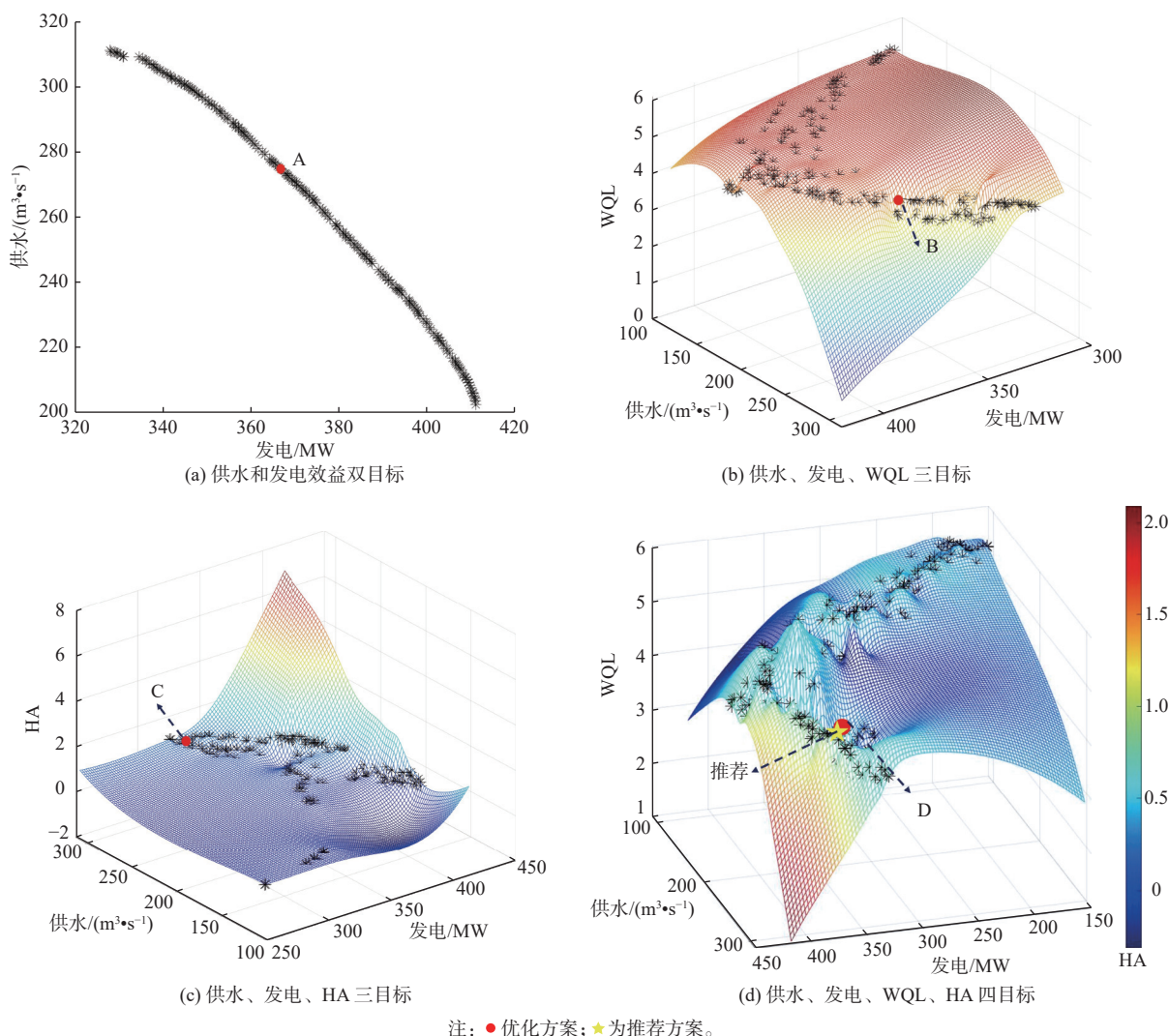


图 1 丹江口水库不同方案多目标优化调度结果

Fig. 1 Multi-objective optimal operation results of Danjiangkou Reservoir with different schemes

