

## 考虑碳减排的水库多目标提前蓄水调度研究\*

宁志昊, 周研来\*\*, 林凡奇, 周颖, 罗琪

(武汉大学, 水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 针对当前的水库提前蓄水调度研究尚未考虑碳减排问题, 本文基于水库碳排放和有机碳埋藏因子法, 构建了考虑碳减排的水库提前蓄水调度模型, 采用基于熵权重的逼近理想解排序法(TOPSIS)对提前蓄水调度方案进行了多目标评价, 以优选调度方案, 在三峡水库开展了实例研究。研究结果表明: 三峡水库从9月1日起蓄, 于9月30日逐步蓄至167 m的调度方案最优, 相较于原设计方案, 在不增加防洪风险的前提下, 多年平均发电量增加29.91亿kW·h(8.80%), 弃水量减少26.03亿m<sup>3</sup>(27.51%), 碳排放量减少69.26亿g(3.94%), 有机碳埋藏量增加1.93亿g(1.28%), 温室气体的CO<sub>2</sub>碳当量减少235.48亿g(3.85%), 提前蓄水方案可显著提升三峡水库发电量、供水保障能力和减少碳排放量。本研究为水库提前蓄水的水碳协同调度提供了技术支持。

**关键词:** 提前蓄水; 碳通量; 水碳调度; 逼近理想解排序法; 三峡水库

## A multi-objective reservoir impoundment scheme considering carbon flux management\*

Ning Zhihao, Zhou Yanlai\*\*, Lin Fanqi, Zhou Ying & Luo Qi

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China)

**Abstract:** The existing studies on reservoir impoundment have not paid attention to carbon flux management. Based on reservoir carbon emission-factor and organic carbon burial-factor approaches, this study proposed a multi-objective reservoir impoundment model considering carbon flux management. The technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) based on entropy weights was adopted to conduct a multi-objective evaluation for impoundment schemes. A case study was carried out in the Three Gorges Reservoir (TGR) located at the Yangtze River. The investigation results showed that the best scheme was impounding water continuously from 145 m on September 1 to 167 m on September 30. Compared to the existing impoundment scheme (i.e., standard operation policy), the optimal schemes could increase 2.991 billion kW·h (8.80%) hydropower output and decrease 2.603 billion m<sup>3</sup> (27.51%) spilled water without increasing the risk of flood control. Carbon emissions could decrease by 6.926 billion g (3.94%), and organic carbon burials raise by 193 million g (1.28%). CO<sub>2</sub>-equivalent of greenhouse gases could decrease by 235.48 billion g (3.85%). The advanced impoundment operation schemes can significantly improve the power generation and water supply security of TGR, and can largely reduce carbon emissions. This study provides technical support for reservoir water-carbon synergetic optimization.

**Keywords:** Impoundment operation; carbon flux; water-carbon operation; TOPSIS; Three Gorges Reservoir

在强人类活动影响和全球气候变暖的背景下, 为加快实现“双碳”目标, 多数国家都在推动清洁能源发展。水力发电常被认为是一种清洁能源, 但2000年Louis等的研究表明水库在全球尺度上是一个重要的碳源<sup>[1]</sup>。水库的建造和投运会淹没大量陆地有机物, 减缓河流流速并阻碍碳、氮等营养物质的流动, 对流域原有水循环过程造成显著影响, 改变了水库中微生物的生化活动<sup>[2]</sup>。相较天然水体, 水库中自养生物呼吸、异养生物分解、硝化及反硝化等过程造成CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>以及N<sub>2</sub>O等温室气体的排放量更大。水库水位周期性消涨形成的消落带会影响CO<sub>2</sub>的排放, 有研究表明, 随着水库消落带面积的增加而暴露出的干燥水生沉积物会释

\* 2023-02-06 收稿; 2023-07-04 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2021YFC3200303)资助。

\*\* 通信作者; E-mail: yanlai.zhou@whu.edu.cn。

放大量的  $\text{CO}_2$  [3]。同时,水库也具有显著的碳汇属性,有机碳埋藏能力较高,在碳通量计算中需要受到重视 [4],且三峡水库等发电水库所带来的大量水电清洁能源为碳减排做出了巨大推动作用 [5]。水库提前蓄水等调度方式会影响消落带面积的变动,从而影响水库碳通量。近年来,关于水库碳通量测量与计算研究已成为学术前沿和热点问题,学者们围绕水库碳排放和有机碳埋藏因子开展了相关研究工作,为水库碳通量计算提供了重要参考依据 [4,6]。

目前,许多学者针对单个水库及水库群蓄水问题开展了研究,并取得了丰富成果。彭杨等 [7] 在水库防洪、发电及航运调度的基础上,对三峡水库最优蓄水时机和方式进行了多目标决策;李雨等 [8] 在已有方案基础上,拟定了多组三峡水库提前蓄水方案,进行了防洪风险及效益分析计算,并开展了提前蓄水方案的优选;周研来等 [9] 以溪洛渡—向家坝—三峡梯级水库为例,推求了可权衡防洪与兴利之间矛盾的梯级水库联合蓄水方案;张为等 [10] 采用实测资料分析法和理论分析法,对梯级水库蓄水后三峡水库洪峰沙峰异步特性变化进行了分析;郭生练等 [11] 综述了水库群汛末提前蓄水调度的研究进展和存在的问题,指出提前蓄水可显著增加水库群年均发电量,并提高水库群的汛末蓄满率及水资源利用率。作为清洁能源,水力发电量的增加对于多能源系统的碳排放降低起到积极作用。同时,也有学者围绕水库碳排放开展了相关研究。Chen 等 [12] 研究测量了三峡消落带区域及三峡水体表面的  $\text{CH}_4$  排放;Zhu 等 [13] 研究测量了三峡水库  $\text{N}_2\text{O}$  排放随时间及空间的变化,发现三峡  $\text{N}_2\text{O}$  的排放主要随时间变化,随空间变化较小;Zhou 等 [14] 研究测量了三峡水库消落带不同区域的温室气体排放。三峡水库建成前的清库工作有效减少了蓄水后淹没区有机质降解与温室气体释放,其  $\text{CH}_4$  释放通量在全球案例中总体偏低 [15]。以上研究为水库碳通量计算提供了重要参考,但目前尚无考虑碳减排的水库蓄水调度研究,亟待开展针对碳减排的水库蓄水调度、水碳协同调度等研究。

针对当前水库提前蓄水调度研究尚未考虑碳减排问题,本文基于水库碳排放和有机碳埋藏因子法,构建考虑碳减排的水库提前蓄水调度模型,采用基于熵权重的逼近理想解排序法(TOPSIS)对提前蓄水调度方案进行多目标评价,以优选调度方案,在三峡水库开展实例研究,为实现水库提前蓄水的水碳协同调度提供技术支撑。

## 1 考虑碳减排的水库提前蓄水调度模型

本文构建了考虑碳减排的水库提前蓄水调度模型,该模型由提前蓄水调度模块、碳通量计算模块、多目标评价模块 3 部分组成。通过提前起蓄时间和抬升蓄水调度线的方式,拟定不同提前蓄水方案,经由考虑碳减排的水库提前蓄水调度模型分析评估,优选水库提前蓄水方案。3 个模块的计算原理分述如下。

