

基于系统协调度模型的汛限水位分期控制

冯佳宁¹, 李晓英¹, 张 琰², 张梦仙¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 上海水利工程设计研究院, 上海 200002)

摘 要:为协调防洪与兴利的矛盾, 提高洪水资源化利用效益, 基于改进模糊集方法进行汛期分期, 建立系统协调度模型并计算得到汛限水位的动态控制域。以思林水库为例, 前、后汛期的汛限水位与发电效益协同贡献度成正比, 与防洪风险协同贡献度成反比; 为实现系统协调度最大, 前、后汛期的汛限水位动态控制域应分别为 $[435, 437]$ m 和 $[435, 438]$ m, 前、后汛期可分别增发电量 $2\ 169.907 \times 10^4$ 、 $6\ 509.722 \times 10^4$ kW·h, 水资源利用量可分别提高 0.716×10^8 、 1.079×10^8 m³。研究成果可提高洪水资源化利用效率, 为水库安全合理运行提供参考。

关键词:汛限水位; 汛期分期; 改进模糊集分析法; 动态控制域; 系统协调度

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2024)01-0009-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Staged Control of Flood Limit Water Level Based on System Coordination Degree Model

FENG Jia-ning¹, LI Xiao-ying¹, ZHANG Yan², ZHANG Meng-xian¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shanghai Water Conservancy Engineering Design & Research Institute, Shanghai 200002, China)

Abstract: To coordinate between flood control and profit promotion and enhance the efficient utilization of flood resources, we proposed a stage-based division of flood season using the improved fuzzy set method, and subsequently established a system coordination degree model to calculate the dynamic control domain of flood limit water level. The limit water levels in Silin Reservoir, as an example, in pre-flood season and post-flood season are directly proportional to the synergetic contribution degree of power generation benefit, but inversely proportional to the synergetic contribution degree of flood control risk. To achieve the maximum degree of system coordination, the dynamic control domain of flood limit water level is recommended to be $[435, 437]$ m and $[435, 438]$ m in pre-flood season and post-flood season, respectively. These recommendations would lead to additional electricity generation of $2\ 169.907 \times 10^4$ kW·h and $6\ 509.722 \times 10^4$ kW·h, and an increase in water resources utilization of 0.716×10^8 m³ and 1.079×10^8 m³, during the pre- and post-flood seasons, respectively. The findings of this study contribute to improved flood resource utilization and offer valuable insights for the safe and reasonable operation of reservoirs.

Key words: flood limited level; flood season staging; improved fuzzy set analysis method; dynamic control bound; system coordination degree

0 引 言

我国水资源短缺, 降雨主要集中在汛期。洪水资源利用作为解决水资源短缺的有效途径之一, 对

区域可持续发展具有重要意义^[1]。对汛期进行分期, 确定分期汛限水位是缓解水库防洪与兴利之间的矛盾、实现洪水资源利用的主要方法^[2-3]。

目前, 汛期分期的方法主要包括定性分析和定量分析两类^[4]。其中, 前者的代表方法为成因分析

收稿日期: 2022-09-02; 修回日期: 2022-11-14

基金项目: 湖南省重大水利科技项目(XSKJ2021000-04); 国家重点研发计划项目(2018YFC0407902)

作者简介: 冯佳宁(1999-), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 研究方向为水资源系统规划与动能经济。E-mail: 1608952776@qq.com

通信作者: 李晓英(1978-), 女, 江苏徐州人, 副教授, 博士, 研究方向为水资源系统规划与动能经济。E-mail: lixy3@hhu.edu.cn

法^[5],后者主要包括数理统计法^[6]、相对频率分析法^[7]、圆形分布法^[8]、模糊集分析法^[9]、分形理论^[10]、系统聚类法^[11]和 Fisher 最优分割法^[12]。但以上方法往往存在计算量大、计算复杂、主观性较强等不足。将变异系数法与均值变点法结合的模糊集分析法称为改进模糊集分析法,其考虑多个指标对汛期分期的影响,弥补了传统的模糊集分析法阈值选取的主观性问题^[13]。

为了防洪安全,前汛期汛限水位设置得较低,而后汛期将汛限水位适当抬高以实现兴利效益。对前、后汛期而言,通过多目标决策进行汛限水位动态控制已取得较多成果^[14-16],而基于防洪与兴利目标之间的置换率和系统协调度的汛限水位动态控制鲜有研究。

为此,本文基于思林水库 1957—2018 年共 62 a 的逐日降雨量数据,选取旬总降雨量、旬最大 3 d 降雨量和旬最大 1 d 降雨量 3 个指标,运用改进模糊集分析法进行汛期分期,在此基础上建立基于系统协调度的汛限水位控制多目标决策模型,对思林水库前、后汛期的汛限水位进行发电效益与防洪风险多目标协同分析,为汛限水位动态控制提供理论支撑。

1 改进模糊集分析法的计算步骤

1.1 变异系数法

变异系数法的原理:对于反映对象间差异越大的指标,应赋予其更大的权重;反之,则赋予较小的权重。计算步骤如下^[17]。

(1) 构建样本矩阵 A , 即

$$A = [a_{ij}^p]_{36 \times n} \quad (1)$$

式中 a_{ij}^p 为第 p 年第 i 个旬的第 j 个指标值 ($p=1, 2, \dots, x; i=1, 2, \dots, 36; j=1, 2, \dots, n$)。