图 1(a)为供水和发电两目标, 丹江口水库“电调服从水调”, 优先满足供水需求, 调走水量不参与发电, 所以供水与发电目标冲突, 供水量越多发电量越少。图 1(b)中供水与流量等级 WQL 呈负相关关系。下泄流量兼顾发电与生态效益, 下泄流量大

则发电量大, 流量等级 WQL 会增加。决定 WQL 大小的是下泄流量等级与天然流量的差距, 水库发电和蓄洪补枯等功能使得下泄流量量级会与天然状态出现较大差距, WQL 也会随发电量增加而出现降低情况。图 1(c)的分布表明供水及发电的增加会

导致 HA 指标逐渐变大。流量波动指标 HA 反映日尺度的流量波动与天然波动的差异,调水及发电使得流量极值、脉冲及变化率都较天然状态出现显著改变。图 1(d)结果表明:生态指标 WQL 越大则 HA 越小;供水量与生态指标冲突;发电量与 HA 存在冲突,但与 WQL 为协同关系。

4.2 优化方案比较分析

丹江口水库调度供水优先发电,加入水文改变生态指标的目标函数后,供水量和发电量会受到影

响,需要在 Pareto 最优解集中寻求最佳解。根据丹江口水库调度原则:电调服从水调,当供水和发电效益明显冲突时,应在 Pareto 前沿中寻找供水量满足需求且发电量也较好的综合效益点。经比较分析后,选择了图 1(a)中红色标注的 A 点。B~D 方案的选择同理。在各 Pareto 前沿中寻找最佳点见图 1 标注,并计算 A~D 每种方案下的各指标值,以调度方案 A 为基准对比分析各方案的调度结果,见表 5。

表 5 丹江口水库不同调度方案多目标优化结果

Tab. 5 Multi-objective optimization results of Danjiangkou Reservoir with different operation schemes

调度方案	年均供水量/亿m ³	年均发电量/亿kW·h	水文改变生态指标WQL	水文改变生态指标HA/%
现有方案A	86.61	32.25	4.29	96.98
优化方案B	83.76(-3.29%)	32.58(+1.02%)	4.68(+9.09%)	117.92(+21.59%)
优化方案C	94.40(+8.99%)	29.27(-9.23%)	4.38(+2.10%)	80.66(-16.83%)
优化方案D	86.35(-0.30%)	31.60(-2.01%)	4.52(+5.36%)	94.74(-2.31%)
推荐方案	87.14(+0.61%)	32.19(-0.18%)	4.43(+3.26%)	95.96(-1.05%)

注:“()”内为各方案与现有方案A比较。

分析方案 A、B、C、D 的结果表明:现有方案 A 的供水、发电效益均较好,但是生态指标 WQL 太小,HA 较大,这会导致中下游水量不够,波动相较天然波动的改变明显,不利于下游水生态健康。优化方案 B 以流量等级 WQL 为生态目标,与现有调度方案 A 相比,损失 3.29% 的供水量使 WQL 提高了 9.09%,但未考虑到 HA 过大的影响。方案 C 的供水量和生态指标都很好,但年均发电量过小。同时,HA 极小会让水位波动过于接近天然来水的波动,不能实现水库蓄洪补枯的功能,无法应对汛期较大的入库流量,流量过程线不合理甚至出现极大的人造洪峰现象。方案 B 和方案 C 的结果证明,若只考虑一种生态指标会导致另一个生态指标恶化严重,所以需同时考虑两个水文改变生态指标。方案 D 的供水量与原调度方案 A 的供水量几乎相同,发电量有 2.01% 的略微减少,两个水文改变生态指标都比方案 A 有进一步优化,流量等级 WQL 提升了 5.36%,流量波动差异 HA 减少了 2.31%。

