

基于结构方程模型的水库多目标互馈关系研究

王丽萍¹, 阎晓冉¹, 马皓宇¹, 李宁宁¹, 俞洪杰², 纪昌明¹

(1. 华北电力大学 可再生能源学院, 北京 102206; 2. 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310002)

摘要: 梯级水库多目标问题涉及的因子集维度较高, 目标间关系错综复杂, 传统统计学方法难以同时考虑各目标所涉及的不同指标, 对于互馈关系仅可给出定性分析。针对此问题, 本文建立梯级水库发电-供水-生态多目标优化调度模型, 采用快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解, 并提出三者间互馈关系的初步假设, 进而引入结构方程模型(SEM), 以非劣解集内各指标值作为输入数据, 进行高维验证性因子分析, 针对目标间互馈关系给出可视化、定量化的计算结果。溪洛渡-向家坝梯级水库的研究结果表明, 在丰、平、枯不同典型年中发电-供水的冲突最剧烈, 其次为发电-生态, 而供水-生态的互馈关系并不显著; 另外, 随着天然来流由丰变枯, 发电-供水矛盾急剧锐化。

关键词: 结构方程模型; 梯级水库; 多目标优化调度; 互馈关系

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

DOI: 10.11660/slfdb.20191005

论文引用格式:

王丽萍, 阎晓冉, 马皓宇, 等. 基于结构方程模型的水库多目标互馈关系研究[J]. 水力发电学报, 2019, 38(10): 47-58.
WANG Liping, YAN Xiaoran, MA Haoyu, et al. Study on multi-objective mutual feedback relationships of reservoirs based on structural equation modeling [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(10): 47-58. (in Chinese)

Study on multi-objective mutual feedback relationships of reservoirs based on structural equation modeling

WANG Liping¹, YAN Xiaoran¹, MA Haoyu¹, LI Ningning¹, YU Hongjie², JI Changming¹

(1. Renewable Energy School, North China Electric Power University, Beijing 102206;

2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-electric Power, Hangzhou 310002)

Abstract: The multi-objective optimization problem of cascade reservoirs involves high factor dimensions and complicated inter-objective relationships. Traditional statistical methods are difficult to consider the target information contained in different indicators comprehensively, and can give only qualitative analysis of their mutual feedback relationships. Aiming at the problem, this paper constructs a power generation-water supply-ecology multi-objective optimal scheduling model for cascade reservoirs, solves it using a fast non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), and formulates a preliminary hypothesis of mutual feedback relationships among the three objectives. And we apply a structural equation modeling (SEM), conduct a high-dimensional confirmatory factor analysis using the index values given by the multi-objective non-inferior solution set of cascade reservoirs, and present visual and quantitative calculation results for the mutual feedback relationships among the objectives. The results of the Xiluodu-Xiangjiaba cascade reservoirs show that under different inflow frequencies, the power

收稿日期: 2019-04-09

接受日期: 2019-05-21

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0402208); 国家自然科学基金(51709105)

作者简介: 王丽萍(1956—), 女, 教授. E-mail: lpwang@ncepu.edu.cn

通信作者: 阎晓冉(1992—), 女, 博士生. E-mail: yanxiaoran1014@163.com

generation-water supply conflict is the most severe, followed by power generation-ecology; while compared with these conflicts, the water supply-ecology feedback relationship is insignificant. As the frequency of inflow increases, the conflict between power generation and water supply sharpens rapidly.

Keywords: structural equation modeling; cascade reservoirs; multi-objective optimal scheduling; mutual feedback relationship

0 引言

梯级水库规模庞大、内部结构复杂,其兴利调度涉及发电、供水、生态等多个目标,各目标之间的关系既非完全对立也非完全协调^[1]。随着大规模梯级水电站的不断投产,发电效益得以显著提升。然而,水库调蓄作用改变了下游河道的水文情势,在一定程度上破坏了河流生态系统的稳定性,制约了流域生态的可持续性发展^[2]。同时,发电目标与供水目标间关系错综复杂:一方面,对于库区有引水灌溉功能的水库,其发电高峰期与灌区需水高峰期可能存在一定重合,发电目标的实现需要水库不断释放库存水量,而为了满足灌溉渠道正常引水要求,库区水位需维持在一定高度运行,从而使发电与供水产生矛盾^[3];另一方面,对于下游有供水要求的水库,发电用水可同时满足下游城镇生活及工农业用水需求,此时,二者呈现协同关系,但若供水需求过大,则削减了库区水量、降低了发电水头,从而影响发电效益。显然,梯级水库多目标并非彼此独立,各目标间均存在一定程度的互馈作用,某一目标效益的增加可能造成其他目标效益的减少,即多目标间具有矛盾性。而且,随着时间及外部环境的变化,其互馈关系也并非一成不变。因此,仅以单目标效益最大进行优化调度忽略了水库各目标的协调发展。

鉴于此,许多学者开展了考虑供水、生态等效益的多目标优化调度方法研究^[4-6]。陈悦云等^[7]建立了面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度模型,并分析了典型区域的缺水情况;吕巍等^[8]结合乌江干流不同生态流量过程进行多目标优化调度,计算并评价了不同水文情势下的梯级水电站调度方案;金文婷等^[9]考虑了枯水年引汉济渭工程调水能力与发电能力,建立了并联水库多目标优化调度模型,实现了调水不足损失程度的量化。现有的成果大多集中于多目标优化调度模型求解,部分学者针对计算结果进行了多目标竞争关系的分析,但现有成果在研究时仅用单个指标表示目

标,且仅做出了定性分析。单指标往往不能对该目标的风险或效益信息进行全面的表征,同时考虑多指标的发电、供水、生态互馈响应关系及其定量化计算则尚未见到相关成果。然而,对于梯级水库而言,其各目标相互影响又彼此竞争,在变化的外部条件下呈现出动态的博弈过程,多目标互馈关系的量化对于梯级水库合理分配资源、调控风险具有重要指导意义。

结构方程模型(structural equation modeling, SEM)被称为“第二代多元统计方法”,其以因果理论为基础,以协方差矩阵为依据分析变量间关系,常用于高阶因子分析、回归分析、路径分析等。其可以同时估计因子结构及因子关系,并评价整个模型的拟合程度。与传统统计学方法不同,SEM在多原因、多结果或变量不可观测的情况下具有独特优势,近年来被广泛应用于社会科学、医学、生物学、心理学等学科的研究中^[10-13]。水文领域的部分学者运用SEM进行了水资源环境及流域经济发展方面的分析,取得了一定研究成果。崔丹等^[14]通过控制断面水质影响路径分析,建立了面向水环境承载力评价的结构方程模型,分析了控制区上、中、下游水环境承载状态梯度特征;孙才志等^[15]将基于因果关系的DPSIR模型和PLS结构方程模型相结合,构建了中国水贫困评价指标体系和框架模型,并分析了水贫困分布的整体形态和演进趋势;何丙辉等^[16]从农业经济、农村社会发展与流域水资源环境有机统一角度出发建立结构方程模型,探讨了三峡库区重庆段水资源系统与人类活动的相互关系,并提出了相应的对策。