(2) 计算指标的变异系数, 即

$$C_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}_j} \quad (2)$$

式中: C_j 为变异系数; σ_j 为第 j 个指标的标准差; \bar{x}_j 为第 j 个指标的均值。

(3) 计算指标的权重, 即

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (3)$$

式中 ω_j 为第 j 个指标的权重。

(4) 计算综合指标, 综合指标考虑多指标信息, 将其作为汛期分期的指标。即

$$y_i^p = \sum_{j=1}^n a_{ij}^p \omega_j \quad (4)$$

式中 y_i^p 为第 p 年第 i 个旬的综合指标。

(5) 确定综合划分指标, 用来描述汛期的起讫。即

$$S = \sum_{j=1}^n \bar{x}_j \omega_j \quad (5)$$

式中 S 为综合划分指标。

1.2 模糊集分析法

1.2.1 隶属度计算

用隶属度表示非汛期与汛期之间相互过渡段的元素对该时期的倾向程度, 将汛期与非汛期期间的模糊性量化^[18]。

本文将 S 作为区分汛期与非汛期的指标, 统计各年综合指标 y_i^p 大于综合划分指标 S 的起始和结束旬, 并作为汛期起始和结束旬, x 年则可得 x 个汛期样本区间, 记为 $[i_0^p, i_1^p]$ 。

统计出旬 i 被该年汛期样本区间覆盖的次数, 由此得旬 i 汛期的隶属频率, 当 x 充分大时, 隶属频率即为隶属度^[19]。即

$$\mu_i = \frac{m}{x} \quad (6)$$

式中: μ_i 为隶属频率; m 为被覆盖的次数。

1.2.2 汛期与非汛期的划分

旬 i 非汛期的隶属度为 $1-\mu_i$, $\mu_i=0.5$ 可作为区分汛期与非汛期的标志^[20]。当 $\mu_i > 0.5$ 时, 为汛期; 当 $\mu_i < 0.5$ 时, 为非汛期; 当 $\mu_i = 0.5$ 时, 为过渡期。

1.2.3 主汛期与非主汛期的划分

主汛期与非主汛期之间由于降雨强度的变化而存在“变点”^[21], 某一有序数列在某时刻发生突变, 该时刻即为变点^[22]。本文选用均值变点法进行分期, 计算步骤如下^[22]。

(1) 有序旬隶属度数值的划分。记 $\{\mu_\alpha\}$ 为有序旬隶属度数列 ($\alpha=g, g+1, \dots, g+f$; g 和 f 分别代表汛期的开始旬和结束旬), 将 $\{\mu_\alpha\}$ 分为 2 组数列, 即 $\{\mu_g, \mu_{g+1}, \dots, \mu_t\}$ 和 $\{\mu_t, \mu_{t+1}, \dots, \mu_{g+f}\}$, 其中 $\mu_t = \max\{\mu_g, \mu_{g+1}, \dots, \mu_{g+f}\}$ 。

(2) 计算统计量 β_t 和 β , 假设在第 α 和 $\alpha+1$ 旬处断开, 即:

$$\beta_t = \sum_{\theta=g}^{\alpha} (\mu_\theta - \bar{\mu}_1)^2 + \sum_{\theta=\alpha+1}^t (\mu_\theta - \bar{\mu}_2)^2 \quad (7)$$

$$\beta = \sum_{\alpha=g}^f (\mu_\alpha - \bar{\mu})^2 \quad (8)$$

$$\gamma = \beta - \beta_t \quad (9)$$

式中: $\bar{\mu}_1$ 、 $\bar{\mu}_2$ 和 $\bar{\mu}$ 分别为有序数列 $\{\mu_g, \mu_{g+1}, \dots,$

$\mu_\alpha\}$ 、 $\{\mu_{\alpha+1}, \mu_{\alpha+2}, \dots, \mu_i\}$ 和 $\{\mu_g, \mu_{g+1}, \dots, \mu_i\}$ 的均值。 $\max\{\gamma\}$ 对应的句即为变点,即主汛期的起始句。

同理,将 $\{\mu_i, \mu_{i+1}, \dots, \mu_{g+f}\}$ 代入即可得主汛期的结束句,由此完成汛期分期。

2 汛限水位风险与效益分析

水资源具有利害双重性,在利用洪水资源时要达到“兴利除害”的目的,随着汛限水位的抬高,尽管兴利效益有所提高,但同时也增加了防洪风险^[23]。因此,本文将发电效益、防洪风险作为目标,考虑二者的协同贡献度置换率信息,基于系统协调度模型,发电效益作为一个子系统,随着汛限水位抬高,协同贡献度不断提高,防洪风险的协同贡献度逐渐下降,当到某一水位后,防洪风险协同贡献度出现大幅下降,此时整个系统协调度出现下降,不能处于较好的协调状态,认为此刻即为系统相对最优。

2.1 效益分析

水库通过抬高汛限水位带来的效益包括水头抬高带来的发电效益、供水效益和蓄水效益^[24]。思林水库是一座以发电为主,兼顾防洪的大型水库,本文仅考虑水头抬高带来的发电效益。

水电站的一个主要动能指标是多年平均发电量,用此来表示发电效益^[25]。其计算公式为

$$E = AQ_{\text{发电}} H_{\text{净}} \Delta T \quad (10)$$

式中: A 为出力系数; $Q_{\text{发电}}$ 为水电站时段发电流量 (m^3/s); $H_{\text{净}}$ 为发电净水头 (m); ΔT 为时段长 (h)。