方案 D 虽然可以有效地同时改善两生态指标,但是损失了一部分经济效益。进一步,从方案 D 的 Pareto 前沿中,继续寻找供水和发电效益与现有方案 A 相同且水文改变生态指标改进的点作为推荐方案。图 1(d)黄色标注点为“防洪-供水-生态-发电”相协调的推荐方案,其流量等级指标 WQL 提高 3.26%、流量波动差异 HA 降低 1.05%,且水位及流

量过程线合理。因此,采用该方案对应的径向基调度函数,可用于指导丹江口水库优化调度运行,实现“防洪-供水-生态-发电”相协调的目标。

4.3 典型年调度结果比较

选取典型年份,对比现有调度方案及推荐方案水位流量过程线见图 2,可以看到水位周期调节规律较为明显,严格受蓄水位及防洪限制水位的约束。对比下泄流量得出以下结论:根据调度规则,若保证供水量较大需要维持下一时段的较高库水位,同时下泄流量减少。推荐调度方案在偏丰年(2017 年)增加供水量,减少下泄流量;在来水较枯年份(2015 年)尽量加大下泄流量维持生态需要;在水位较高时首要满足防洪需求(2018 年)。推荐调度方案相比现有调度方案在洪峰流量上有削减,汛期下泄流量较小,非汛期下泄流量稍显提高。这样能够保证年供水量基本不变,而在非汛期流量量级提高以供水生动植物繁衍。推荐调度方案的流量波动情况更加符合天然状态,如 2015 年 3—6 月现有优化调度方案仅按照约束保证 490 m³/s 的下泄流量,流量过程线几乎为直线;而推荐调度方案保留了下泄流量随天然流量的适当波动。