梯级水库发电-供水-生态多目标互馈关系研究涉及变量众多,既有指标维度的可观测变量,又包含目标维度的不可观测变量,且变量间关系复杂,同时包含高维因子分析与路径分析。相对于传统统计学方法而言,SEM在处理复杂系统变量关系时更具有全面性及准确性,而在水库多目标调度领域目前尚未见到相关应用。因此,本文尝试引入SEM对梯级水库多目标互馈关系进行研究,以验

证其合理性及可行性。

本文以金沙江干流溪洛渡-向家坝梯级水库为研究背景,以发电、供水和生态优化调度所需考虑的各指标加权值作为目标,构建梯级水库多目标联合优化调度模型,利用经典多目标进化算法 NSGA-II 进行求解得到非劣解集,通过定性分析提出三个目标间互馈关系的初步假设,进而构建基于 SEM 的溪洛渡-向家坝梯级水库多目标互馈关系模型,以非劣解集中各指标值作为输入数据,通过定量计算进行高维验证性因子分析,探索丰、平、枯不同典型年梯级水库各目标的互馈响应机制,以期缓解各目标间的矛盾对立关系,提高梯级水库运行的合理性。

1 结构方程模型

1.1 基本形式

结构方程模型由结构模型及测量模型两部分组成,结构模型用于估计潜变量之间的关系,测量模型用来确定潜变量与观测变量之间的关系。

(1) 测量模型:

$$\begin{cases} X = \lambda_x \xi + \delta \\ Y = \lambda_y \eta + \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

式中: ξ 为外生潜变量; η 为内生潜变量; X 为 ξ 的观测变量矩阵; Y 为 η 的观测变量矩阵; λ_x 为因变量与外生潜变量之间的关系; λ_y 为自变量与内生潜变量间的关系; δ 为 X 的误差项; ε 为 Y 的误差项。

(2) 结构模型:

$$\eta = \gamma \xi + \beta \eta + \zeta \quad (2)$$

式中: γ 为外生潜变量与内生潜变量间的关系; β 为内生潜变量之间的关系; ζ 为结构方程的误差项。

除数学表达式的形式以外,结构方程模型还可以通过路径图的形式表示,如图 1 所示。在路径图中,观测变量用矩形表示,潜变量用圆形表示;变量间的单向直线箭头表示某一个变量对另一个变量有单向的因果关系,双向直线箭头表示两变量间有双向的互馈关系;各箭头上的字母或数字为路径系数,其可表示两变量间关系的强弱。路径系数的取值范围为 $[-1, 1]$,当路径系数为负值时,两变量之间为负相关关系,反之,当路径系数为正值时,变量之间为正相关关系,而且路径系数的绝对值越

大,相关关系就越强。由于路径图形式简单直观,便于理解,故相比于线性方程系统,其更常应用于结构方程模型的建模过程。

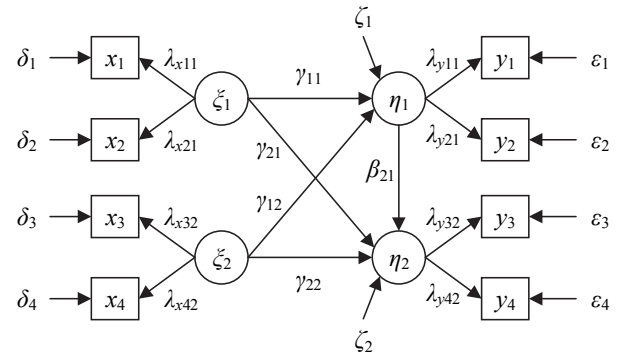


图 1 SEM 模型路径图

Fig. 1 Model path diagram of SEM

1.2 求解步骤

SEM 的建模及求解可分为如下 5 个步骤:

(1) 机理研究。在构建 SEM 模型之前,需要对研究对象进行机理研究,建模须以因果理论为基础,逻辑关系清晰,符合自然规律。

(2) 模型构建。绘制结构模型及测量模型,指定不同变量间相关关系,若模型较复杂,则需对因子负荷等加以约束。

(3) 模型拟合。对 SEM 进行求解,得到各个参数的估计值,使模型隐含的协方差矩阵与样本协方差矩阵尽可能接近。参数估计方法包括极大似然法、广义最小二乘法等。

(4) 模型评价。评价内容包括路径系数的合理性、计算结果的收敛性等,还可通过拟合指数衡量模型的拟合程度。

(5) 模型修正。若 SEM 的估计结果与实际情况存在偏差,可对原始模型中的路径进行扩展或删减,直至各拟合指数达标,且模型参数估计值均能给出合理解释。

2 SEM 数据来源

为获取 SEM 输入数据,以溪洛渡-向家坝梯级水库为研究对象,构建多目标优化调度模型并求解。溪洛渡-向家坝为金沙江最末梯级,是开发利用金沙江水资源的骨干工程,其以发电为主,兼有供水、改善上游航运条件等综合效益,并可为下游电站进行梯级补偿^[17],两库基本参数如表 1 所示,地理位置如图 2 所示。梯级优化调度的目标包括发电、河道外供水及河道内生态。

表 1 梯级水电站基本参数表

Table 1 Parameters of the cascade hydropower stations

水库	死水位/m	正常蓄水位/m	调节库容/亿 m ³	最小下泄流量/m	装机容量/MW	保证出力/MW
溪洛渡	540	600	64.62	1400	12600	3395
向家坝	370	380	9.03	1200	6000	2009

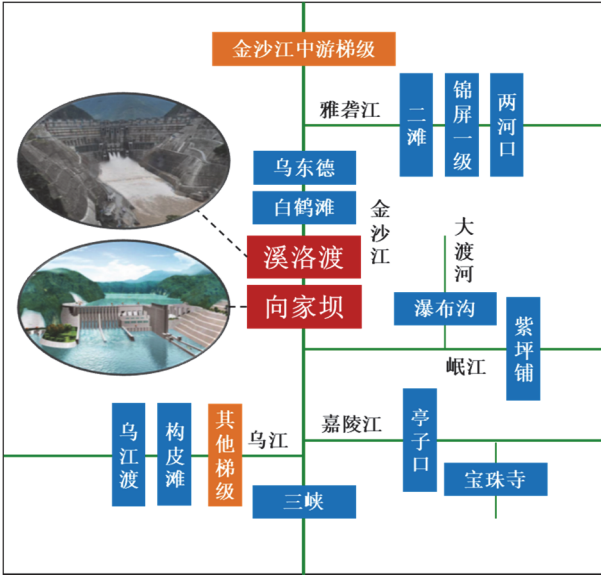


图 2 溪洛渡-向家坝地理位置拓扑图

Fig. 2 Topological map of geographic locations of Xiluodu-Xiangjiaba dams

2.1 目标函数

(1) 发电目标：发电目标需考虑的指标为年发电量 (f_1)、出力不足风险率 (f_2) 及弃水量 (f_3)。年发电量是反映发电效益高低的重要指标；出力不足风险率表征水电站运行的可靠性及稳定性；弃水量则代表水电站对于水资源的利用效率。其中，年发电量为正向指标，其余两个指标为负向指标。

$$\max f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N N_{i,t} \Delta t \quad (3)$$

$$\min f_2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T R_{i,t}^n$$

$$R_{i,t}^n = \begin{cases} 1, & N_{i,t} < N_i^{pro} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Q_{i,t}^{ab} \Delta t \quad (5)$$

$$\min f_{pg} = \omega_1 \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \sum_{i=2}^3 \left(\omega_i \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right) \quad (6)$$