### 1.1 提前蓄水调度模块

该模块包含防洪风险计算和综合效益计算两个子模块 [8,9]。防洪风险计算模块首先选取典型年,并对典型洪水过程进行同频率放大,通过调洪演算,计算不同频率分期设计洪水的坝前最高安全水位,结合各提前蓄水方案模拟调洪水位求解风险率及风险损失率。

风险率用作评估蓄水方案发生非期望事件的概率,选取  $N$  年的历史实测日径流资料,按照拟定各提前蓄水方案进行模拟调度,计算各年份调度期的水库水位序列,若某年份水位序列中有超过相应时段坝前最高安全水位值时,则将该年记作破坏年份,统计总破坏年数  $n$ ,即可求得该重现期分期设计洪水风险率  $R_f$ ,其数学表达式为  $R_f = n/N$ 。

风险损失率  $R_s$  用作评估非期望事件发生情况下所造成的破坏程度。令破坏年份的最大破坏水位  $Z_{fmax}$  和相应时刻的坝前最高安全水位  $Z_0$  所对应库容分别为  $V_{fmax}$  和  $V_0$ ,令水库最大调洪库容为  $V_m$ ,风险损失率数学表达式为:

$$R_s = \begin{cases} \frac{(V_{fmax} - V_0)}{(V_m - V_0)}, & V_{fmax} \geq V_0 \\ 0, & V_{fmax} < V_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $V_m - V_0$  为某一重现期下水库抵御分期设计洪水所预留防洪库容;  $V_{fmax} - V_0$  为水库预留防洪库容占用部分;  $R_s \in [0, 1]$ , 当  $R_s = 1$  则表示水库所预留防洪库容全部被占用,此时水库不再具备洪水调蓄功能,下游地区将承担全部洪灾损失,当  $R_s = 0$  时说明水库具备充足预留库容用以调蓄洪水。

综合效益计算模块依据拟定提前蓄水方案,使用长系列水库日径流资料模拟调度,计算年均发电量、弃水量、蓄满率等指标。

## 1.2 碳通量计算模块

该模块的主要功能包括:先模拟分析水库提前蓄水调度过程,然后基于水库碳排放和有机碳埋藏因子法,计算提前蓄水调度的碳通量,最后根据不同气体的全球变暖潜能系数<sup>[16]</sup>计算温室气体通量 CO<sub>2</sub>当量。计算步骤如下:

1) 识别水库碳排放因子与有机碳埋藏因子,包括 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 等温室气体在库水面区域与消落带区域的排放因子<sup>[12-14,17]</sup>以及有机碳在这两个区域的埋藏因子<sup>[18]</sup>。

2) 拟定提前蓄水调度方案,采用长系列入库日径流资料模拟蓄水调度,分析库水位变化,再依据水库的水位—库面积—库容特征曲线推求蓄水调度的库水面面积与消落带面积。

3) 根据步骤 1) 和步骤 2) 所得数据,基于碳排放因子和有机碳埋藏因子法,计算水库蓄水调度的碳通量;考虑温室气体的全球变暖潜能系数<sup>[16]</sup>,计算水库温室气体通量 CO<sub>2</sub>当量。

① 碳通量计算:水库所排放的 3 种主要温室气体中,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>含有 C 元素,因此考虑 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>所含 C 元素质量计算碳通量。2011 年,政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, 简称为“IPCC”) 在《可再生能源与减缓气候变化》特别报告中首次提出了水库温室气体净通量的概念性框架,即水库温室气体净排放量等于蓄水后水库温室气体排放量减去蓄水前的温室气体排放量及其他人类活动对水库温室气体排放量的贡献量。本文模型仅考虑已投入运行的水库通过调度对温室气体排放的影响,因此只对蓄水后温室气体进行估算。国际能源署(International Energy Agency, 简称为“IEA”) 根据 IPCC 框架基础上编写了技术导则,其中对蓄水后温室气体通量的计算公式为水库水—气界面 CO<sub>2</sub>通量、CO<sub>2</sub>过坝下泄消气释放、下游河段 CO<sub>2</sub>通量之和减去水库碳埋藏。三峡水库具有相对较大的水面面积,水—气界面扩散通量是三峡水库温室气体的主要排放途径。受限于监测手段及频次影响,暂无法实测泄洪期间消气释放通量。本文采用碳排放和有机碳埋藏因子法进行温室气体估算,将水库碳通量狭义定义为水库碳排放量减去有机碳埋藏量。计算公式为:

$$\begin{cases} C_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{\text{flux}(i,j)} \\ C_{\text{flux}(i,j)} = C_{\text{emi}(i,j)} - C_{\text{bur}(i,j)} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $C_t$  为水库的多年平均碳通量;  $C_{\text{flux}(i,j)}$  为水库第  $i$  年第  $j$  日的碳通量;  $C_{\text{emi}(i,j)}$  和  $C_{\text{bur}(i,j)}$  分别为水库第  $i$  年第  $j$  日的碳排放量与有机碳埋藏量。

$$\begin{cases} A_{\text{draw}(i,j)} = A_{\text{max}} - A_{\text{surf}(i,j)} \\ A_{\text{surf}(i,j)} = f_{z-v}(Z_{(i,j)}) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $A_{\text{max}}$  为最大水体表面积,为水库正常蓄水位对应的水体面积;  $A_{\text{surf}(i,j)}$  和  $A_{\text{draw}(i,j)}$  分别为水库第  $i$  年第  $j$  日的水体面积和消落带面积,其中  $A_{\text{surf}(i,j)}$  由第  $i$  年第  $j$  日的库水位  $Z_{(i,j)}$  查水位—水体面积—库容曲线得到,消落带面积  $A_{\text{draw}(i,j)}$  等于  $A_{\text{max}}$  减去  $A_{\text{surf}(i,j)}$ 。

$$\begin{cases} C_{\text{emi}(i,j)} = C_{\text{CO}_2(i,j)} + C_{\text{CH}_4(i,j)} \\ C_{\text{CO}_2(i,j)} = A_{\text{surf}(i,j)} \cdot r_{\text{sCO}_2} + A_{\text{draw}(i,j)} \cdot r_{\text{dCO}_2} \\ C_{\text{CH}_4(i,j)} = A_{\text{surf}(i,j)} \cdot r_{\text{sCH}_4} \end{cases} \quad (4)$$

$$C_{\text{bur}(i,j)} = A_{\text{surf}(i,j)} \cdot r_{\text{sbur}} + A_{\text{draw}(i,j)} \cdot r_{\text{dbur}} \quad (5)$$

式中,  $C_{\text{CO}_2(i,j)}$  为水库第  $i$  年第  $j$  日排放的 CO<sub>2</sub> 所含碳元素的质量,由水体表面排放和消落带排放组成;  $C_{\text{CH}_4(i,j)}$  为水库第  $i$  年第  $j$  日排放的 CH<sub>4</sub> 所含碳元素的质量,由于 CH<sub>4</sub> 需要产甲烷菌在厌氧环境下生成,因此只考虑水体以下的 CH<sub>4</sub> 排放,  $C_{\text{CH}_4(i,j)}$  等于水体表面积乘以 CH<sub>4</sub> 碳排放因子;  $r_{\text{sCO}_2}$  和  $r_{\text{dCO}_2}$  分别为水库水体表面和消落带的 CO<sub>2</sub> 碳排放因子<sup>[15,17]</sup>,  $r_{\text{sCH}_4}$  为水库水体表面 CH<sub>4</sub> 碳排放因子<sup>[12]</sup>; 由于水压、空气接触等条件的差异,水体以下及消落带的有机碳埋藏也存在差异,对两种区域的有机碳埋藏分别进行计算,因此  $C_{\text{bur}(i,j)}$  由水体表面积和消落带面积分别乘对应的有机碳埋藏因子再求和得到,  $r_{\text{sbur}}$  和  $r_{\text{dbur}}$  分别为水库水体表面和消落带的