综合评估推荐方案的下泄流量的量级和波动情况与天然状态差距较小,降低了水文变异程度,能有效保护和改善汉江中下游的水生态状况。

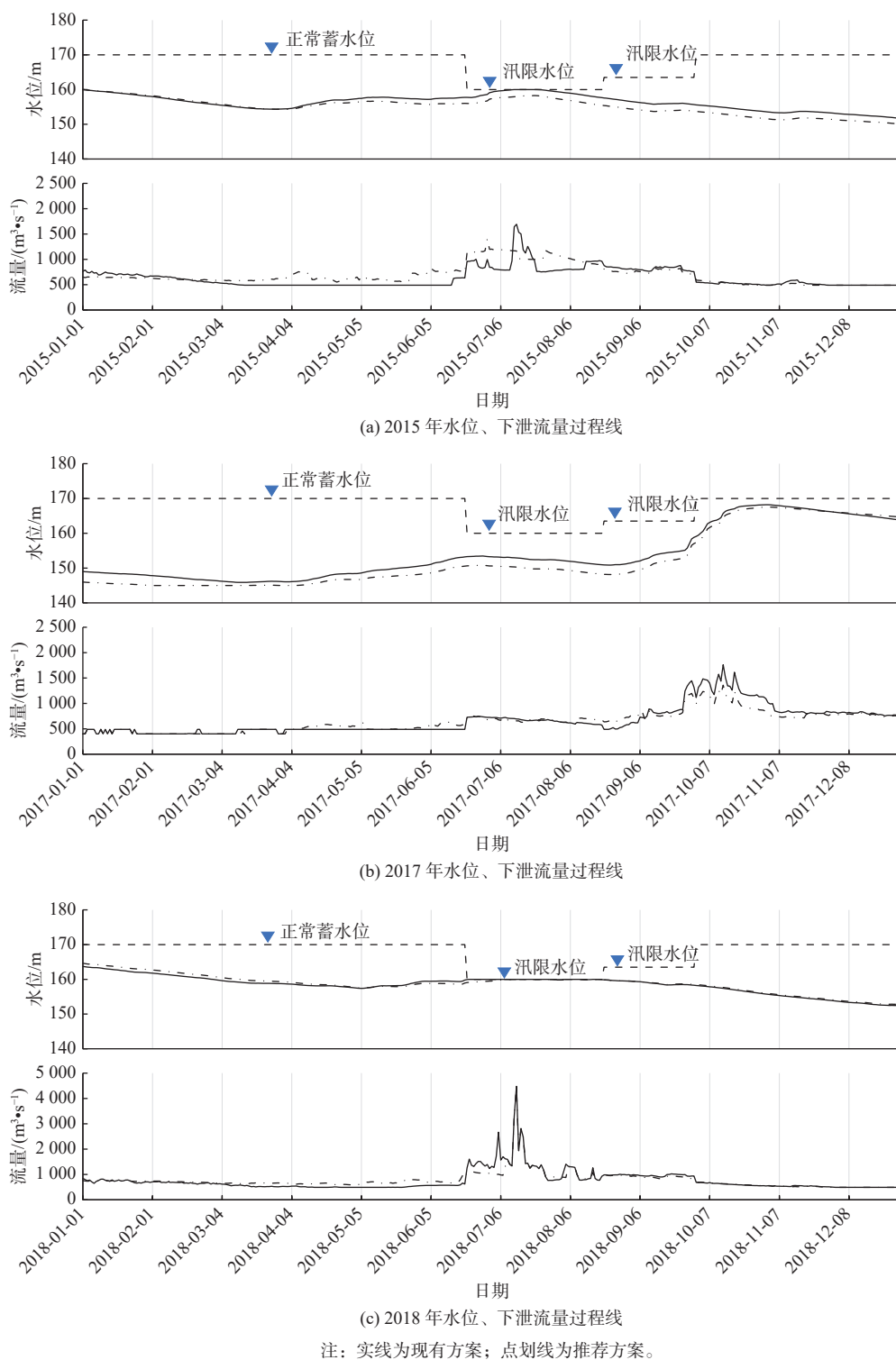


图2 丹江口水库2015、2017和2018年调度运行水位、下泄流量过程线

Fig. 2 The operational water level and released flow hydrographs of Danjiangkou Reservoir in 2015, 2017 and 2018 typical years

4.4 生态流量分析

为验证推荐方案的下泄流量是否满足生态需求, 将其与最小生态流量和适宜生态流量对比(图3), 并结合 Tennant 法对推荐方案下泄流量进行评价。最小生态流量选择逐月最小生态流量法^[34]; 适宜生态流量选用逐月频率法, 在汛期和非汛期分别取 90% 和 70% 频率的情景^[34]。最小及适宜生态流量

计算都基于 1954—2020 年天然流量系列。

最小生态流量是满足河流生态系统维持的最低限制, 一旦低于限制则河流生态系统会退化, 河内生物无法维系生存, 强调临界状态。图3表明推荐方案各月月均下泄流量均远大于最小生态流量, 满足黄家港断面和“丹江口水库生态流量调度保证措施”要求的 174 m³/s 生态基流、正常年份 490 m³/s

下泄流量、特枯年 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 的下泄量。适宜生态流量是保持河流生态系统平衡稳定的最佳流量,推荐方案的下泄流量在水量较枯的1—3月、11—12月均大于等于适宜生态流量,这保证了枯水期间汉江中下游能够有足够多的水量支撑水生生物和河岸均健康发展;5—10月汛期在库水位逐渐上升的过程中,供水量也逐渐增大,下泄流量依然能够维持在较大流量以满足生态需求;4月,流量略低于适宜生态流量,考虑4月月均水位按照调度规则需要有较大供水量,但是4月的入库流量比汛期略小,所以导致流向库下游的水量有一定减少。2016枯水年的流量较少,也导致水库年均的下泄流量整体减少。青鱼(5—6月)、草鱼(4—7月)、鲢鱼(4—7月)、鳙鱼(4—7月)和长春鳊(5—8月)的繁殖期与 Tennant 法的产卵育肥划分期基本一致。在产卵育肥期和一般用水期,依据 Tennant 法得到推荐调度方案的流量占多年平均流量比例分别为 43.31% 和 90.54%,评价结果分别是良好和最佳,说明无论是产卵育肥期还是一般用水期,推荐方案的下泄流量都给生物生存条件提供了较高保障。