式中： T 为调度时段数； N 为水库数； $N_{i,t}$ 为水库 i 在时段 t 的出力； Δt 为时段长； $R_{i,t}^n$ 为出力不足函

数； N_i^{pro} 为电站 i 保证出力； $Q_{i,t}^{ab}$ 为水库 i 在时段 t 的平均弃水流量； ω_i 为权重系数； f_{pg} 为发电目标所对应各指标的综合函数。

(2) 供水目标：供水目标需考虑的指标为供水保证率 (f_4)、最长供水破坏历时 (f_5) 及供水总缺水量 (f_6)，三者分别表征水库供水的可靠性、易损性及脆弱性^[18]。其中，供水保证率为正向指标，其余两个指标为负向指标。

$$\max f_4 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{w,t}$$

$$P_{w,t} = \begin{cases} 1, & Q_{i,t}^w \geq Q_i^w \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

$$\min f_5 = \max \{T_{w,1}, T_{w,2}, \dots, T_{w,m}\} \quad (8)$$

$$\min f_6 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N R_{i,t}^w \Delta t$$

$$R_{i,t}^w = \begin{cases} |Q_{i,t}^w - Q_i^w|, & Q_{i,t}^w < Q_i^w \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$$\min f_{ws} = \omega_4 \frac{f_4 - f_4^{\min}}{f_4^{\max} - f_4^{\min}} + \sum_{i=5}^6 \left(\omega_i \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right) \quad (10)$$

式中： $P_{w,t}$ 为供水保证函数； $Q_{i,t}^w$ 为水库 i 在 t 时段的供水流量， Q_i^w 为其供水最小下泄流量； $T_{w,k}$ 为分析期内各缺水时期的长度， $k \leq m$ ， m 为缺水时期数； $R_{i,t}^w$ 为供水不足函数； f_{ws} 为供水目标所对应各指标的综合函数。

(3) 生态目标：生态目标需考虑的指标为生态保证率 (f_7) 及生态总缺水量 (f_8)。二者分别从不同维度反映了水库调度对下游河道生态系统产生的影响，前者为正向指标，后者为负向指标。

$$\max f_7 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{e,t}$$

$$P_{e,t} = \begin{cases} 1, & Q_{i,t} \geq Q_i^e \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

$$\min f_8 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N R_{i,t}^e \Delta t$$

$$R_{i,t}^e = \begin{cases} |Q_{i,t} - Q_i^e|, & Q_{i,t} < Q_i^e \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

$$\min f_e = \omega_7 \frac{f_7 - f_7^{\min}}{f_7^{\max} - f_7^{\min}} + \omega_8 \frac{f_8^{\max} - f_8}{f_8^{\max} - f_8^{\min}} \quad (13)$$

式中: $P_{e,t}$ 为供水保证函数; $Q_{i,t}$ 为水库 i 在 t 时段的下泄流量; Q_i^e 为水库 i 下游河道最小生态流量; f_e 为生态目标所对应各指标的综合函数。

2.2 约束条件

(1) 水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (W_{i,t} - Q_{i,t})\Delta t \quad (14)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 为水库 i 在 t 时段初、末的蓄水量; $W_{i,t}$ 为水库 i 在 t 时段平均入库流量。

(2) 水位上下限约束:

$$Z_i^{\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_i^{\max} \quad (15)$$

式中: $Z_{i,t}$ 为 i 水库在 t 时刻的水位; Z_i^{\max} 、 Z_i^{\min} 为水库 i 的水位上下限。

(3) 出力上下限约束:

$$N_i^{\min} \leq N_{i,t} \leq N_i^{\max} \quad (16)$$

式中: N_i^{\max} 、 N_i^{\min} 为水电站 i 的出力上下限。

(4) 流量上下限约束:

$$q_i^{\min} \leq q_{i,t} \leq q_i^{\max} \quad (17)$$

式中: q_i^{\max} 、 q_i^{\min} 为水电站 i 的发电流量上下限。

(5) 非负约束。

2.3 求解算法

NSGA-II 算法于 2002 年由 Deb 等^[19]提出, 其在非支配排序遗传算法 (NSGA) 的基础上添加了精英保留策略及拥挤度选择法则, 从而提升了算法的鲁棒性及收敛性, 同时, 其在搜索速度和保持种群多样性方面都具有良好效果。因此, 本文选取 NSGA-II 算法对溪洛渡-向家坝梯级水库多目标优化调度模型进行求解。算法各项基本参数设置为: 种群规模 $N=1000$, 最大迭代次数 $M=50$, 交叉概率 $P_c=0.8$, 变异概率 $P_m=0.1$, 交叉分布指数 $\eta_c=20$, 变异分布指数 $\eta_m=20$, 通过专家打分法可得指标 $f_1 \sim f_8$ 权重向量为 $W=(0.45, 0.25, 0.3, 0.4, 0.3, 0.3, 0.6, 0.4)$, 算法具体步骤可参考文献^[20]。为保证非劣解集的完整性, 通过独立运行算法 50 次 (每次的随机数种子均不同), 依据 HV 指标挑选最优非劣解集。

由于天然来水的差异性, 梯级水库多目标竞争关系也并非一成不变, 因此, 考虑丰、平、枯不

同频率来流情况下发电-供水-生态互馈关系的差异, 通过 P-III 分布拟合 1957—2012 年溪洛渡坝址年径流量序列, 分别选取 1962 年、1981 年及 1984 年作为丰、平、枯典型年, 其所对应频率分别为 20%、50% 及 80%。将各年旬平均流量序列输入多目标调度模型, 得到发电、供水、生态目标的非劣解集, 及年发电量、供水保证率、生态保证率等 8 个指标值, 以其作为多目标互馈关系 SEM 模型的输入数据。