有机碳埋藏因子<sup>[18]</sup>。

② 温室气体通量的 CO<sub>2</sub> 当量计算:在计算温室气体通量的 CO<sub>2</sub> 当量时,除 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 以外还应考虑 N<sub>2</sub>O 的排放。将碳、氮元素通量转化为几种温室气体的通量,再运用全球变暖潜能系数<sup>[16]</sup> 转化为温室气体通量的 CO<sub>2</sub> 当量。CO<sub>2</sub> 当量的计算公式为:

$$\begin{cases} \text{GHG}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \text{CO}_{2\text{eq-flux}(i,j)} \\ \text{CO}_{2\text{eq-flux}(i,j)} = M_{\text{CO}_2(i,j)} + \lambda_M \cdot M_{\text{CH}_4(i,j)} + \lambda_N \cdot M_{\text{N}_2\text{O}(i,j)} - M_{\text{burCO}_2(i,j)} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} M_{\text{CO}_2(i,j)} = C_{\text{CO}_2(i,j)} / m_C \cdot m_{\text{CO}_2} \\ M_{\text{CH}_4(i,j)} = C_{\text{CH}_4(i,j)} / m_C \cdot m_{\text{CH}_4} \\ M_{\text{N}_2\text{O}(i,j)} = N_{\text{N}_2\text{O}(i,j)} / m_N \cdot m_{\text{N}_2\text{O}} \\ M_{\text{burCO}_2(i,j)} = C_{\text{bur}(i,j)} / m_C \cdot m_{\text{CO}_2} \\ N_{\text{N}_2\text{O}(i,j)} = A_{\text{max}} \cdot r_{\text{N}_2\text{O}(i,j)} \end{cases} \quad (7)$$

式中, GHG<sub>t</sub> 为温室气体通量的 CO<sub>2</sub> 当量; CO<sub>2eq-flux(i,j)</sub> 为水库第 *i* 年第 *j* 日温室气体通量的 CO<sub>2</sub> 当量; M<sub>CO<sub>2</sub>(i,j)</sub>、M<sub>CH<sub>4</sub>(i,j)</sub> 和 M<sub>N<sub>2</sub>O(i,j)</sub> 分别为水库第 *i* 年第 *j* 日所排放 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的质量; M<sub>burCO<sub>2</sub>(i,j)</sub> 为水库第 *i* 年第 *j* 日有机碳埋藏量的 CO<sub>2</sub> 当量; λ<sub>M</sub>、λ<sub>N</sub> 分别为 100 年尺度上 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的全球变暖潜能系数<sup>[16]</sup>; N<sub>N<sub>2</sub>O(i,j)</sub> 为水库第 *i* 年第 *j* 日排放的 N<sub>2</sub>O 所含氮元素质量; r<sub>N<sub>2</sub>O(i,j)</sub> 为水库第 *i* 年第 *j* 日 N<sub>2</sub>O 排放因子,有研究表明三峡水库各区域 N<sub>2</sub>O 排放相近,但随时间差异较大,因此 N<sub>2</sub>O 排放区域均采用 A<sub>max</sub>,而 N<sub>2</sub>O 排放因子 r<sub>N<sub>2</sub>O(i,j)</sub> 随时间变化<sup>[13]</sup>; m<sub>C</sub> 和 m<sub>N</sub> 分别为 C 和 N 的原子质量; m<sub>CO<sub>2</sub></sub>、m<sub>CH<sub>4</sub></sub> 和 m<sub>N<sub>2</sub>O</sub> 分别为 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的分子质量。

### 1.3 多目标评价模块

如何协调防洪风险、水资源利用效益、碳通量之间的矛盾,评价起蓄时间提前及控制水位抬升所带来的综合效益,以优选提前蓄水方案是一个多属性决策问题。三峡水库的首要任务是防洪,因此多目标评价时首先舍弃可能增加防洪风险的蓄水方案,仅保留其中一个作为对照方案参评。考虑指标间的独立性,针对防洪风险选取风险率作为评价指标;针对水资源利用效益选取发电量、蓄满率、水能利用率 3 项评价指标;针对碳减排,选取碳通量、温室气体通量的 CO<sub>2</sub> 当量 2 项指标。考虑指标间的关联性,碳密度指标与发电量、碳通量指标紧密相关,本研究将其作为附加评价指标。所选各项指标中发电量、蓄满率、水能利用率为效益型指标,而风险率、碳通量、温室气体通量及碳密度为成本型指标。风险率以外的各指标计算式描述如下:

#### ① 发电量

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q_{e(i,j)} \cdot H_{e(i,j)} \cdot \Delta t \quad (9)$$

式中, *E* 为发电量; η、ρ、g 分别为机组发电效率系数、水密度和重力加速度; Q<sub>e(i,j)</sub>、H<sub>e(i,j)</sub> 为水库第 *i* 年第 *j* 日的发电流量和发电水头。

#### ② 蓄满率

$$R_m = \frac{\#(Z_{(i,\text{end})} = Z_{\text{max}})}{n} \times 100\% \quad (10)$$

式中, R<sub>m</sub> 为蓄满率,为调度期末水库水位达到正常高水位的年数与总模拟年数的比值; Z<sub>(i,end)</sub> 为第 *i* 年调度期末水库水位; Z<sub>max</sub> 为水库正常高水位。

#### ③ 水能利用率

$$R_c = \frac{1}{n} \left[ \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Q_{\text{out}(i,j)} - Q_{\text{s}(i,j)}) \Delta t}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Q_{\text{out}(i,j)} \Delta t} \right] \times 100\% \quad (11)$$

式中, R<sub>c</sub> 为水能利用率,为调度期出库水量与弃水量的差与出库水量比值的年均数值; Q<sub>s(i,j)</sub> 为水库第 *i* 年第 *j* 日的弃水流量。

#### ④ 碳通量,如式(2)所示, C<sub>t</sub> 为水库年均碳通量。

⑤ 温室气体通量  $\text{CO}_2$  当量, 如式(6)所示,  $\text{GHG}_i$  为水库年均温室气体通量  $\text{CO}_2$  当量。

⑥ 碳密度

$$D_c = \frac{C_f}{E} \quad (12)$$

式中,  $D_c$  为碳密度, 为水库年均碳通量与发电量的比值<sup>[19]</sup>。

逼近理想解法(TOPSIS)是一种适合多指标、多方案决策分析的方法, 常被用于水资源多目标评价<sup>[20]</sup>。本文选用熵权法计算权重, 结合 TOPSIS 法对各提前蓄水方案进行评分, 优选最佳方案, 具体计算步骤见附件 I。