2.2 风险分析

水库防洪风险计算方法包括频率分析法^[26-27]、均值一次二阶矩法^[28]和随机模拟法^[29]等。本文采用随机模拟法分析水库防洪风险问题。其计算过程为^[30]:①分析实测洪水资料,常用季节性一阶自回归模型模拟;②模拟生成系列洪水过程;③按水库调洪规则进行调洪演算并计算调洪最高水位 Z_m ;④统计调洪最高水位 Z_m 超过极限防洪风险控制指标 Z_d 的次数, k 个汛限水位 $Z_i (i=0, 1, \dots, k)$ 得 k 个极限风险率 $P_{f,i}$, 极限风险率计算公式为

$$P_{f,i} = \frac{L}{M} \times 100\% \quad (11)$$

式中: L 为调洪最高水位 Z_m 大于极限防洪风险控制指标 Z_d 的次数; M 为随机模拟的总次数。

3 多目标协同决策模型的构建

参考文献[31]系统协调度模型的理论方法,对

水库汛限水位进行多目标协同分析,汛限水位控制的多目标问题为

$$\text{Opt} \{V_1(x), V_2(x), \dots, V_q(x)\}^T \quad (12)$$

式中: Opt 为汛限水位与各个目标之间的协同; x 为汛限水位; q 为所考虑的目标个数; $V(x)$ 为确定的汛限水位 x 对应的目标函数。

将目标函数 $V(x)$ 与汛限水位 x 之间的协同贡献度函数 $c_i(x)$ 定义如下。

(1)若 $V_i(x)$ 为发电效益等越大越好的效益型目标函数,则

$$c_i(x) = \begin{cases} 1, & V_i(x) > V_i^H; \\ [V_i(x) - V_i^L] / (V_i^H - V_i^L), & V_i^L \leq V_i(x) \leq V_i^H; \\ 0, & V_i(x) < V_i^L. \end{cases} \quad (13)$$

式中: $c_i(x)$ 为子系统的协同贡献度; $V_i^H(x)$ 为 $V_i(x)$ 的理想值,即汛限水位控制方案内的最高效益; $V_i^L(x)$ 为 $V_i(x)$ 的容忍限,即汛限水位控制方案内的最低效益。

(2)若 $V_i(x)$ 为防洪风险等越小越好的成本型目标函数,则

$$c_i(x) = \begin{cases} 0, & V_i(x) > V_i^H; \\ [V_i^H - V_i(x)] / (V_i^H - V_i^L), & V_i^L \leq V_i(x) \leq V_i^H; \\ 1, & V_i(x) < V_i^L. \end{cases} \quad (14)$$

式中: $V_i^H(x)$ 为 $V_i(x)$ 的容忍限,即汛限水位控制方案内的最高风险; $V_i^L(x)$ 为 $V_i(x)$ 的理想值,即汛限水位控制方案内的最低风险。

定义的协同贡献度函数 $c_i(x)$ 越大表明目标函数 $V(x)$ 与汛限水位 x 之间的协同贡献度越大。

(3)由定义的协同贡献度函数 $c_i(x)$ 可将汛限水位控制决策的多目标问题转化为多目标协同决策模型,即

$$\max \{c_1(x), c_2(x), \dots, c_q(x)\} \quad (15)$$

(4)系统协调度度量系统或系统内部要素之间在发展过程中彼此和谐一致的程度,其从子系统协同贡献度的变化中把握整体系统的协调程度^[32]。子系统即为效益型目标和成本型目标,系统协调度函数为

$$c(x) = 1 - \left\{ \sum_{i=1}^q \omega_i [1 - c_i(x)]^q \right\}^{\frac{1}{q}} \quad (16)$$

式中: $\omega_i \geq 0$; $\sum_{i=1}^q \omega_i = 1$; $c(x)$ 满足 $0 \leq c(x) \leq 1$ 。

(5)置换率为成本型目标函数协同贡献度相对于效益型目标函数协同贡献度的变化率,公式为

$$r_{i,j}(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{c_i(x + \Delta x) - c_i(x)}{c_j(x + \Delta x) - c_j(x)} \quad (17)$$

置换率减小,表明防洪风险在明显增加,而发电效益增加并不明显。分析协同贡献度置换率有助于分析防洪风险与兴利效益之间的关系,为汛限水位动态控制提供参考。

4 实例分析

4.1 研究区概况

思林水库位于乌江中下游贵州省思南县境内(图1),距乌江河口涪陵市366 km。思林水库属 I 等大(1)型工程,其开发任务以发电为主,兼顾防洪等。水库正常蓄水位440 m,调节库容3.17×10⁸ m³,校核洪水位449.45 m,设计洪水位445.15 m,水库总库容15.93×10⁸ m³。电站最大流量1 772.8 m³/s,装机容量1.05×10⁶ kW,多年平均发电量40.64×10⁸ kW·h。

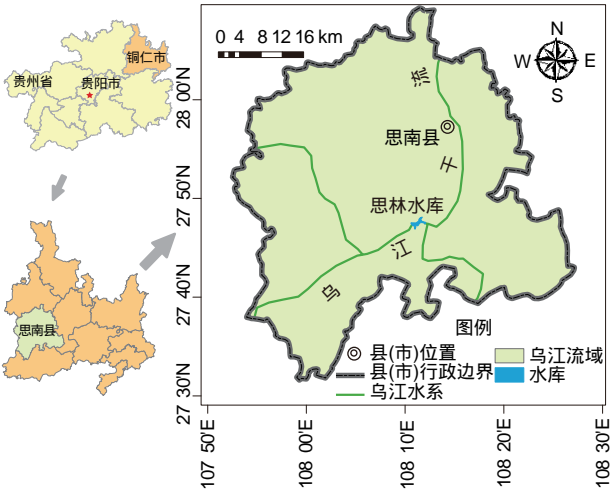


图1 研究对象区位

Fig.1 Location of research area

水库汛限水位435 m,汛期为5—10月份,洪水过程以陡涨陡落为主,5月份大洪水主要发生在下旬,洪水过程的主峰多靠近主汛期。区域内常发生秋旱,9—10月份发生大洪水次数较少,该时段内的洪水多发生在9月下旬—10月上旬,但10月中下旬仍可能发生较大洪水。