3 多目标互馈关系研究

3.1 研究假设

根据 2.3 节中求得的不同典型年多目标非劣解集, 可绘制发电-供水-生态关系图 (见图 3~图 5), 图中 x 轴为生态综合指标值, 用 a_1 表示; y 轴为供水综合指标值, 用 a_2 表示; 色彩轴表示发电综合指标值。可根据三个目标综合指标值的相对变化趋势对发电-供水-生态互馈关系提出初步假设。

3.1.1 发电与供水

由图 3~图 5 可知, 随着 a_2 的增大, 散点颜色逐渐由红色转变为蓝色, 说明随着供水效益的提高, 发电综合效益逐渐减小, 供水与发电存在矛盾关系。另外, 通过比较不同典型年色彩变化规律可发现, 随着天然来流的减小, 供水与发电间的矛盾愈发显著, 由此可提出假设:

H₁: 丰水年发电与供水矛盾显著。

H₂: 平水年发电与供水矛盾显著。

H₃: 枯水年发电与供水矛盾显著。

3.1.2 发电与生态

在图 3~图 5 中随着 a_1 逐渐增大, 散点颜色逐渐趋于蓝色, 说明随着生态效益的提高, 发电效益逐渐减小, 发电与生态存在矛盾关系。就不同典型年而言, 随着天然来流的减小, 发电-生态矛盾趋于剧烈, 由此可提出假设:

H₄: 丰水年发电与生态矛盾显著。

H₅: 平水年发电与生态矛盾显著。

H₆: 枯水年发电与生态矛盾显著。

3.1.3 供水与生态

图 3~图 5 中不同颜色散点分界线的斜率表征供水与生态间冲突关系。整体而言, 随着天然来流的减小, 二者间矛盾逐渐锐化, 由此可提出假设:

H₇: 丰水年供水与生态矛盾显著。

H₈: 平水年供水与生态矛盾显著。

H₉: 枯水年供水与生态矛盾显著。

上述分析仅从定性的角度对发电-供水-生态间的竞争关系给出了初步假设,为了对其进行验证,需引入结构方程模型,由定性分析拓展为定量计算,从而实现目标间互馈作用的量化研究,进而对其相互作用机理进行更深入剖析。

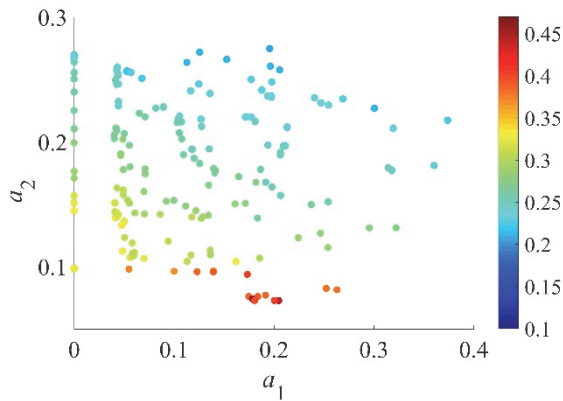


图3 丰水年发电-供水-生态关系图

Fig. 3 Power generation-water supply-ecology relationships in high flow year

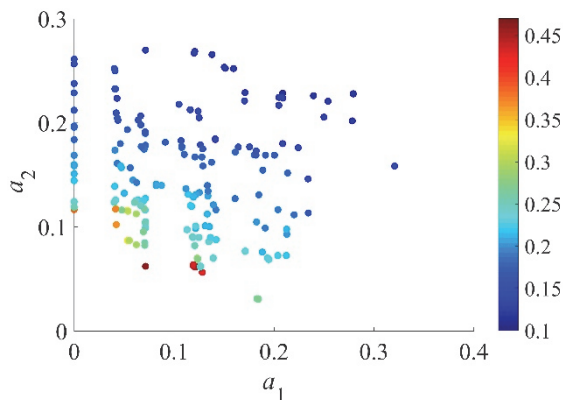


图4 平水年发电-供水-生态关系图

Fig. 4 Power generation-water supply-ecology relationships in normal flow year

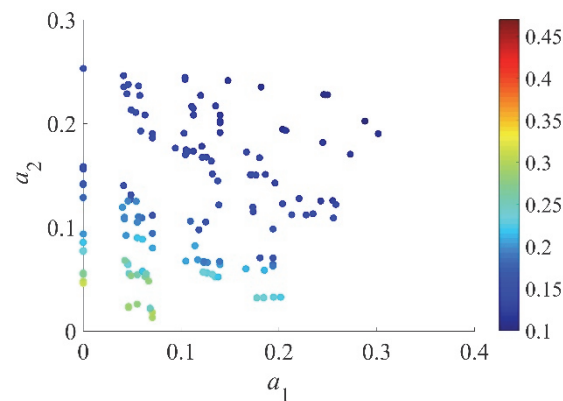


图5 枯水年发电-供水-生态关系图

Fig. 5 Power generation-water supply-ecology relationships in low flow year

3.2 SEM 构建

梯级水库多目标互馈关系 SEM 模型的构建以各目标为基础,但由于目标本身为潜变量,潜变量间互馈关系无法直接测量或计算,因此,针对各目标选取最具代表性的指标,构成观测变量集,通过观测变量数值分析实现潜变量间互馈关系的量化。选取发电、供水及生态三个目标作为潜变量,以 2.1 节中各指标作为观测变量,模型变量设置如表 2 所示,各指标计算方法见式 (3)~(12)。由此可构建梯级水库多目标互馈关系的结构方程模型,如图 6 所示。

表2 潜变量及观测变量表

Table 2 Latent and observation variables

潜变量	观测变量
发电 (FD)	年发电量 (NFD)
	出力不足风险率 (CLB)
	弃水量 (QSL)
供水 (GS)	供水保证率 (GSB)
	最长供水破坏历时 (ZCG)
	供水缺水量 (GSQ)
生态 (ST)	生态保证率 (STB)
	生态缺水量 (STQ)

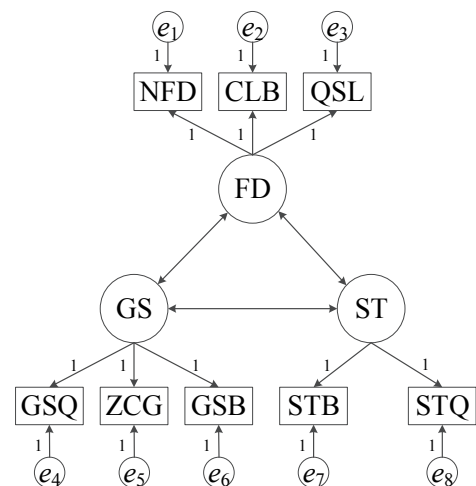


图6 梯级水库多目标 SEM 模型

Fig. 6 Multi-objective SEM of cascade reservoirs

3.3 数据检验

在 3.2 节的观测变量中, NFD、GSB、STB 为正向指标,其余均为负向指标。为消除指标量纲不同带来的影响,在多目标调度模型构建时已进行标准化处理,标准化指标值可作为 SEM 模型的输入变量。