## 2 实例研究

### 2.1 三峡水库概况

三峡工程是当今世界上最大的水利枢纽工程, 有防洪、发电、航运及水资源利用等十余种功能, 具备巨大的综合效益。三峡工程建于湖北省宜昌市夷陵区三斗坪镇的长江干流, 控制流域面积约 100 万  $\text{km}^2$ 。1994 年 12 月三峡开工建设, 2003 年 6 月首次蓄水、进入围堰挡水发电期的三峡工程初步产生效益, 2010 年 7 月 26 台三峡电站机组顺利完成满负荷连续运行试验并于同年 10 月首次达到 175 m 正常蓄水位, 2020 年 11 月完成整体竣工验收, 自 2008 年以来, 已持续开展 175 m 试验性蓄水 14 次。三峡水库总库容 393 亿  $\text{m}^3$ , 正常蓄水位 175 m, 形成总面积 1084  $\text{km}^2$  的人工湖泊, 汛限水位 145 m, 防洪库容 221.5 亿  $\text{m}^3$ 。三峡水电站年均发电量为 1000 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$  时, 可减少  $\text{CO}_2$  排放量达 800 亿  $\text{kg}/\text{年}$ <sup>[5]</sup>。三峡水库的提前蓄水调度对长江洪水资源化有着推动作用, 可促进长江经济带建设及绿色发展。三峡水库控制流域及其不同调度阶段淹没面积如图 1 所示。图中 145 m 水位淹没区域与 175 m 水位淹没区域的差值即为消落带最大面积区域。

本文依据三峡水库 8 月 20 日—12 月 31 日(1882—2020 年)入库日径流资料进行模拟调度。入流过程经上游水库调蓄后会改变其天然径流特性, 为保证样本序列一致性不被破坏, 需对上游水库蓄水后的径流资料进行还原处理。三峡水库 1882—2002 年入流仅受到二滩水库的调蓄作用, 入流过程受影响较小。2003—2020 年入流受到上游水库群调蓄影响, 长江水利委员会水文局根据水库的水位库容曲线和坝上水位, 采用水量平衡法开展了径流还原计算, 使总体样本序列获得较好的一致性。本文数据来源于水利部长江水利委员会水文局所整编资料, 数据经过三性审查, 为提前蓄水模拟调度提供了可靠资料来源。

### 2.2 提前蓄水方案

防洪调度是三峡水库首要任务, 且设计阶段未考虑长江流域汛末分期特性, 故三峡水库原设计方案(调度图)将起蓄时间设定为 10 月 1 日。《三峡水库优化调度方案》(2009)指出, 三峡水库开始兴利蓄水的的天不不早于 9 月 15 日, 蓄水期间水库水位按照分段控制原则, 在保证防洪安全前提下均匀上升, 9 月 30 日水库水位不超过 158.0 m。此外, 依据《2022 年长江流域水工程联合调度运用计划》(水防[2022]262 号文), 蓄水时间不早于 9 月 10 日, 一般情况下, 9 月底控制水位 162 m, 视来水情况可调整至 165 m。随着长江上游多个梯级水库建成投运, 上游调蓄能力显著增加, 三峡水库有必要开展起蓄时间提前和 9 月底控制水位抬升的提前蓄水调度研究。因此本文基于现有蓄水方案, 结合长江流域汛末分期结论, 通过提前起蓄时间和抬升 9 月 30 日水库蓄水位, 拟定了 15 组蓄水方案(附表 I), 旨在进一步挖掘汛末洪水资源潜力。

### 2.3 分期设计洪水

根据长江汛期洪水的分期特征, 结合拟定的提前蓄水方案, 采用宜昌站 1882—2020 年及部分特大洪水年份的洪水资料, 选取 8 月 20 日、8 月 25 日、9 月 1 日、9 月 5 日、9 月 10 日及 9 月 15 日起的最大日流量、最大 3 d 洪量、7 d 洪量、15 d 洪量和 30 d 洪量做频率计算。使用矩法计算并统计参数初值, 采用 P-III 型曲线适线调整, 确定设计参数。典型洪水的选择原则是从防洪最不利的角度进行选择, 通过对历史实测径流资料的分析, 1952 年洪水汛期最大洪峰达到 54500  $\text{m}^3/\text{s}$ , 峰高量大、洪峰偏后, 并且该场洪水为破坏性较强的多峰型洪水, 因此选取 1952 年洪水作为典型洪水, 分别按  $P=1\%$ 、 $P=0.2\%$ 、 $P=0.1\%$  和  $P=0.01\%$  进行同频率放大, 获得分期设计洪水过程。

### 2.4 防洪调度规则

三峡防洪调度方式有对荆江河段和对城陵矶河段的两种防洪补偿调度方式, 本文为保证提前蓄水防洪

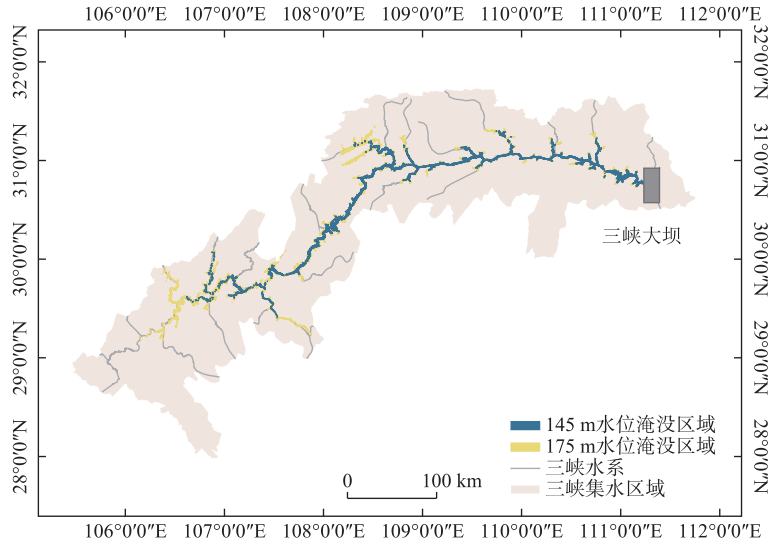


图 1 三峡水库控制流域及三峡水库变动回水区概化图

Fig.1 Sketch of the control basin by the Three Gorges Reservoir and its fluctuant backwater zone

标准,采用对荆江防洪补偿的调度方式。汛末提前蓄水期洪水的洪水量级较之主汛期明显偏小,因此依据汛末设计洪水和全年设计洪水的量级差别,结合三峡现有防洪调度规则,本文按以下方式进行防洪调度:

1)对分期 100 年至 1000 年一遇设计洪水,按全年设计洪水的 100 年一遇洪水标准进行控制,沙市水位按 44.5 m 控制,按补偿枝城流量不超过 56700 m<sup>3</sup>/s 进行防洪补偿调度。