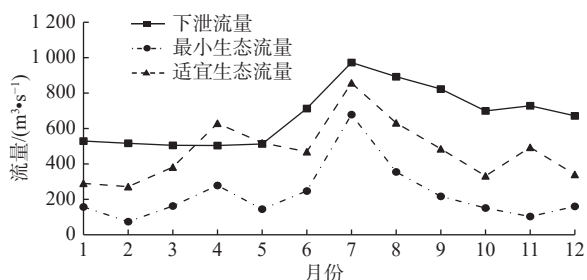


图3 下泄流量与生态流量对比

Fig. 3 Comparison of outflow discharge and ecological flow

5 结论

本文基于 IHA 参数,按照月尺度及日尺度对指标进行分类、赋权和筛选,并组成流量等级指标(WQL)及流量波动指标(HA)作为控制水文情势变化的水文改变生态指标。在保证防洪安全、供水和发电效益的同时考虑下游生态需水量和流量波动,开展丹江口水库多目标生态调度研究,寻找经济和生态效益相协调的优化调度方案,主要结论如下:

基于高斯径向基的优化调度函数,提出包括供水、发电、流量等级指标 WQL 和流量波动 HA 指标 4 种不同目标函数组合的优化调度方案。结果显示:调水量与发电量、水文改变生态指标呈负相关关系;发电量与流量等级 WQL 相互协调,但与流量

波动 HA 相互矛盾;仅考虑一种水文改变生态指标会造成另一生态指标的需求难以达到,需要寻找供水和发电不变且两生态指标均较好的推荐方案。

现有调度方案虽能提高供水量,但对汉江中下游的水文情势改变较大。同时考虑供水、发电、流量等级 WQL 及流量波动 HA 的多目标优化调度方案,在维持供水发电效益相同的前提下,可有效提升两生态指标,有利于汉江中下游水生态保护及水生生物生存繁衍。将分析选出的推荐四目标优化方案及其对应调度函数作为“防洪-供水-生态-发电”相协调的推荐方案,用于指导丹江口水库优化调度运行。

推荐方案的下泄流量远大于生态基流和最小生态流量,基本达到适宜生态流量大小,满足汉江中下游水生生物自然繁殖的需求,可以为丹江口水库多目标生态调度提供参考。

汉江中下游主要的水生态问题包括:丹江口-王甫洲区间水草防治;汉江下游冬季水华抑制;促进汉江中下游四大家鱼繁殖。其中,前 2 个问题可通过应急水量调度即时予以实现。鱼类作为水生态系统的重要组成部分,在系统中的位置独特,是水生态系统中的顶极群落,本文考虑两个水文生态指标能够适应全年鱼类的活动规律,基本满足四大家鱼的溯水洄游、逆水产卵的繁殖需求,抓住了水生态问题的主要矛盾,在当前缺少长期实测资料并难以构建复杂水生态耦合模型的前提下,不失为一种适用方法。后续会从生态系统耦合的角度进一步开展丹江口水库调度对四大家鱼繁殖的影响研究。

参考文献(References):

- [1] 王何予,田晶,邓乐乐,等.基于IHA-RVA法分析汉江中下游水文情势变化[J].*水资源研究*,2021,10(4):350-361.(WANG H Y, TIAN J, DENG L L, et al. Hydrological regime alteration analysis in the middle and lower reaches of Hanjiang River based on IHA-RVA method[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2021, 10(4): 350-361. (in Chinese)) DOI: 10.12677/JWRR.2021.104038.
- [2] 朱焯,李杰,潘红忠.南水北调中线调水对汉江中下游水文情势的影响[J].*人民长江*,2019,50(1):79-83.(ZHU Y, LI J, PAN H Z. Influence of middle route of South-to-North Water Diversion Project on hydrological regime in middle and lower reaches of Hanjiang River[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(1): 79-83. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.