在模型求解前,为确定各典型年指标变量数据的可行性,对其进行了 KMO 和 Bartlett 球形检验,检验结果如表 3 所示。根据常用 KMO 度量标准可知,本次指标取值的适切性大于 0.6,可以进行因子分析^[21]。Bartlett 球形检验中的相伴概率为 0.000,检验矩阵为非单位阵,即测量模型中观测变量的相关性满足要求,存在聚合的可能。

表 3 KMO 和 Bartlett 球形检验结果
Table 3 KMO and Bartlett spherical test results

典型年	KMO 取样适切性量数	Bartlett 球形检验		
		近似卡方	自由度	显著性
1962 (丰)	0.665	645.223	28	0.000
1981 (平)	0.606	309.245	28	0.000
1984 (枯)	0.694	839.461	28	0.000

采用主成分分析法对不同典型年指标集合进行探索性因子分析,均可提取出 3 个因子,因子结构清晰,且各变量在其对应因子上载荷系数最大,即各观测变量均聚合于其对应的潜变量,数据具有较好的收敛效度和区分效度。设 3 个因子分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 ,具体因子载荷矩阵如表 4 所示。

表 4 正交旋转后的因子载荷矩阵
Table 4 Factor loading matrix by orthogonal rotation

典型年	变量	F_1	F_2	F_3
1962 (丰)	NFD	0.831	—	—
	CLB	0.738	—	—
	QSL	0.854	—	—
	GSB	—	0.926	—
	ZCG	—	0.802	—
	GSQ	—	0.910	—
	STB	—	—	0.895
	STQ	—	—	0.821
1981 (平)	NFD	0.726	—	—
	CLB	0.698	—	—
	QSL	0.715	—	—
	GSB	—	0.717	—
	ZCG	—	0.572	—
	GSQ	—	0.754	—
	STB	—	—	0.863
	STQ	—	—	0.742

续表

典型年	变量	F_1	F_2	F_3
1984 (枯)	NFD	0.650	—	—
	CLB	0.788	—	—
	QSL	0.833	—	—
	GSB	—	0.682	—
	ZCG	—	0.695	—
	GSQ	—	0.747	—
	STB	—	—	0.850
	STQ	—	—	0.758

3.4 模型计算及修正

3.3 节中析出的 3 个稳定的公因子即为梯级水库多目标互馈关系模型的 3 个潜变量,本文采用 AMOS 17.0 进行验证性因子分析,通过最大似然法进行参数估计,得到初始模型计算结果。为验证估计结果的准确性,从测量模型及结构模型两方面进行检验。对测量模型的检验包括信度检验以及效度检验,具体结果如表 5 所示。对结构模型进行模型适配度检验,结果如表 6 所示。由此可知,所有潜变量的 Cronbach's α 系数的值均大于 0.7,说明潜变量内部结构具有一致性;所有因子载荷显著,且载荷值均大于 0.5,表明观测变量与潜变量间关系具有统计学上的显著性;模型的 C.R. 均大于 0.7,且 AVE 均大于 0.5,说明模型具有较好的收敛性。根据表 6 所示的检验结果,丰、平、枯不同典型年的结构模型简约适配指数均达到了标准值,但绝对适配指数中的 χ^2/df 、RMSEA、AGFI 及相对适配指数中的 RFI 并未通过检验(未通过检验数据均以“*”标出),因此,需要对原始模型进行修正。

表 5 测量模型检验结果
Table 5 Test results of the measurement model

典型年	潜变量	Cronbach's α	C.R.	AVE
1962 (丰)	FD	0.832	0.850	0.655
	GS	0.795	0.912	0.776
	ST	0.903	0.883	0.716
1981 (平)	FD	0.809	0.756	0.508
	GS	0.713	0.758	0.512
	ST	0.894	0.827	0.616
1984 (枯)	FD	0.866	0.803	0.579
	GS	0.781	0.751	0.502
	ST	0.940	0.846	0.648

表 6 结构模型检验结果

Table 6 Test results of the structural model

拟合指标	检验统计量	临界值	1962 (丰)			1981 (平)			1984 (枯)		
			修正前	修正后	修正结果	修正前	修正后	修正结果	修正前	修正后	修正结果
绝对适配指数	χ^2/df	<2.00	1.901	1.767	适配	1.483	1.107	适配	2.516*	1.903	适配
	RMR	<0.05	0.005	0.004	适配	0.006	0.004	适配	0.005	0.004	适配
	RMSEA	<0.08	0.095*	0.078	适配	0.070	0.05	适配	0.143*	0.074	适配
	GFI	>0.90	0.965	0.971	适配	0.971	0.988	适配	0.952	0.970	适配
	AGFI	>0.90	0.842*	0.903	适配	0.869*	0.901	适配	0.784*	0.900	适配
相对适配指数	NFI	>0.90	0.958	0.972	适配	0.963	0.973	适配	0.964	0.986	适配
	RFI	>0.90	0.854*	0.901	适配	0.870*	0.907	适配	0.875*	0.902	适配
	IFI	>0.90	0.980	0.989	适配	0.988	0.993	适配	0.976	0.989	适配
	TLI	>0.90	0.925	0.94	适配	0.954	0.964	适配	0.913	0.935	适配
	CFI	>0.90	0.979	0.99	适配	0.987	0.992	适配	0.975	0.981	适配
简约适配指数	PGFI	>0.50	0.561	0.531	适配	0.563	0.534	适配	0.561	0.533	适配
	PNFI	>0.50	0.621	0.595	适配	0.623	0.596	适配	0.622	0.597	适配
	PCFI	>0.50	0.633	0.616	适配	0.635	0.617	适配	0.634	0.615	适配

由于模型中所有观测变量与潜变量间均为显著关系,所以在保留原始模型所有路径的基础上进行模型扩展。从修正指数值最大的路径开始调试,观察每次添加路径后各检验统计量是否得到明显改善,且路径具备理论意义^[22]。经过反复拟合最终添加两条路径,分别位于 e_1 与 e_2 之间、 e_6 与 e_7 之间。前者对应的观测变量分别为年发电量及出力不足风险率,后者对应的观测变量为供水保证率与生态保证率。进一步分析可知,水库的出力不足风险率与其年发电量具有密切的相关关系,一般情况下,当年发电量较大时,各时段平均出力较大,满足保证出力的时段更多,从而降低了出力不足风险;供水与生态效益均与水库下泄流量息息相关,当下泄流量较大时,在满足生态流量的基础上亦可提高供水效益,反之则存在冲突关系。因此,二者残差项的公变关系具备实际物理意义,所添加的两条路径亦具备合理性。修正后模型如图 7 所示,所有拟合指数均符合判断标准,拟合度检验结果见表 6。