2)对分期 100 年一遇及以下重现期的设计洪水,按全年设计洪水的 20 年一遇洪水标准进行控制,控制沙市水位 43.0~44.5 m 进行防洪补偿调度。

### 2.5 碳通量计算数据来源

作为超大的河道峡谷型水库,三峡水库温室气体通量监测工作涉及水域面积近 1000 km<sup>2</sup>,涵盖了干支流、回水区、消落带等不同景观单元。三峡水库碳通量与温室气体通量计算所用数据集,见附表 II。针对 CO<sub>2</sub> 排放因子,本文分别选用位于水体长期淹没区域及消落带区域的各取样点所测得 CO<sub>2</sub> 平均排放速率<sup>[15,17]</sup>;针对 CH<sub>4</sub> 排放因子,由于产甲烷菌是专性厌氧菌,选用水体表面各取样点所测得 CH<sub>4</sub> 平均排放速率<sup>[12]</sup>;针对 N<sub>2</sub>O 排放因子,Zhu 等<sup>[13]</sup>研究表明三峡水库水体覆盖区域及消落带排放因子接近,以 10 月为分界点分别提取不同时间段的 N<sub>2</sub>O 平均排放速率,N<sub>2</sub>O 不含 C 元素,因此仅计入温室气体通量的 CO<sub>2</sub> 当量中;针对三峡水库有机碳埋藏因子,本文分别选用一座亚热带水库及长江流域河漫滩的有机碳埋藏率来计算三峡水库水体覆盖区域及消落带有机碳埋藏量<sup>[18]</sup>,三峡水库碳通量主要受到 CO<sub>2</sub> 及 CH<sub>4</sub> 的影响,本文模型构建暂未考虑氮氮埋藏。将 IPCC 于 2013 年发布的 3 种主要温室气体在 100 年尺度上的全球变暖潜能系数<sup>[16]</sup>列于附表 II,用于计算温室气体通量的 CO<sub>2</sub> 当量。

## 3 结果及分析

### 3.1 蓄水调度的防洪风险分析

3.1.1 坝前最高安全水位 以 1952 年作为典型年,对三峡各频率分期设计洪水进行调洪演算得到阶梯状坝前最高安全水位。不同起蓄时间下 500 年一遇和 1000 年一遇分期设计洪水的坝前最高安全水位见附表 III。

由附表 III 可知,随着设计洪水分期时间的推迟,坝前最高安全水位呈逐渐上升的趋势,这是由于设计洪水所选分期时间越晚,入库流量越小,此时频率计算所得到的分期设计洪水流量也越小,因此经调洪计算的最高安全水位值更高。另外,随着分期设计洪水重现期的下降,坝前最高安全水位提高,因为重现期更小

的设计洪水所对应的入库流量也会更小,故而调洪所得的坝前最高安全水位也更高。以8月20日起蓄、1000年一遇分期设计洪水的提前蓄水方案为例,从8月20日—9月15日的6种分期设计洪水经调洪所求得的分期防洪限制水位分别为:151.3、154.7、166.6、168.1、170.1、172.2 m,合并交集部分,所得水平阶梯线即为此方案坝前最高安全水位,其余起蓄方案坝前最高安全水位线随起蓄时间的推迟而相应缩短。

3.1.2 防洪风险 采用三峡水库1882—2020年8月20日—9月30日的入库日径流资料,结合各分期设计洪水的坝前最高安全水位,通过防洪风险计算模块求解相关防洪指标,结果如附表IV所示。

根据附表IV可知,随着起蓄时间的推迟,9月1日起及以后起蓄的蓄水方案均不增加防洪风险;当分期设计洪水重现期增大时,各提前蓄水方案所计算风险率及风险损失率也随之增大。附表IV中未展示的9月5日及之后的起蓄方案风险率及风险损失率都为0,100年一遇及以下分期设计洪水蓄水方案的风险率及风险损失率也为0。以1000年一遇的分期设计洪水为例,8月20日和8月25日起蓄并于9月30日蓄至162 m的两方案防洪风险率及风险损失相等,分别为3.60%及36.85%,这是由于对某些大水年份,经过水库的调蓄,水库水位依然始终保持在蓄水控制线以上。8月20日起蓄,9月30日蓄至165和167 m的两种方案防洪风险率则均上升至4.32%。

### 3.2 蓄水调度的效益与碳通量评估

为了全面统计各提前蓄水方案的综合效益及碳通量,将蓄水调度过程分为两部分:①8月20日—9月30日,根据本文拟定的各提前蓄水方案来模拟蓄水调度;②10月1日到12月31日,于10月以前的提前蓄水调度后,在满足各蓄水期约束条件的前提下,以尽可能使三峡水库提前蓄满为目标,进行模拟蓄水调度。采用三峡水库1882—2020年8月20日—12月31日的入库日径流资料模拟蓄水调度,不增加防洪风险的各提前蓄水方案所求结果如附表V所示。

从附表V可知,在综合效益方面,各提前蓄水方案较原设计方案均可增加三峡水库发电量、减少弃水量并提升蓄满率,并且随着起蓄时间的提前和蓄水调度线的抬升,这些方案所带来的效益也会呈增长趋势;在碳减排方面,相比原方案,提前蓄水策略可使三峡水库碳通量及温室气体通量的CO<sub>2</sub>当量显著下降。也就是说随着起蓄时间提前和蓄水调度线抬升,碳通量的减幅也会加大。这是由于本文所拟定方案通过提前起蓄时间和抬升控制水位,使水库运行过程中消落带曝露面积减少且曝露时间缩短,从而显著减少了消落带的CO<sub>2</sub>排放量。以方案901165为例,三峡水库蓄水期多年平均碳通量和温室气体通量CO<sub>2</sub>当量分别减少了68.41亿g(降幅为4.26%)和226.27亿g(降幅为3.69%),减排效果显著。本研究基于碳排放因子和有机碳埋藏因子法评估了提前蓄水调度策略对水库消落带碳通量的影响,并未考虑消落带河滩地土壤厌氧环境下CH<sub>4</sub>的排放过程、河滩地植被生态系统进行自氧呼吸的CO<sub>2</sub>排放过程、植被生态系统进行光合作用的CO<sub>2</sub>吸收过程,因此,未来有必要开展考虑“碳源”和“碳汇”物理过程的水库提前蓄水调度研究,实现对水库温室气体的精细化管理。

### 3.3 调度方案的多目标评价

3.3.1 基于熵权的TOPSIS法多目标评价 三峡工程首要任务为保障中下游的防洪安全,两岸保护对象众多,因此本文优选蓄水方案仅选取一个可能增加防洪风险的方案作为对照。面向不同提前蓄水方案,基于风险率、多年平均发电量、蓄满率、水能利用率、碳通量、温室气体通量CO<sub>2</sub>当量、碳密度指标,采用基于熵权的TOPSIS法进行提前蓄水方案的优选,结果如表1所示。

从表1可以看出,熵权法对风险率指标赋权远高于其他指标,这与防洪任务是三峡水库首要任务相吻合。表中所有提前蓄水方案的水资源利用效益及碳通量指标计算值均优于原设计方案,其中8月25日起蓄并于9月底蓄至167 m的825167方案在这两类指标上均为最佳,但该方案是唯一增加防洪风险的方案,TOPSIS将其评定为最劣方案。901167方案各项水资源利用效益及碳通量指标仅次于825167方案,且不增加防洪风险,TOPSIS将其评定为最优方案。因此,TOPSIS能有效协调防洪风险、水资源利用效益、碳通量之间的矛盾,以优选提前蓄水方案。

根据表1评分结果,最优提前蓄水方案为9月1日起蓄,9月30日蓄至167 m的方案,该方案的发电量为369.6亿kW·h,蓄满率为95.68%,水能利用率为95.80%,碳通量为1534.42亿g,其中碳排放量减少69.26亿g,有机碳埋藏量增加1.93亿g,温室气体通量CO<sub>2</sub>当量为5888.58亿g,碳密度为4.15 g/kW·h,TOPSIS对