- 01.015.
- [3] WANG H, BRILL E D, RANJITHAN R S, et al. A framework for incorporating ecological releases in single reservoir operation[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 78: 9-21. DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.01.006.
- [4] 刘悦忆, 朱金峰, 赵建世. 河流生态流量研究发展历程与前沿[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(12): 23-34. (LIU Y Y, ZHU J F, ZHAO J S. Development history and frontiers of river environmental flow research[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(12):23-34. (in Chinese)) DOI:10.11660/slfdx.2016.1203.
- [5] LABADIE J W. Optimal operation of multi-reservoir systems: State-of-the-art review[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2004, 130(2): 93-111. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(93).
- [6] TSAI W, CHANG F, CHANG L, et al. AI techniques for optimizing multi-objective reservoir operation upon human and riverine ecosystem demands[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 634-644. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.10.024.
- [7] 谢雨祚, 李千珣, 郭生练, 等. 考虑生态流量的清江梯级水库优化调度研究[J]. *水资源研究*, 2021, 10(1): 1-10. (XIE Y Z, LI Q X, GUO S L, et al. Optimal operation cascade reservoirs in the Qing River considering ecological flow[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2021, 10(1): 1-10. (in Chinese)) DOI: 10.12677/JWRR.2021.101001.
- [8] 林梦然, 贾一飞, 董增川. 考虑发电-生态效益均衡的嘉陵江水库群优化调度[J]. *人民长江*, 2021, 52(9): 223-229. (LIN M R, JIA Y F, DONG Z C. Research on joint optimal operation of reservoir groups in Jialing River considering balance between power generation and ecological benefits[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(9): 223-229. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.09.036.
- [9] YANG Z, ZHU Q, CAO J, et al. Using a hierarchical model framework to investigate the relationships between fish spawning and abiotic factors for environmental flow management[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 787: 147618. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147618.
- [10] LI Y, LIN J, LIU Y, et al. Refined operation of cascade reservoirs considering fish ecological demand[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127559. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127559.
- [11] THOMPSON R M, KING A J, KINGSFORD R M, et al. Legacies, lags and long-term trends: Effective flow restoration in a changed and changing world[J]. *Freshwater Biology*, 2018, 63(8): 986-995. DOI: 10.1111/fwb.13029.
- [12] BUNN S E, ARTHINGTON A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity[J]. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492-507. DOI: 10.1007/s00267-002-2737-0.
- [13] RICHTER B, BAUMGARTNER J, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. *Conservation Biology*, 1996, 10: 1163-1174. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x.
- [14] 武心嘉, 葛金金, 戚晓明, 等. 基于RVA法的沙颍河周口段水文情势评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(5): 71-80. (WU X J, GE J J, QI X M, et al. Assessment of flow regime of Zhoukou section based on RVA method[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(5):71-80. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0112.
- [15] 涂玉律, 李英海, 郭家力, 等. 基于IHA-RVA法的隔河岩水库下游水文情势分析[J]. *人民珠江*, 2020, 41(11): 1-8. (XU Y J, LI Y H, GUO J L, et al. Analysis for hydrological regime of the lower reaches of Geheyan Reservoir based on IHA-RVA method[J]. *Pearl River*, 2020, 41(11): 1-8. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2020.11.001.
- [16] 江善虎, 周乐, 任立良, 等. 基于生态流量阈值的河流水文健康演变定量归因[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 356-365. (JIANG S H, ZHOUL, REN L L, et al. Quantifying attribution of the river hydrological health variation based on ecological-flow threshold method[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 356-365. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.03.004.
- [17] MA D, LUO W, YANG G, et al. A study on a river health assessment method based on ecological flow[J]. *Ecological Modelling*, 2019, 401: 144-154. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2018.11.023.
- [18] LI D, WAN W, ZHAO J. Optimizing environmental flow operations based on explicit quantification of IHA parameters[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 510-522. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.031.
- [19] YAN M, FANG G, DAI L, et al. Optimizing reservoir operation considering downstream ecological demands of water quantity and fluctuation based on IHA parameters[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126647. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126647.
- [20] 水利部. 丹江口水库优化调度方案[S], 2021. (Min-