3.5 结果分析

根据 3.4 节中修正后的发电-供水-生态 SEM 模型,以丰、平、枯典型年所对应的指标集作为输入数据,采用最大似然估计对结构模型变量间的假设关系进行检验,检验结果如表 7 所示。其中 S.E. 为结构模型各潜变量间标准回归系数, P 为显著性

水平。由此可知,1962 年及 1981 年的 GS-ST 未通过检验,即拒绝假设 H_7 及 H_8 ,其余各路径均通过了 $P<0.05$ 的显著性检验,即可以接受其余所有既定假设。图 8 为不同典型年发电-供水-生态计算结果图,在所有测量模型中,各观测变量与潜变量的路径系数均大于 0.5,表明观测变量与潜变量间互信息较多,均为影响相应潜变量的关键变量,即所选指标对于目标的表征效果较好。

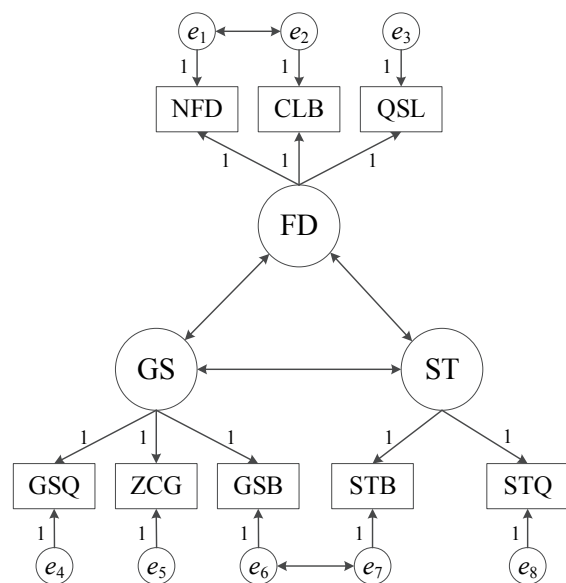


图 7 修正后发电-供水-生态 SEM 模型

Fig. 7 Modified SEM of power generation-water supply-ecology

表 7 样本总体模型假设检验结果

Table 7 Hypothesis test results of overall model

典型年	作用路径	S.E.	P	检验结果
1962 (丰)	FD-GS	-0.38	0.002	接受
	FD-ST	-0.18	0.039	接受
	GS-ST	-0.05	0.372	拒绝
1981 (平)	FD-GS	-0.51	0.002	接受
	FD-ST	-0.24	0.009	接受
	GS-ST	-0.13	0.147	拒绝
1984 (枯)	FD-GS	-0.70	<0.001	接受
	FD-ST	-0.32	0.003	接受
	GS-ST	-0.20	0.048	接受

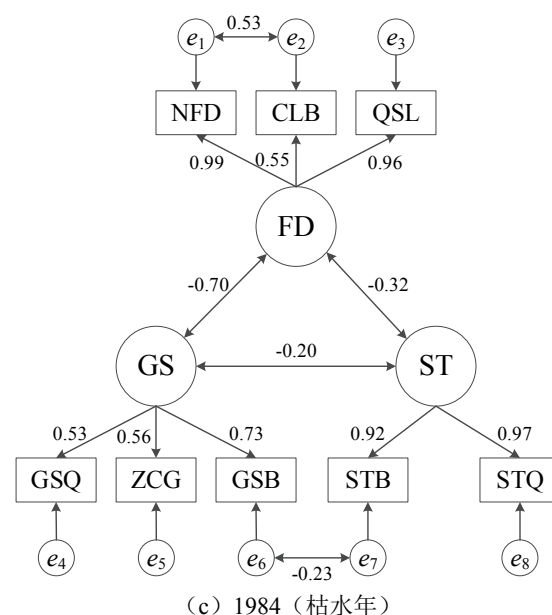
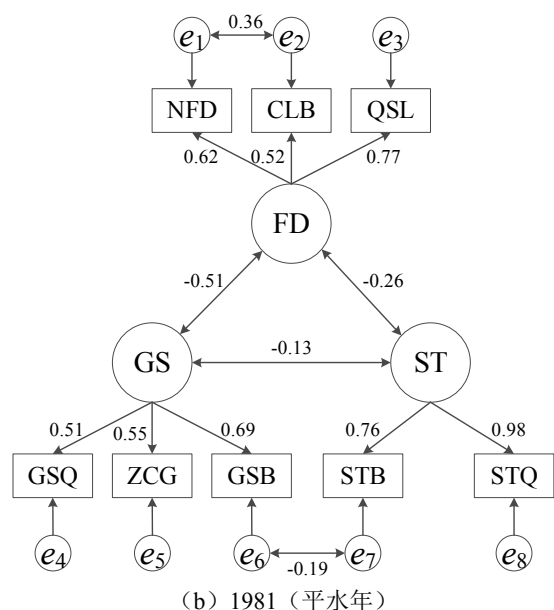
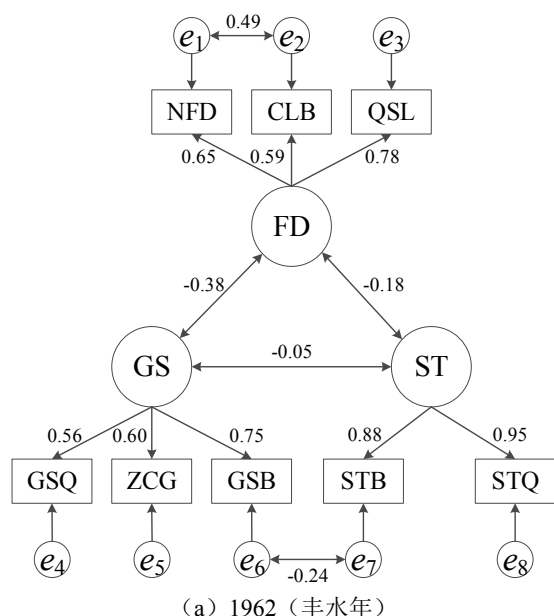


图 8 发电-供水-生态互馈关系计算结果

Fig. 8 Calculation results of power generation-water supply-ecology mutual relationships

根据显著性检验结果, 只有丰水年及平水年供水与生态间矛盾并不显著, 其余路径均存在显著冲突。由此可知, 在不同典型年中发电-供水-生态三者间均存在竞争关系, 其综合效益此消彼长。总体而言, 发电与供水目标间矛盾冲突最剧烈, 发电与生态次之, 而供水与生态间的矛盾冲突最小。通过多目标 SEM 模型计算实现了不同典型年各目标间的互馈关系的量化。