4.2 汛期分期的结果

利用思林水库1957—2018年的逐日降雨量资料,选取旬总降雨量、旬最大1 d降雨量和旬最大3 d降雨量3个指标。由式(3)得3个指标的权重依次为0.340、0.336、0.324。由式(4)得研究时段内各个旬的综合指标,限于篇幅,仅列出1957年的数据,见表1。

表1 1957年汛期分期综合指标

Table 1 Values of comprehensive index of flood season staging in 1957

旬序号	旬	综合指标/mm	旬序号	旬	综合指标/mm
1	1上	13.52	19	7上	69.12
2	1中	3.95	20	7中	114.29
3	1下	26.88	21	7下	154.19
4	2上	1.63	22	8上	63.03
5	2中	5.50	23	8中	1.03
6	2下	15.56	24	8下	39.74
7	3上	1.76	25	9上	22.47
8	3中	6.20	26	9中	1.40
9	3下	2.13	27	9下	16.39
10	4上	24.14	28	10上	8.32
11	4中	50.32	29	10中	2.91
12	4下	30.86	30	10下	28.19
13	5上	42.53	31	11上	0.40
14	5中	64.14	32	11中	2.50
15	5下	140.05	33	11下	1.44
16	6上	139.08	34	12上	7.70
17	6中	95.14	35	12中	5.35
18	6下	42.13	36	12下	4.16

注:1上、1中和1下分别表示1月上旬、1月中旬和1月下旬,依此类推。

根据式(5)得综合划分指标为24.08 mm,由式(6)计算得旬隶属度,如表2所示。

表2 1957—2018年汛期分期旬隶属度

Table 2 Ten-day membership degree in flood season staging from 1957 to 2018

旬序号	旬	隶属度	旬序号	旬	隶属度
1	1上	0.000	19	7上	0.778
2	1中	0.022	20	7中	0.822
3	1下	0.022	21	7下	0.889
4	2上	0.000	22	8上	0.844
5	2中	0.067	23	8中	0.778
6	2下	0.022	24	8下	0.756
7	3上	0.044	25	9上	0.533
8	3中	0.111	26	9中	0.556
9	3下	0.378	27	9下	0.556
10	4上	0.400	28	10上	0.533
11	4中	0.422	29	10中	0.511
12	4下	0.444	30	10下	0.511
13	5上	0.533	31	11上	0.422
14	5中	0.556	32	11中	0.111
15	5下	0.578	33	11下	0.111
16	6上	0.756	34	12上	0.067
17	6中	0.778	35	12中	0.022
18	6下	0.800	36	12下	0.000

由表2可以看出,5月上旬—10月下旬的隶属度μ均>0.5。表明思林水库汛期为5月上旬—10月下旬。

采用均值变点法将汛期划分为前汛期、主汛期和后汛期。在汛期区间内,以最大隶属度为端点,将旬隶属度序列划分为2列:5月上旬—7月下旬;

8 月上旬—10 月下旬。由式(7)—式(9)得汛期分期判断图。由图 2(a)可知,在 5 月下旬与 6 月上旬处 γ (统计量 β_i 与统计量 β 差值)达到最大值,即第 15(α)个旬为变点;由图 2(b)可知,在 8 月下旬与 9 月上旬处 γ 达到最大值,即第 24 个旬为变点。

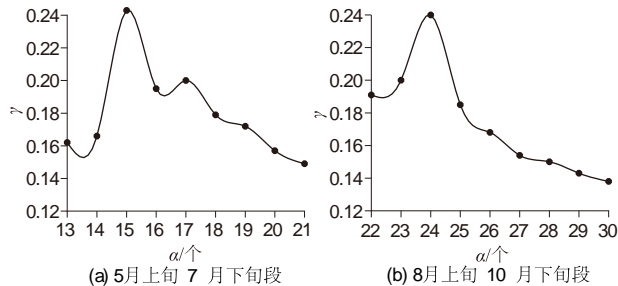


图 2 最优断开旬判断

Fig.2 Determination of optimal ten-day division

以上表明,思林水库前汛期为 5 月上旬—5 月下旬;主汛期为 6 月上旬—8 月下旬;后汛期为 9 月上旬—10 月下旬。

4.3 不同汛限水位控制的风险与效益分析

4.3.1 防洪风险分析

根据思林水库的设计成果,汛期洪水过程以陡涨陡落为主。前汛期设计洪峰流量小于主汛期,但峰高、量大且峰型集中;后汛期设计洪峰流量远小于主汛期且小于前汛期,但起伏较多。选取 1986 年洪峰流量为 $3\,430\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水为前汛期典型洪水过程,选取 2002 年双峰型、主峰靠后、洪峰流量为 $2\,070\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水为后汛期典型洪水过程。

采用季节性一阶自回归模型对前、后汛期洪水特征值进行模拟,随机生成 20 000 次洪水系列,实测和模拟洪水系列的统计参数成果见表 3。

由表 3 可知,实测和模拟洪水系列的统计参数基本一致,说明随机模拟的洪水系列能够反映思林水库洪水总体特征,可用作水库调洪演算。

通过同频率放大法得到前、后汛期的设计洪水过程线,汛限水位动态控制域为 $435\sim 440\text{ m}$ (即汛限水位至正常蓄水位),以 0.5 m 为增量,共 11 个方案,按水库调洪规则进行调洪演算,统计思林水库在

不同分期汛限水位方案下调洪最高水位 Z_m 大于极限防洪风险控制指标 Z_d 的次数,计算得极限风险率,见表 4。

表 4 前、后汛期不同汛限水位方案下的水库极限风险率
Table 4 Ultimate risk rates under different limit water levels in pre-flood season and post-flood season