- istry of Water Resources. The optimal operation scheme of Danjiangkou Reservoir[S]. 2021.(in Chinese))
- [21] 徐聚臣, 杜红春, 王晓宁, 等. 2017—2020年汉江干流水生生物资源现状及变化趋势[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(5): 126-137. (XU J C, DU H C, WANG X N, et al. Current situation and changing trend of aquatic organisms' resources in main stream of Hanjiang River from 2017 to 2020[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(5): 126-137. (in Chinese)) DOI: [10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.016](https://doi.org/10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.016).
- [22] 张辉, 曾晨军, 李婷, 等. 基于四大家鱼产卵需求的汉江中下游生态流量研究[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(3): 1-8. (ZHANG H, ZENG C J, LI T, et al. Ecological flow in the mid-lower Hanjiang River based on spawning demands of the four major Chinese carps[J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(3): 1-8. (in Chinese)) DOI: [10.15928/j.1674-3075.202101190013](https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202101190013).
- [23] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10. DOI: [10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2).
- [24] GAO Y, VOGEL R M, KROLL C N, et al. Development of representative indicators of hydrologic alteration[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(1): 136-147. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2009.06.009](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.009).
- [25] 杜子芳. 多元统计分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016. (DU Z F. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese))
- [26] 杜书栋, 关亚楠, 李欣, 等. 基于熵权法改进的综合污染指数的水质评价: 以白云湖为例[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 205-212. (DU S D, GUAN Y N, LI X, et al. Water quality evaluation with improved comprehensive pollution index based on entropy weight method: A case study of Baiyun Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(1): 205-212. (in Chinese)) DOI: [10.13671/j.hjkxxb.2021.0108](https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2021.0108).
- [27] 王富强, 马尚钰, 赵衡, 等. 基于AHP和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 67-74. (WANG F Q, MA S Y, ZHAO H, et al. A fuzzy comprehensive evaluation of water cycle health in Beijing-Tianjin-Hebei region based on combined weights of AHP and entropy method[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(1): 67-74. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0006](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0006).
- [28] 陈水利, 李敬功, 王向公. 模糊集理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (CHEN S L, LI J G, WANG X G. Fuzzy set theory and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [29] ZOU Z, YUN Y, SUN J. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 1020-1023. DOI: [10.1016/S1001-0742\(6\)60032-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(6)60032-6).
- [30] GIULIANI M, MASON E, CASTELLETTI A, et al. Universal approximators for direct policy search in multi-purpose water reservoir management: A comparative analysis[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3): 6234-6239. DOI: [10.3182/20140824-6-ZA-1003.01962](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01962).
- [31] 李芳芳, 曹广晶, 王光谦. 考虑径流不确定性的水库优化调度响应曲面方法[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(6): 49-54. (LI F F, CAO G J, WANG G Q. Response surface of reservoir optimization considering uncertainty of inflow[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(6): 49-54. (in Chinese))
- [32] YANG G, GUO S, LIU P, et al. Multiobjective reservoir operating rules based on cascade reservoir input variable selection method[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(4): 3446-3463. DOI: [10.1002/2016WR020301](https://doi.org/10.1002/2016WR020301).
- [33] HE S, GUO S, YANG G, et al. Optimizing operation rules of cascade reservoirs for adapting climate change[J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(1): 101-120. DOI: [10.1007/s11269-019-02405-6](https://doi.org/10.1007/s11269-019-02405-6).
- [34] 李千珣, 郭生练, 邓乐乐, 等. 清江最小和适宜生态流量的计算与评价[J]. *水文*, 2021, 41(2): 14-19. (LI Q X, GUO S L, DENG L L, et al. Calculation and evaluation of minimum and suitable ecological flows of Qingjiang River[J]. *Hydrology*, 2021, 41(2): 14-19. (in Chinese)) DOI: [10.19797/j.cnki.1000-0852.20200043](https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20200043).