就发电与供水而言, 丰、平、枯三种典型年二者间标准回归系数分别为-0.38、-0.51、-0.70, 均呈现显著的负相关关系, 且制约关系逐渐增强。原因在于, 溪洛渡-向家坝梯级下游供水流量需求较大, 而满足供水要求需要不断消落库区水位, 从而影响发电水头, 造成发电效益下降。丰水年来流偏大且水库平均水位高, 发电机组运行效率高, 下泄水量大, 在满足发电要求的同时大部分水量可以供给下游用水区域, 从而缓解了二者间的矛盾; 平水年和枯水年水库蓄水率较低, 且下泄流量偏小, 在扣除河道生态流量的前提下, 供水保证率下降, 供水破坏历时及破坏深度增加, 从而加剧了发电与供水间的竞争性。通过比较三个标准化回归系数可发现, 由丰水年至平水年的系数变化为-0.13, 变化程度小于平水年至枯水年的-0.19。图 9 为不同典型年旬平均流量过程, 图中黑色虚线为 9 月 15 日, 即主汛期与后汛期的分界线^[23], 由图中可以看出,

1984 年的后汛期旬平均流量相较于 1962 及 1981 年大幅下降, 后汛期是水库蓄水的关键时期, 此时天然来流偏枯会导致汛末蓄水量不足, 发电量的增长要求水库抬高运行水位, 而下游取水要求水库不断消落运行水位, 二者间矛盾进一步激化, 从而导致其标准回归系数变化显著。

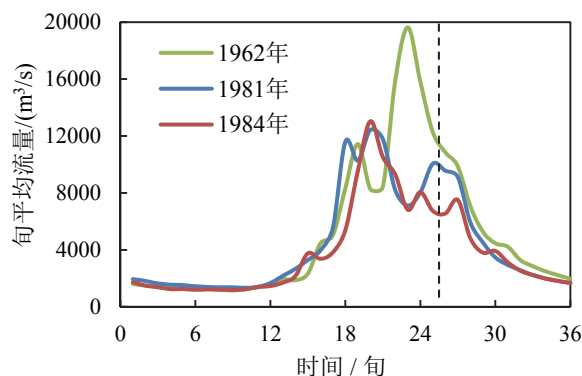


图9 不同典型年旬平均流量过程

Fig. 9 Ten-day averaged flow processes for different typical years

就发电与生态而言, 丰、平、枯不同典型年的标准回归系数分别为-0.18、-0.24、-0.32, 呈现出较为显著的负相关关系, 且随着天然来流的减小, 冲突逐渐锐化。原因在于, 来流偏枯时水库为抬升运行水位, 减小了下泄流量, 从而影响了河道生态系统的稳定性; 而实现更大的生态效益则需要牺牲电站运行水头, 从而造成发电效益下降, 因此两目标竞争关系明显。但在所有典型年其矛盾冲突均弱于发电-供水。究其原因, 本文多目标优化调度模型求解过程中依据 Tennant 法^[24], 取多年平均天然流量的 10% 作为生态基流量, 且为了保证河道内生态系统稳定性, 设置水库下泄流量优先满足生态需水, 因此, 生态保证率相对较高, 缺水量也相对较少, 使其与发电目标的竞争关系弱于发电-供水。同理, 发电与生态间的标准回归系数随来流减少变化较均匀, 枯水年也并未呈现显著变化趋势。

相较于发电-供水、发电-生态, 供水-生态的标准回归系数绝对值最小, 丰、平、枯典型年分别为-0.05、-0.13、-0.20, 在丰水年及平水年其虽有一定的矛盾关系, 但并不显著, 枯水年竞争性相对增强。当来流偏大时, 河道生态基流量较小, 所以生态保证率较高, 缺水量少, 生态效益相对更容易实现增长, 此时水库下泄流量除维持生态流量外亦可满足部分甚至全部的下游需水, 供水效益及生态效益均得以提升, 仅少数时段可能产生供水破坏, 二

者间竞争性并不强烈, 因此其互馈关系检验结果并不显著。但是, 当来流偏枯时, 下泄水量在满足生态流量之余, 难以完全提供下游的生产生活用水, 致使供水的可靠性降低, 脆弱性增强, 供水效益下降。总体而言, 供水-生态互馈关系的回归系数变化梯度较小, 并未出现陡升或陡降的趋势, 二者的互馈关系在不同的外部条件下变化相对比较平稳。

4 结论

为分析梯级水库丰、平、枯不同典型年中发电-供水-生态间互馈关系, 本文建立了溪洛渡-向家坝多目标优化调度模型, 采用 NSGA-II 算法进行求解, 并针对多目标互馈关系提出初步假设, 进而引入结构方程模型进行高维验证性因子分析, 以非劣解集所对应各指标值作为输入数据, 实现了不同来流情况下多目标互馈关系的定量化计算, 得出以下几点结论:

(1) 梯级水库多目标问题涉及因子众多, 相较于传统统计方法而言, 通过 SEM 进行因子分析可全面考量目标中各指标所包含的信息, 并针对目标间互馈关系给出可视化、定量化的计算结果, 便于研究者对水库系统内部的多目标相互作用机理进行更深入的分析, 进一步促进多目标综合效益发挥的协调性及可持续性。

(2) 溪洛渡-向家坝梯级水库计算实例表明, 在不同典型年中, 发电-供水-生态三者间均存在竞争关系, 随着天然来流由丰变枯, 其矛盾逐渐锐化。其中, 发电-供水冲突最剧烈, 其次为发电-生态, 而供水-生态互馈关系与其他二者相比并不显著。

(3) 受枯水年后汛期来流过程影响, 发电-供水的标准回归系数陡降, 相对于从丰水年到平水年的变化梯度而言, 其冲突进一步加剧。而发电-生态及供水-生态的互馈关系在丰、平、枯不同的外部条件下变化平稳。

参考文献 (References)

- [1] 黄草, 王忠静, 李书飞, 等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 I: 模型原理及求解[J]. 水利学报, 2014, 45(9): 1009-1018.
HUANG Cao, WANG Zhongjing, LI Shufei, et al. A multi-reservoir operation optimization model and application in upper Yangtze River Basin I: Principle and solution of the model [J]. Journal of Hydraulic