其评分为 95.57。除 825167 和原方案外评分最低的 3 个方案依次为 910158、905160 及 901160,可以发现其分别是各起蓄时间蓄水调度线最低的方案,由此可以推断抬升蓄水调度线对水库综合效益的提升及碳通量的减少均有较大影响。

表 1 提前蓄水方案的多目标评价  
Tab.1 Multi-objective evaluation scores of advanced impoundment operation schemes

蓄水方案	风险率/ %	发电量/ ( $\times 10^8$ kW·h)	蓄满率/ %	水能利 用率/%	碳通量/ ( $\times 10^8$ g)	温室气体通量 CO <sub>2</sub> 当量/ ( $\times 10^8$ g)	TOPSIS 得分	得分 排名
指标属性	成本型	效益型	效益型	效益型	成本型	成本型	—	—
指标权重	0.820	0.079	0.048	0.013	0.023	0.017	—	—
原方案	0.00	339.69	89.21	94.29	1605.62	6124.06	64.48	10
825167	3.60	373.93	96.40	96.04	1529.86	5864.07	35.52	11(最劣)
901160	0.00	361.32	94.24	95.60	1555.20	5957.29	86.77	7
901165	0.00	368.35	94.96	95.78	1537.21	5897.79	93.87	2
901167	0.00	369.60	95.68	95.80	1534.42	5888.58	95.57	1(最优)
905160	0.00	359.30	94.24	95.43	1558.57	5968.43	85.27	8
905165	0.00	364.34	94.24	95.57	1545.73	5925.99	89.70	4
905167	0.00	366.06	94.96	95.59	1541.42	5911.73	91.85	3
910158	0.00	354.88	94.24	95.16	1567.98	5999.58	81.29	9
910165	0.00	360.95	94.24	95.30	1552.36	5947.89	87.06	6
910167	0.00	362.27	94.24	95.31	1548.89	5936.42	87.93	5

3.3.2 2019 年蓄水调度实例分析 为直观分析提前蓄水调度对三峡提前蓄满、减少弃水量及减排温室气体等综合效益,选取枯水年 2019 年作为典型年,对蓄水期水库调度全过程进行模拟。以三峡水库 2019 年 9 月 1 日—12 月 31 日入库流量资料为例,分别按 TOPSIS 评分最高的方案 901167、最接近三峡水库现行调度方案的方案 910158 及原方案分别进行模拟调度分析(表 2,图 2),3 种方案均不增加防洪风险。

由表 2 可以看出,相较于原设计方案,方案 901167 发电量增加 22.91 亿 kW·h,增幅为 8.3%,碳通量减少 80.2 亿 g,降幅为 4.95%,水库蓄满时间从 11 月 6 日提前至 10 月 13 日;方案 910158 发电量增加 14.12 亿 kW·h,增幅为 5.11%,碳通量减少 49.49 亿 g,降幅为 3.05%,水库蓄满时间提前至 10 月 28 日。图 2 展示了 2019 年蓄水期 3 种方案的模拟蓄水调度过程,可以看到这些蓄水方案在开始蓄水之前均维持在汛限水位运行,原设计方案于 10 月 1 日开始蓄水,不但使得汛期大量洪水资源成为弃水,蓄水期又因无水可蓄导致水库蓄满日期推迟,长时间的低水位运行也使得消落带暴露并排放出大量的 CO<sub>2</sub>。而在满足防洪安全及下游抗旱补水要求的情况下提前起蓄时间或抬高蓄水调度线的方案则能有效利用三峡汛末洪水资源,既能充分发挥水库的综合效益,又能显著减少三峡水库的碳通量。

表 2 2019 年各提前蓄水方案发电量及碳通量  
Tab.2 Power generation and carbon fluxes of each advanced impoundment scheme in 2019

起蓄方案	项目	发电量/( $\times 10^8$ kW·h)	碳通量/( $\times 10^8$ g)	蓄满日期
原方案	计算值	275.97	1621.09	11 月 6 日
901167	计算值	298.88	1540.89	10 月 13 日
	增量(增幅)	22.91(8.3%)	-80.2(-4.95%)	
910158	计算值	290.09	1571.6	10 月 28 日
	增量(增幅)	14.12(5.11%)	-49.49(-3.05%)	

#### 4 结语

针对当前水库提前蓄水调度研究尚未考虑碳减排问题,本文基于水库碳排放和有机碳埋藏因子法,构



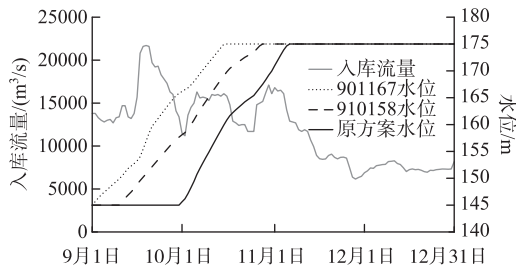


图2 2019年水库蓄水方案的模拟调度过程

Fig.2 The simulated processes of advanced impoundment operation schemes in 2019

亿  $m^3$  减少至 79.95 亿  $\sim$  68.59 亿  $m^3$  (改善率为 15.5%  $\sim$  27.51%), 蓄满率由 89.21% 增长 94.24%  $\sim$  95.68% (改善率为 5.64%  $\sim$  7.25%); 另一方面使碳通量由 1605.62 亿 g 减少至 1567.98 亿  $\sim$  1534.43 亿 g (改善率为 2.34%  $\sim$  4.43%), 温室气体通量  $CO_2$  当量由 6124.06 亿 g 减少至 5999.58 亿  $\sim$  5888.58 亿 g (改善率为 2.03%  $\sim$  3.85%)。

3) 在调度方案优选方面, 9月1日起蓄, 于9月30日水位均匀蓄至 167 m 的方案最优, 相较于原设计方案, 该方案可增加发电量 29.91 亿  $kW \cdot h$  (增幅为 8.80%); 减少弃水量 26.03 亿  $m^3$  (降幅为 27.51%); 蓄满率由原方案 89.21% 提高至 95.68%; 碳通量减少 71.19 亿 g (降幅为 4.43%), 其中碳排放量减少 69.26 亿 g (降幅为 3.94%), 有机碳埋藏量增加 1.93 亿 g (增幅为 1.28%); 温室气体通量  $CO_2$  当量减少 235.48 亿 g (降幅为 3.85%)。

本文构建了考虑碳减排的水库提前蓄水调度模型, 可为实现水库提前蓄水的水碳协同调度提供技术支持。面对实际运行调度阶段, 需考虑不同泄洪调度方式下的过坝下泄消气释放、下游河段温室气体排放等碳源做进一步研究, 此外, 可结合人工智能算法, 开展考虑碳减排的水库汛末蓄水优化调度研究。