方案	汛限水位/m	极限风险率/%	
		前汛期	后汛期
1	435.0	0.022	0.015
2	435.5	0.030	0.024
3	436.0	0.042	0.037
4	436.5	0.051	0.047
5	437.0	0.060	0.054
6	437.5	0.095	0.066
7	438.0	0.130	0.072
8	438.5	0.149	0.090
9	439.0	0.180	0.115
10	439.5	0.193	0.151
11	440.0	0.200	0.169

对于以防洪风险为目标的成本型函数,汛限水位为 435 m 和 440 m 时的极限风险率分别为式(14)中的理想值和容忍限,由式(14)计算前、后汛期的防洪协同贡献度,见表 5 和图 3。

表 5 前、后汛期各汛限水位与防洪风险协同贡献度的关系

Table 5 Relationship between limit water level and synergistic contribution degree of flood control risk in pre-flood season and post-flood season

方案	汛限水位/m	防洪风险协同贡献度	
		前汛期	后汛期
1	435.0	1.000	1.000
2	435.5	0.957	0.941
3	436.0	0.887	0.860
4	436.5	0.837	0.794
5	437.0	0.788	0.745
6	437.5	0.589	0.675
7	438.0	0.393	0.634
8	438.5	0.288	0.517
9	439.0	0.114	0.352
10	439.5	0.040	0.119
11	440.0	0.000	0.000

表 3 思林水库实测和模拟洪水系列统计特征值

Table 3 Statistical characteristics of measured and simulated flood series in Silin Reservoir

分期	洪水系列	洪峰流量			$W_{1\text{d}}$			$W_{3\text{d}}$			$W_{7\text{d}}$		
		均值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	C_v	C_s/C_v	均值/ (10^8 m^3)	C_v	C_s/C_v	均值/ (10^8 m^3)	C_v	C_s/C_v	均值/ (10^8 m^3)	C_v	C_s/C_v
前汛期	实测	3 430	0.59	3.50	2.280	0.57	3.50	3.650	0.44	3.50	5.720	0.41	3.50
	模拟	3 400	0.60	3.51	2.182	0.56	3.50	3.661	0.45	3.50	5.724	0.40	3.51
后汛期	实测	2 070	0.87	3.50	1.550	0.88	3.50	3.090	0.83	3.50	4.460	0.72	3.50
	模拟	2 085	0.87	3.49	1.557	0.89	3.50	3.100	0.84	3.52	4.460	0.73	3.50

注: $W_{1\text{d}}$ 、 $W_{3\text{d}}$ 和 $W_{7\text{d}}$ 分别代表最大 1 d 洪量、最大 3 d 洪量和最大 7 d 洪量, C_v 、 C_s 分别为变差系数和偏态系数。

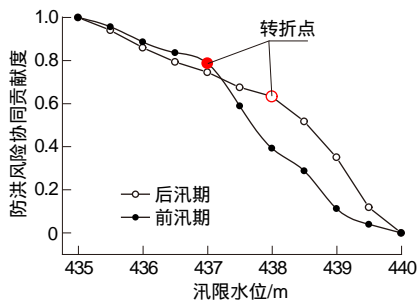


图3 前、后汛期各汛限水位与防洪风险协同贡献度的关系
Fig.3 Relationship between limit water level and synergistic contribution degree of flood control risk in pre-flood season and post-flood season

由表4和表5可知,汛限水位与防洪风险及其协同贡献度之间的关系表现为:随汛限水位的抬高,防洪风险增大,而防洪风险协同贡献度则相反。且当前、后汛期的汛限水位分别达到437 m和438 m时,防洪风险协同贡献度出现明显转折(图3)。

4.3.2 发电效益分析

思林水库是以发电为主、兼顾防洪等目标的大型综合利用水库,调整汛限水位使发电水头等指标相应发生变化,汛限水位的抬高必然带来发电效益的增加。考虑到水库是以发电为主的大型水库,因此以抬高水头而增发的电量表示发电效益。由式(10)可得不同汛限水位下的发电效益(表6)。对于以发电效益为目标的效益型函数,汛限水位为435 m和440 m时的发电效益分别为式(13)中的容忍限和理想值,由式(13)计算前、后汛期的发电效益协同贡献度,见表6和图4。

由表6和图4可知,汛限水位与发电效益及其协同贡献度之间的关系表现为:发电效益及其协同贡献度随汛限水位的抬高而增大。思林水库汛限水位为435 m,由式(13),定义此时发电效益协同贡献度为0。

表6 前、后汛期各汛限水位与发电效益协同贡献度的关系
Table 6 Relationship between limit water level and synergistic contribution degree of power generation benefit in pre-flood season and post-flood season

方案	汛限水位/m	前汛期		后汛期	
		发电效益/ (10 ⁴ kW · h)	协同 贡献度	发电效益/ (10 ⁴ kW · h)	协同 贡献度
1	435.0	0.000	0.000	0.000	0.000
2	435.5	560.559	0.104	1 103.036	0.107
3	436.0	1 084.954	0.211	2 169.907	0.217
4	436.5	1 627.430	0.319	3 254.861	0.326
5	437.0	2 169.907	0.427	4 340.925	0.435
6	437.5	2 715.384	0.534	5 424.768	0.545
7	438.0	3 254.861	0.642	6 509.722	0.654
8	438.5	3 797.338	0.749	7 594.675	0.763
9	439.0	4 339.814	0.857	8 679.629	0.872
10	439.5	4 882.291	0.942	9 764.582	0.953
11	440.0	5 605.594	1.000	11 030.362	1.000