- Engineering, 2014, 45(9): 1009-1018. (in Chinese)
- [2] 方国华, 丁紫玉, 黄显峰, 等. 考虑河流生态保护的水电站水库优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(7): 1-9.
FANG Guohua, DING Ziyu, HUANG Xianfeng, et al. Optimization of hydropower reservoir operation considering river ecological protection [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(7): 1-9. (in Chinese)
- [3] 胡振鹏, 冯尚友. 丹江口水库运行中防洪与兴利矛盾的多目标分析[J]. 水利水电技术, 1989(12): 42-48.
HU Zhenpeng, FENG Shangyou. Multi-objective analysis of the contradiction between flood control and prosperity in the operation of Danjiangkou Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1989(12): 42-48. (in Chinese)
- [4] YAZDI J, MORIDI A. Multi-Objective differential evolution for design of cascade hydropower reservoir systems [J]. Water Resources Management, 2018, 32(14): 4779-4791.
- [5] 王煜, 彭少明, 郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 614-624
WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang. Key scientific issues of water allocation plan optimization and comprehensive operation for Yellow River basin [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 614-624. (in Chinese)
- [6] 杨光, 郭生练, 李立平, 等. 考虑未来径流变化的丹江口水库多目标调度规则研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(12): 54-63.
YANG Guang, GUO Shenglian, LI Liping, et al. Multi-objective operation rules for Danjiangkou Reservoir under future runoff changes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(12): 54-63. (in Chinese)
- [7] 陈悦云, 梅亚东, 蔡昊, 等. 面向发电、供水、生态要求的赣江流域水库群优化调度研究[J]. 水利学报, 2018, 49(5): 628-638.
CHEN Yueyun, MEI Yadong, CAI Hao, et al. Multi-objective optimal operation of key reservoirs in Ganjiang River oriented to power [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(5): 628-638. (in Chinese)
- [8] 吕巍, 王浩, 殷峻暹, 等. 贵州境内乌江水电梯级开发联合生态调度[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 918-927.
LV Wei, WANG Hao, YIN Junxian, et al. On ecological operation of cascade hydropower stations along Wujiang River in Guizhou province [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(6): 918-927. (in Chinese)
- [9] 金文婷, 王义民, 白涛, 等. 枯水年引汉济渭并联水库多目标调度及决策[J]. 水力发电学报, 2019, 38(2): 68-81.
JIN Wenting, WANG Yimin, BAI Tao, et al. Multi-objective operation and decision making of parallel reservoirs for Hanjiang-to-Weihe water diversion project in dry years [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(2): 68-81. (in Chinese)
- [10] VAN R M M, WALTER M, MAROESJKA V N, et al. Social information processing skills link executive functions to aggression in adolescents with mild to borderline intellectual disability [J]. Child Neuropsychology, 2018: 1-26.
- [11] 彭丽, 黄成, 龙诗杰, 等. 基于微信平台的中老年用户群体食品安全信息采纳意愿研究[J]. 现代预防医学, 2019, 46(4): 641-645.
PENG Li, HUANG Cheng, LONG Shijie, et al. Research on willingness to adoption of food safety information for middle-aged and elderly users' in WeChart platform [J]. Modern Preventive Medicine, 2019, 46(4): 641-645. (in Chinese)
- [12] 成思敏, 王继军, 郭满才, 等. 基于结构方程模型的陕北退耕区农业产业-资源系统耦合机制分析: 以吴起县为例[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1165-1178.
CHENG Simin, WANG Jijun, GUO Mancai, et al. Analysis of the coupling mechanism of agricultural industry resources system in de-farming regions of northern Shaanxi Province based on structural equation model: A case study of Wuqi County [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(7): 1165-1178. (in Chinese)
- [13] SÁNCHEZ-OLIVA D, MORIN A J S, TEIXEIRA P J, et al. A bifactor exploratory structural equation modeling representation of the structure of the basic psychological needs at work scale [J]. Journal of Vocational Behavior, 2017, 98: 173-187.
- [14] 崔丹, 李瑞, 陈岩, 等. 基于结构方程的流域水环境承载力评价: 以湟水流域小峡桥断面上游为例[J]. 环境科学学报, 2019, 39(2): 624-632.
CUI Dan, LI Rui, CHEN Yan, et al. An evaluation of the

- water environmental carrying capacity using structural equation modeling: A case study of the upstream areas of Xiaoxia Bridge Section in Huangshui River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(2): 624-632. (in Chinese)
- [15] 孙才志, 吴永杰, 刘文新. 基于 DPSIR-PLS 模型的中国水贫困评价[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 1079-1088. SUN Caizhi, WU Yongjie, LIU Wenxin. Application of DPSIR-PLS model to analyze water poverty in China [J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(5): 1079-1088. (in Chinese)
- [16] 肖新成, 何丙辉, 倪九派, 等. 农业面源污染视角下的三峡库区重庆段水资源的安全性评价: 基于 DPSIR 框架的分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2324-2331. XIAO Xincheng, HE Binghui, NI Jiupai, et al. Safety assessment of water resources in Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area based on DPSIR model from the perspective of agricultural non-point pollution source [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8): 2324-2331. (in Chinese)
- [17] 王学敏, 陈芳, 张睿. 溪洛渡、向家坝水库汛期运行水位上浮空间研究[J]. 人民长江, 2018, 49(13): 52-58. WANG Xuemin, CHEN Fang, ZHANG Rui. Study on operational water level rising space of Xiluodu-Xiangjiaba cascade reservoirs in flood season [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(13): 52-58. (in Chinese)
- [18] 方红远, 程吉林, 陈平, 等. 干旱期水资源系统供水风险指标适用性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2006(4): 1-5. FANG Hongyuan, CHENG Jilin, CHEN Ping, et al. Analysis on the applicability of water-supply risk indexes for water resources system during drought period [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2006(4): 1-5. (in Chinese)
- [19] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computing*, 2002, 6(2): 182-197.
- [20] 温少雄, 周伟, 李少林, 等. 基于 NSGA-II 算法的堆石坝多目标参数反演方法[J]. 水力发电学报, 2017, 36(1): 86-95. WEN Shaoxiong, ZHOU Wei, LI Shaolin, et al. Multi-objective parameter inversion of rockfill dams based on NSGA-II algorithm [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(1): 86-95. (in Chinese)
- [21] 丁丽萍, 帅传敏, 李文静, 等. 基于 SEM 的公众太阳能光伏发电认知和采纳意愿的实证研究[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1414-1423. DING Liping, SHUAI Chuanmin, LI Wenjing, et al. Empirical study on the public's cognition and willingness to adopt solar photovoltaic power generation based on a SEM model [J]. *Resources Science*, 2015, 37(7): 1414-1423. (in Chinese)
- [22] 胡芳肖, 张美丽, 李蒙娜. 新型农村社会养老保险制度满意度影响因素实证[J]. 公共管理学报, 2014, 11(4): 95-104. HU Fangxiao, ZHANG Meili, LI Mengna. Empirical research on the influence factors of the new rural endowment insurance system satisfaction based on the SEM [J]. *Journal of Public Management*, 2014, 11(4): 95-104. (in Chinese)
- [23] 秦智伟, 戴明龙, 陈炼钢, 等. 三峡水库汛期分期洪水特征及成因研究[J]. 人民长江, 2018, 49(22): 1-6. QIN Zhiwei, DAI Minglong, CHEN Liangang, et al. Study on staged flood characteristics and climatic causes for flood of Three Gorges Reservoir [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(22): 1-6. (in Chinese)
- [24] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. *Fisheries*, 1976, 1(4): 6-10.

(责任编辑: 尚松浩)