Multi-objective optimal operation for Danjiangkou Reservoir considering ecological indicators of hydrologic alteration

WANG Heyu, TIAN Jing, GUO Shenglian, WANG Jun, ZHONG Sirui

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The construction and operation of reservoirs changed the downstream hydrological regime and affected the reproduction of aquatic organisms. The current multi-objective reservoir operation models maximized the economic and ecological comprehensive benefits which only quantify a single ecological flow index. However, downstream river ecology is not only reflected by the magnitude of the streamflow, but also affected by the hydrologic alternation. Hence, it is necessary to explore an optimal operation scheme that can balance the objectives of flood control and economic comprehensive benefits and reduce the negative impact on the downstream ecological environment.

Ecological indicators that could reflect the downstream ecological water demand and fluctuation were constructed according to the indicators of hydrologic alteration (IHA). The degree to which the monthly average outflow discharge met the water demand stipulated by the Tennant method was quantified as water quantity level indicator. The daily scale IHAs were filtered and simplified to reflect the flow fluctuation, and the fluctuation deviation between the outflow discharge and the natural flow constituted the hydrological alteration indicator. Water quantity level indicator and hydrological alteration indicator were selected as ecological indicators of hydrologic alteration. The greater the water quantity level indicator with the high flow grade is, the better the ecological benefit. On the other hand, the smaller the hydrological alteration indicator with the less flow fluctuation, the better for reproduction of aquatic organisms.

Four objectives, i.e., water supply, power generation, outflow discharge and hydrologic alteration, were used to optimize the operation of Danjiangkou Reservoir, in which the flood control task was taken as constraint. The water transfer volume of the South-to-North Water Transfer and the north Hubei water transfer is collectively referred to as water supply, and the outflow discharge of reservoir include flood discharge and power generation. The Gaussian radial basis functions were used to fit the reservoir operation rules, and the operation model with different combination of the objective functions was optimized. The water supply, power generation and two ecological indexes under different schemes were calculated. Based on the current operation schemes of Danjiangkou Reservoir, the dialectical relationship between each index as well as the pros and cons of each scheme were analyzed and compared to find the best scheme.

The application results showed that: water supply benefit was negatively correlated with power generation benefit and ecological indicators; power generation benefit was coordinated with water quantity level indicator, but contradictory with hydrological alteration indicator. In each scheme, the best multi-objective optimal operation scheme considering water supply, power generation, water quantity level and hydrological alteration simultaneously could effectively improve the two ecological indicators on the premise of maintaining the current benefits of water supply and power generation unchanged. Effectively improving the two ecological indicators was conducive to the water ecological protection and the reproduction of aquatic organisms. The outflow discharge of the best scheme was much larger than the ecological baseflow and the minimum ecological flow, and almost reached the optimal ecological flow, which could satisfy the needs of natural reproduction of aquatic organisms in the middle and lower reaches of the Hanjiang River.

The water quantity level and hydrological alteration indicators based on IHA were proposed and included in the multi-objective operation model. Compared with the current operation scheme, the proposed reservoir operation model was able to reduce the negative impact on the downstream ecological environment with less data required. This practical approach could provide a reference for the multi-objective ecological operation of Danjiangkou Reservoir.

Key words: indicator of hydrologic alteration; ecological flow; multi-objective ; optimal operation; Danjiangkou Reservoir