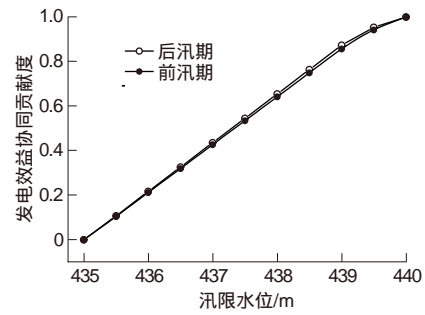


图4 前、后汛期各汛限水位与发电效益协同贡献度的关系
Fig.4 Relationship between limit water level and synergistic contribution degree of power generation benefit in pre-flood season and post-flood season

4.3.3 发电效益与防洪风险的关系分析

利用协同贡献度置换率函数和系统协调度函数,对思林水库进行发电效益和防洪风险间的协同效应分析,以确定汛限水位动态控制域的上限。结合表5和表6,运用式(16)和式(17),计算二者的置换率和系统协调度,见表7和图5。

表7 前、后汛期不同汛限水位与置换率和系统协调度的关系
Table 7 Relations of limit water levels against replacement rate and system coordination degree in pre-flood season and post-flood season

方案	汛限水位/ m	前汛期				后汛期			
		发电效益协同 贡献度	防洪风险协同 贡献度	置换率	系统协调度	发电效益协同 贡献度	防洪风险协同 贡献度	置换率	系统协调度
1	435.0	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
2	435.5	0.104	0.957	-0.418	0.103	0.107	0.941	-0.551	0.106
3	436.0	0.211	0.887	-0.649	0.203	0.217	0.860	-0.743	0.204
4	436.5	0.319	0.837	-0.464	0.300	0.326	0.794	-0.602	0.295
5	437.0	0.427	0.788	-0.458	0.389	0.435	0.745	-0.443	0.381
6	437.5	0.534	0.589	-1.847	0.379	0.545	0.675	-0.640	0.441
7	438.0	0.642	0.393	-1.823	0.295	0.654	0.634	-0.380	0.496
8	438.5	0.749	0.288	-0.976	0.245	0.763	0.517	-1.068	0.462
9	439.0	0.857	0.114	-1.623	0.102	0.872	0.352	-1.514	0.339
10	439.5	0.942	0.040	-0.864	0.038	0.953	0.119	-2.887	0.118
11	440.0	1.000	0.000	-0.686	0.000	1.000	0.000	-2.539	0.000

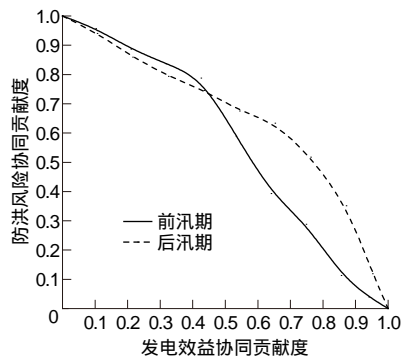


图5 前、后汛期发电效益协同贡献度与防洪风险协同贡献度的关系

Fig.5 Relationship between synergistic contribution degree of power generation benefit and synergistic contribution degree of flood control risk in pre-flood season and post-flood season

综合表4、表6和表7可知,前、后汛期的发电效益及其协同贡献度随汛限水位的增大而增大,防洪风险随汛限水位的增大而增大,但其协同贡献度则呈减小趋势。

调整汛限水位时,不能忽视整个系统的协调性。首先对离散化后的汛限水位控制方案进行发电效益和防洪风险分析。以前汛期为例,表4和表6表明,当汛限水位为437 m时,其发电效益为 $2\,169.907 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,极限风险率为0.060%,抬高水位使发电效益和极限风险率均在增大,此时并不能确定整个系统是否趋于协调。因此,考虑发电效益与防洪风险目标的协同贡献度及置换率信息,得发电效益协同贡献度为0.427,防洪风险协同贡献度为0.788,防洪风险协同贡献度相对于发电效益协同贡献度的变化率为-0.458(负号代表减小),此后抬高汛限水位至437.5 m,防洪风险协同贡献度相对于发电效益协同贡献度的变化率迅速减小至-1.847,表明抬高汛限水位使防洪风险迅速增大,而带来的发电效益并不显著。当汛限水位为437 m时,系统协调度也达到最大,为0.389,与原有汛限水位相比,思林水库前汛期可增发电量 $2\,169.907 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,相对于原设计所增加的水资源利用量为 $0.716 \times 10^8 \text{ m}^3$,抬高汛限水位至437.5 m,系统协调度变为0.379,防洪风险较抬高前增长了59.07%,系统协调性开始降低。因此,最终确定出思林水库安全、经济的前汛期汛限水位动态控制域为[435, 437] m。

同理,当后汛期汛限水位为438 m时,发电效益和防洪风险协同贡献度分别为0.654和0.634,两者间的置换率为-0.380,此后迅速减小至-1.068~-2.539,表明防洪风险迅速增大,发电效益增加并不

明显。当后汛期汛限水位为438 m时,其系统协调度为0.496,达到峰值,与原有汛限水位相比,可增发电量 $6\,509.722 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,增加水资源利用量为 $1.079 \times 10^8 \text{ m}^3$,在一定程度上可缓解贵州东部电网缺电状况。随后抬高汛限水位,防洪风险增长了60.45%,整个系统协调性变差。因此,在保证系统协调度的情况下,确定思林水库后汛期汛限水位动态控制域为[435, 438] m,对充分利用汛期洪水资源具有重要意义。

5 结 论

实现洪水资源化的一个重要途径是科学合理地确定汛限水位动态控制域,使水库调度运行更符合流域洪水特征。以汛期分期为基础,建立基于系统协调度的多目标协同决策模型,得出以下结论:

(1)与传统模糊集方法相比,改进模糊集法将旬总降雨量、旬最大1 d降雨量和旬最大3 d降雨量3个指标构造为一个新的综合指标。采用改进模糊集法进行汛期分期,得出思林水库汛期为5月上旬—10月下旬,前汛期为5月上旬—5月下旬,后汛期为9月上旬—10月下旬。