## 5 附录

附件 I 及附表 I  $\sim$  V 见电子版 (DOI: 10.18307/2024.0141)。

## 6 参考文献

- [1] St Louis VL, Kelly CA, Duchemin É *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate; Reservoirs are sources of greenhouse gases to the atmosphere, and their surface areas have increased to the point where they should be included in global inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases. *BioScience*, 2000, **50**(9): 766-775. DOI: 10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2.
- [2] Que ZY, Wang XF, Yuan XZ *et al.* Spatial-temporal distribution of carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and eutrophication evaluation of mountainous small river in a cascaded damming. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 1949-1967. DOI: 10.18307/2022.0612. [阙子亿, 王晓锋, 袁兴中等. 梯级筑坝下小型山区河流水体碳氮磷的时空特征及富营养化风险. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 1949-1967.]
- [3] Keller PS, Catalán N, von Schiller D *et al.* Global  $CO_2$  emissions from dry inland waters share common drivers across ecosystems. *Nature Communications*, 2020, **11**: 2126. DOI: 10.1038/s41467-020-15929-y.
- [4] Mendonça R, Müller RA, Clow D *et al.* Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. *Nature Communications*, 2017, **8**: 1694. DOI: 10.1038/s41467-017-01789-6.
- [5] Zhou YL, Guo SL, Chang FJ *et al.* Boosting hydropower output of mega cascade reservoirs using an evolutionary algorithm with successive approximation. *Applied Energy*, 2018, **228**: 1726-1739. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.078.
- [6] Li YC, Qin Y, Yang L *et al.* Estimation and analysis of carbon emissions from the large-and medium-sized reservoirs in the upper reaches of Changjiang River: On the basis of the IPCC National Greenhouse Gas Inventory. *J Lake Sci*, 2023, **35**(1): 131-145. DOI: 10.18307/2023.0108. [李雨晨, 秦宇, 杨柳等. 长江上游大中型水库碳排放量估算与分析: 以 IPCC 国家温室气体清单指南为基础. 湖泊科学, 2023, **35**(1): 131-145.]
- [7] Peng Y, Li YT, Zhang HW. Study on the impounding time and objective decision of the Three Gorges Project at the end of flood period. *Ad-*

建了考虑碳减排的水库提前蓄水调度模型, 采用基于熵权重的逼近理想解排序法 (TOPSIS) 对提前蓄水调度方案进行多目标评价, 以优选调度方案, 在三峡水库开展实例研究, 得出以下主要结论:

1) 在防洪风险方面, 相较于原设计方案, 8月20日及8月25日起蓄的方案均会增加下游防洪风险, 且蓄水时间越早蓄水调度线抬升越高, 防洪风险越大, 8月25日以后起蓄方案将不降低原有防洪标准。

2) 在综合效益与碳通量方面, 相较于原设计方案, 蓄水时间的提前和蓄水调度线的抬升, 一方面使得发电量由 339.69 亿  $kW \cdot h$  增长至 354.88 亿  $\sim$  369.60 亿  $kW \cdot h$  (改善率为 4.47%  $\sim$  8.80%), 弃水量由 94.62

- vances in Water Science*, 2003, **14**(6): 682-689. [彭杨, 李义天, 张红武. 三峡水库汛末蓄水时间与目标决策研究. 水科学进展, 2003, **14**(6): 682-689.]
- [ 8 ] Li Y, Guo SL, Guo HJ *et al.* Flood control risk and benefit of impounding water in advance for the Three Gorges Reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, **30**(1): 8-14. [李雨, 郭生练, 郭海晋等. 三峡水库提前蓄水的防洪风险与效益分析. 长江科学院院报, 2013, **30**(1): 8-14.]
- [ 9 ] Zhou YL, Guo SL, Chen J. Multi-objective decision and joint refill schemes of Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **46**(10): 1135-1144. [周研来, 郭生练, 陈进. 溪洛渡一向家坝—三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究. 水利学报, 2015, **46**(10): 1135-1144.]
- [10] Zhang W, Li X, Ren JQ *et al.* Influence of the impoundment of cascade reservoirs on the asynchronies of flood peak and sediment peak in the Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(4): 481-490. [张为, 李昕, 任金秋等. 梯级水库蓄水对三峡水库洪峰沙峰异步特性的影响. 水科学进展, 2020, **31**(4): 481-490.]
- [11] Guo SL, Chen KB, Liu P *et al.* Optimal joint early refill operation of multi-reservoir system in upper Yangtze River. *Journal of Water Resources Research*, 2017, **6**(5): 415-425. DOI: 10.12677/JWRR.2017.65049. [郭生练, 陈柯兵, 刘攀等. 长江上游水库群提前蓄水联合优化调度研究. 水资源研究, 2017, **6**(5): 415-425.]
- [12] Chen HA, Yuan XZ, Chen ZL *et al.* Methane emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D21): 21306. DOI: 10.1029/2011jd016244.
- [13] Zhu D, Chen H, Yuan XZ *et al.* Nitrous oxide emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir. *Ecological Engineering*, 2013, **60**: 150-154. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.07.049.
- [14] Zhou SB, He YX, Yuan XZ *et al.* Greenhouse gas emissions from different land-use areas in the littoral zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Engineering*, 2017, **100**: 316-324. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.01.003.
- [15] Li Z, Lu LH, Lv PY *et al.* Carbon footprints of pre-impoundment clearance on reservoir flooded area in China's large hydro-projects: Implications for GHG emissions reduction in the hydropower industry. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **168**: 1413-1424. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.091.
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013—The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 659-740.
- [17] Zhao Y, Wu BF, Zeng Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China. *Biogeosciences*, 2013, **10**(2): 1219-1230. DOI: 10.5194/bg-10-1219-2013.
- [18] Mendonça R, Kosten S, Sobek S *et al.* Organic carbon burial efficiency in a subtropical hydroelectric reservoir. *Biogeosciences*, 2016, **13**(11): 3331-3342. DOI: 10.5194/bg-13-3331-2016.
- [19] Almeida RM, Shi QR, Gomes-Selman JM *et al.* Reducing greenhouse gas emissions of Amazon hydropower with strategic dam planning. *Nature Communications*, 2019, **10**(1): 4281. DOI: 10.1038/s41467-019-12179-5.
- [20] Luo JG, Xie JC, Ruan BQ. Fuzzy comprehensive assessment model for water shortage risk based on entropy weight. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, **39**(9): 1092-1097, 1104. [罗军刚, 解建仓, 阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用. 水利学报, 2008, **39**(9): 1092-1097, 1104.]

## (1) 熵权法计算权重

1) 构建指标评价矩阵。

$$R = (r_{k,l})_{m \times n} \quad (1)$$

式中,  $R$ 表示指标评价矩阵;  $r_{k,l}$ 表示第 $k$ 种方案中第 $l$ 个指标值。

2) 对指标评价矩阵作归一化处理。

$$y_{k,l} = \begin{cases} \frac{r_{k,l} - r_l^{\min}}{r_l^{\max} - r_l^{\min}}, & \text{正向指标,} \\ \frac{r_l^{\max} - r_{k,l}}{r_l^{\max} - r_l^{\min}}, & \text{负向指标.} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $y_{k,l}$ 为经过归一化处理的第 $k$ 种方案中第 $l$ 个指标值;  $r_l^{\max}$ 及 $r_l^{\min}$ 分别表示各方案第 $l$ 个指标的最大值和最小值。