(2)采用极限风险率代表水库的防洪风险指标,水头抬高带来的发电效益为效益指标,在此基础上构建基于系统协调度的多目标协同决策模型,计算前、后汛期的防洪风险和发电效益协同贡献度、置换率和系统协调度。以思林水库为例,得到前、后汛期的汛限水位动态控制域上限值分别为437、438 m。在保证系统协调的情况下,前、后汛期可分别增发电量 $2\,169.907 \times 10^4$ 、 $6\,509.722 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,前、后汛期水资源利用量分别可提高 0.716×10^8 、 $1.079 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(3)本文仅对系统协调度在单一水库汛限水位控制决策中的应用进行了分析,今后在研究中还需进一步考虑梯级水库群联合运行对汛限水位动态控制域的影响,以提高水库群防洪、发电等综合效益,实现在流域尺度的推广应用。

参考文献(References):

- [1] 冯 峰, 许士国, 刘建卫, 等. 区域洪水资源的供水补偿作用及优化配置研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 31-38. (FENG Feng, XU Shi-guo, LIU Jian-wei, et al. Water Compensation and Optimal Allocation of Regional Flood Resources [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 31-38. (in Chinese))
- [2] 李 俊, 宋松柏, 何灏川, 等. 基于多目标双层规划模型的汛期分期研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021,

- 29(4):807-822. (LI Jun, SONG Song-bai, HE Hao-chuan, *et al.* Study on the Flood Season Division Based on Multi-objective Bi-level Programming Model[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(4): 807-822. (in Chinese))
- [3] 周惠成, 王福兴, 梁国华. 碧流河水库后汛期汛限水位及控制运用方式[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 857-862. (ZHOU Hui-cheng, WANG Fu-xing, LIANG Guo-hua. Decision-making on Reservoir Flood Control Level and Its Control Manner in Post-flooding Seasons for Biliuhe Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 857-862. (in Chinese))
- [4] 李英海, 夏青青, 常文娟, 等. 水库汛限水位确定方法研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5): 127-134. (LI Ying-hai, XIA Qing-qing, CHANG Wen-juan, *et al.* Review of the Methods of Reservoir's Limiting Water Level during Flood Season[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(5): 127-134. (in Chinese))
- [5] 郭倩, 刘攀, 徐高洪, 等. 基于汛期平均流量评价李庄洪水汛期分期研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 39-43. (GUO Qian, LIU Pan, XU Gao-hong, *et al.* Evaluate Flood Seasonality of Lizhuang Station Using Mean Design Discharge Criteria[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 39-43. (in Chinese))
- [6] 王丽学, 孙晓东, 李学森, 等. 汛期分期定量分析方法在汤河水库中的应用研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(3): 44-47. (WANG Li-xue, SUN Xiao-dong, LI Xue-sen, *et al.* Application of Quantitative Analysis Methods of Stage Flood Period to Tanghe Reservoir[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(3): 44-47. (in Chinese))
- [7] 薄会娟, 董晓华, 邓霞. 三峡水库汛期分期方法研究[J]. 人民黄河, 2011, 33(2): 43-44. (BO Hui-juan, DONG Xiao-hua, DENG Xia. Study on Staging Method of Three Gorges Reservoir in Flood Season[J]. Yellow River, 2011, 33(2): 43-44. (in Chinese))
- [8] 李晓英, 张琰, 童泽淳. 水库汛限水位控制多目标协同决策研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(2): 31-42. (LI Xiao-ying, ZHANG Yan, TONG Ze-chun. Study on Multi-objective Cooperative Decision Making of Flood Control Water Levels of Reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(2): 31-42. (in Chinese))
- [9] 贾敏, 母晓妃. 模糊集分析法在水库汛期分期中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2): 178-181. (JIA Min, MU Xiao-fei. Application of Fuzzy Sets Analysis Method in Staging Flood Season of Reservoir[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(2): 178-181. (in Chinese))
- [10] 魏炜, 莫崇勋, 刘俐, 等. 流域降雨量分形方法在水库汛期分期中的应用[J]. 人民黄河, 2014, 36(10): 39-41. (WEI Wei, MO Chong-xun, LIU Li, *et al.* Application of Watershed Rainfall Fractal Theory in Reservoir Flood Season Staging[J]. Yellow River, 2014, 36(10): 39-41. (in Chinese))
- [11] 高波, 刘克琳, 王银堂, 等. 系统聚类法在水库汛期分期中的应用[J]. 水利水电技术, 2005, 36(6): 1-5. (GAO Bo, LIU Ke-lin, WANG Yin-tang, *et al.* Application of System Clustering Method to Dividing Flood Season of Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(6): 1-5. (in Chinese))
- [12] 许钰沐, 牛秀岭. 基于改进的最优分割法的不同论域对汛期分期影响研究[J]. 水力发电, 2019, 45(11): 19-22, 116. (XU Yu-mu, NIU Xiu-ling. Study on the Influence of Different Domains on Flood Season Division Based on Improved Optimal Dissection Method[J]. Water Power, 2019, 45(11): 19-22, 116. (in Chinese))
- [13] 李俊. 基于改进模糊集分析法的汛期分期[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(12): 12-16. (LI Jun. Flood Season Staging Based on Improved Fuzzy Set Analysis[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(12): 12-16. (in Chinese))
- [14] 刘攀, 郭生练, 李玮, 等. 用多目标遗传算法优化设计水库分期汛限水位[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(4): 81-90. (LIU Pan, GUO Sheng-lian, LI Wei, *et al.* Optimal Design of Reservoir Seasonal Flood Control Level by Using Multi-objective Genetic Algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2007, 27(4): 81-90. (in Chinese))
- [15] 王才君, 郭生练, 刘攀, 等. 三峡水库动态汛限水位洪水调度风险指标及综合评价模型研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 376-381. (WANG Cai-jun, GUO Sheng-lian, LIU Pan, *et al.* Risk Criteria and Comprehensive Evaluation Model for the Operation of Three Gorges Reservoir under Dynamic Flood Limit Water Level[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(3): 376-381. (in Chinese))
- [16] 吕巴奇, 王建群, 焦钰, 等. 基于协同的水库汛限水位控制多目标分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(5): 23-27. (LÜ Si-qi, WANG Jian-qun, JIAO Yu, *et al.* Multi-objective Synergistic Analysis of Control Schemes of the Limited Water Level of Reservoir in Flood Season[J]. Yellow River, 2019, 41(5): 23-27. (in Chinese))
- [17] 杨逾, 郑志明. 基于范例推理的软基处理评价方案研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12): 93-97. (YANG Yu, ZHENG Zhi-ming. Study on Scheme Evaluation of Soft Foundation Treatment Using Case-based Reasoning[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(12): 93-97. (in Chinese))

- [18] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 2版. 武汉: 华中理工大学出版社, 2000. (XIE Ji-jian, LIU Cheng-ping. Fuzzy Mathematics Methods and Their Applications[M]. Edition 2. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [19] 蒋海艳,莫崇勋,韦逗逗,等. 水库汛期分期研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 75-80. (JIANG Hai-yan, MO Chong-xun, WEI Dou-dou, *et al.* Review of Reservoir Flood Season Staging[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 75-80. (in Chinese))
- [20] SL 44—2006, 水利水电工程设计洪水计算规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (SL 44—2006, Regulation for Calculating Design Flood of Water Resources and Hydropower Projects[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese))
- [21] WANG H, XIAO W, WANG J, *et al.* The Impact of Climate Change on the Duration and Division of Flood Season in the Fenhe River Basin, China[J]. Water, 2016, 8(3): 105.
- [22] 韩海辉,高婷,易欢,等. 基于变点分析法提取地势起伏度: 以青藏高原为例[J]. 地理科学, 2012, 32(1): 101-104. (HAN Hai-hui, GAO Ting, YI Huan, *et al.* Extraction of Relief Amplitude Based on Change Point Method: A Case Study on the Tibetan Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(1): 101-104. (in Chinese))
- [23] 王忠静,朱金峰,尚文绣. 洪水资源利用风险适度性分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 27-33. (WANG Zhong-jing, ZHU Jin-feng, SHANG Wen-xiu. Determining the Risk-moderate Criterion for Flood Utilization[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 27-33. (in Chinese))
- [24] 张验科,张佳新,俞洪杰,等. 考虑动态洪水预见期的水库运行水位动态控制[J]. 水力发电学报, 2019, 38(9): 64-72. (ZHANG Yan-ke, ZHANG Jia-xin, YU Hong-jie, *et al.* Dynamic Control of Reservoir Operating Stage Considering Dynamic Flood Forecast Period[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(9): 64-72. (in Chinese))
- [25] 赖童瑶. 水库汛期分期及汛限水位调整研究: 以江西省七一水库为例[D]. 南昌: 南昌大学, 2020. (LAI Tong-yao. Study on Flood Season Staging and Adjustment of Flood Limited Level on Qiyi Reservoir in Jiangxi Province[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020. (in Chinese))
- [26] 黄凯,冯平. 基于非一致性水文序列的水库极限防洪风险复核分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(1): 28-37. (HUANG Kai, FENG Ping. Recheck Analysis of Reservoir Extreme Flood Control Risk Using Inconsistent Hydrological Sequences[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1): 28-37. (in Chinese))
- [27] 麻荣永. 土石坝风险分析方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (MA Rong-yong. Risk Analysis Method and Application of Earth-Rock Dam[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [28] 熊立华,邝韵琪,于坤霞,等. 年径流频率分析的一次二阶矩法及其应用[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 390-397. (XIONG Li-hua, KUANG Yun-qi, YU Kun-xia, *et al.* Derived Moment Approach for Analyzing the Annual Runoff Frequency and Its Application[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 390-397. (in Chinese))
- [29] 陈炯宏,郭生练,刘攀,等. 汛限水位动态控制的防洪极限风险分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(5): 38-40, 59. (CHEN Jiong-hong, GUO Sheng-lian, LIU Pan, *et al.* Extreme Risk Analysis of Flood Season Limited Water Level[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(5): 38-40, 59. (in Chinese))
- [30] 咸京,顾圣平,林乐曼,等. 基于随机模拟的汛期水库超蓄调度风险分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(5): 39-43. (XIAN Jing, GU Sheng-ping, LIN Le-man, *et al.* Risk Analysis of Reservoir Over-storage at Flood Season Based on Stochastic Simulation Method[J]. Yellow River, 2018, 40(5): 39-43. (in Chinese))
- [31] 黄德春,胡浩东,田鸣. 中国生态—经济协同发展实证研究: 基于复合系统协调度模型[J]. 环境保护, 2018, 46(14): 39-44. (HUANG De-chun, HU Hao-dong, TIAN Ming. The Empirical Analysis on Synergetic Development of Ecology and Economy Composite System in China[J]. Environmental Protection, 2018, 46(14): 39-44. (in Chinese))
- [32] 孟庆松,韩文秀. 复合系统协调度模型研究[J]. 天津大学学报, 2000, 33(4): 444-446. (MENG Qing-song, HAN Wen-xiu. Study of the Coordinating Measurement Model with Respect to Composite System[J]. Journal of Tianjin University, 2000, 33(4): 444-446. (in Chinese))

(编辑:罗娟)