3) 求解评价指标熵值。

$$e_l = -\frac{1}{\ln m} \sum_{k=1}^m f_{k,l} \ln(f_{k,l}) \quad (3)$$

$$f_{k,l} = \frac{y_{k,l}}{\sum_{k=1}^m y_{k,l}} \quad (4)$$

式中 $e_l$ 表示第 $l$ 个指标的信息熵。

4) 利用信息熵求解各指标权重。

$$W_l = \frac{1 - e_l}{\sum_{l=1}^n (1 - e_l)} \quad (5)$$

式中 $W_l$ 表示第 $l$ 个指标的熵权。

## (2) TOPSIS 法评分

1) 对指标评价矩阵作标准化处理。

$$z_{k,l} = \frac{r_{k,l}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (r_{k,l})^2}} \quad (6)$$

式中,  $z_{k,l}$ 为经过标准化处理的第 $k$ 种方案中第 $l$ 个指标值。

2) 对各评价指标赋权并求它们与最大值及最小值的加权距离。

$$D_k^+ = \sqrt{\sum_{l=1}^n W_l (z_l^+ - z_{k,l})^2} \quad (7)$$

$$D_k^- = \sqrt{\sum_{l=1}^n W_l (z_l^- - z_{k,l})^2} \quad (8)$$

式中,  $D_k^+$ 及 $D_k^-$ 分别为第 $k$ 种方案与最大值及最小值的距离;  $z_l^+$ 及 $z_l^-$ 分别为经标准化处理的第 $l$ 个指标的最大值及最小值。

3) 计算各方案得分。

$$C_k = \frac{D_k^-}{D_k^+ + D_k^-} \quad (9)$$

式中,  $C_k$ 为第 $k$ 种方案与最优方案的贴近度,  $D_k^-$ 值相对越大, 说明该方案距最劣解越远, 因此调度方案越优。

附表 I 提前蓄水方案集

Attached tab. I Schemes of advanced impoundment operation

起蓄时间	方案编号	控制水位/m						
		8月20日	8月25日	9月1日	9月5日	9月10日	9月20日	9月30日
8月20日	820162	145	147	150	152	154	158	162
	820165	145	147	151	153	155	160	165
	820167	145	148	151	154	156	162	167
8月25日	825162		145	148	150	153	157	162
	825165		145	149	151	154	159	165
	825167		145	149	152	155	161	167
9月1日	901160			145	147	150	155	160
	901165			145	148	151	158	165
	901167			145	149	152	160	167
9月5日	905160				145	148	154	160
	905165				145	149	157	165
	905167				145	149	158	167
9月10日	910158					145	152	158
	910165					145	155	165
	910167					145	156	167

附表II 碳通量与温室气体通量计算数据集

Attached tab.II Data sets for carbon flux calculations

温室气体	碳通量组成				全球变暖潜能系数
	碳排放因子(mg C(N)/(m <sup>2</sup> -d))		有机碳埋藏因子(mg C/(m <sup>2</sup> -d))		
	水体表面	消落带	水体表面	消落带	
CO <sub>2</sub>	1154	1805			1
CH <sub>4</sub>	4.14	0	115	97	34
N <sub>2</sub> O	0.084/0.023	0.084/0.023			298

附表III 三峡水库 1000 年一遇及 500 年一遇分期设计洪水坝前最高安全水位

Attached tab.III The maximum safe water levels of the TGR corresponding to seasonal design floods of 1000 and 500 years

起蓄时间	设计频率	坝前最高安全水位/m					
		8月20日	8月25日	9月1日	9月5日	9月10日	9月15日
8月20日	P = 0.1%	151.3	154.7	166.6	168.1	170.1	172.2
	P = 0.2%	160.8	162.4	168.9	169.9	171.6	173.5
8月25日	P = 0.1%		154.7	166.6	168.1	170.1	172.2
	P = 0.2%		162.4	168.9	169.9	171.6	173.5
9月1日	P = 0.1%			166.6	168.1	170.1	172.2
	P = 0.2%			168.9	169.9	171.6	173.5
9月5日	P = 0.1%				168.1	170.1	172.2
	P = 0.2%				169.9	171.6	173.5
9月10日	P = 0.1%					170.1	172.2
	P = 0.2%					171.6	173.5

附表IV 提前蓄水方案的风险率及风险损失率

Attached tab.IV Flood control risk probabilities and risk losses for advanced impoundment operation schemes

起蓄时间	方案	风险率/%		风险损失率/%	
		$P = 0.1\%$	$P = 0.2\%$	$P = 0.1\%$	$P = 0.2\%$
8月20日	820162	3.60	0.72	36.85	6.96
	820165	4.32	0.72	36.85	6.96
	820167	4.32	0.72	36.85	6.96
8月25日	825162	3.60	0.72	36.85	6.96
	825165	3.60	0.72	36.85	6.96
	825167	3.60	1.44	36.85	6.96
9月1日	901160	0	0	0	0
	901165	0	0	0	0
	901167	0	0	0	0

附表V 提前蓄水方案的多年平均综合效益及碳通量

Attached tab.V Annual mean comprehensive utilization benefits and carbon fluxes of advanced impoundment operation schemes

起蓄时间	方案	项目	发电量/( $\times 10^8$ )	弃水量/( $\times 10^8$ )	蓄满率/%	碳通量/( $\times 10^8$ )	温室气体通量
			kW·h	m		g	CO <sub>2</sub> 当量/( $\times 10^8$ )g
	原方案	计算值	339.69	94.62	89.21	1605.62	6124.06
9月1日	901160	计算值	361.32	72.55	94.24	1555.2	5957.29
		增量(增幅)	21.63(6.37%)	-22.07(-23.32%)	5.03(5.64%)	-50.42(-3.14%)	-166.77(-2.72%)
	901165	计算值	368.35	69.55	94.96	1537.21	5897.79
		增量(增幅)	28.66(8.44%)	-25.07(-26.5%)	5.75(6.45%)	-68.41(-4.26%)	-226.27(-3.69%)
	901167	计算值	369.60	68.59	95.68	1534.43	5888.58
		增量(增幅)	29.91(8.80%)	-26.03(-27.51%)	6.47(7.25%)	-71.19(-4.43%)	-235.48(-3.85%)
9月5日	905160	计算值	359.30	75.44	94.24	1558.57	5968.43
		增量(增幅)	19.61(5.77%)	-19.18(-20.27%)	5.03(5.64%)	-47.05(-2.93%)	-155.63(-2.54%)
	905165	计算值	364.34	73.06	94.24	1545.73	5925.99
		增量(增幅)	24.65(7.26%)	-21.56(-22.79%)	5.03(5.64%)	-59.89(-3.73%)	-198.08(-2.54%)
	905167	计算值	366.06	72.58	94.96	1541.42	5911.73
		增量(增幅)	26.37(7.76%)	-22.04(-23.29%)	5.75(6.45%)	-64.19(-4%)	-212.33(-3.47%)
9月10日	910158	计算值	354.88	79.95	94.24	1567.98	5999.58
		增量(增幅)	15.19(4.47%)	-14.67(-15.5%)	5.03(5.64%)	-37.64(-2.34%)	-124.48(-2.03%)
	910165	计算值	360.95	77.35	94.24	1552.36	5947.89
		增量(增幅)	21.26(6.26%)	-17.27(-18.25%)	5.03(5.64%)	-53.26(-3.32%)	-176.17(-2.88%)
	910167	计算值	362.27	77.17	94.24	1548.89	5936.42
		增量(增幅)	22.58(6.65%)	-17.45(-18.44%)	5.03(5.64%)	-61.07(-3.53%)	-187.64(-3.06%)