

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.05.007

基于改进模糊集分析法和 Copula 函数的水库分期设计洪水推求

李继清^{1,2}, 陈 景¹, 谢宇韬¹, 徐泽辉¹

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206; 2. 华北电力大学苏州研究院, 江苏 苏州 215000)

摘要:通过耦合 Critic 权重法、局部比较法和模糊集分析法,提出了一种水库汛期分期的改进模糊集分析法。该方法通过 Critic 权重法将多个指标转化为综合指标,再利用局部比较法分析步长内综合指标的波动程度,以此客观确定汛期分期节点,然后将改进模糊集分析法的分期结果与其他分期方法结果进行比较优选,确定最佳汛期分期方案;在此基础上,采用 P-Ⅲ 分布、两参数 Gamma 分布、对数正态分布和广义极值分布 4 种线型,对设计要素进行边缘分布拟合并确定最优分布线型,并通过 Frank Copula 函数构建不同分期间洪峰流量、洪量的联合分布,推求分期设计频率,确定分期设计洪水的设计要素设计值和分期设计洪水过程线。将本文提出的方法应用于龙羊峡水库汛期分期和分期设计洪水推求,确定的龙羊峡水库汛期分期方案为:6 月上旬至 6 月下旬为前汛期,7 月上旬至 8 月下旬为主汛期,9 月上旬至 10 月下旬为后汛期;推求的龙羊峡水库各分期设计洪水过程线显示,主汛期多为尖瘦型洪水,前汛期与后汛期多为矮胖型洪水,且主汛期的洪峰流量与洪量大于前、后汛期;汛期分期合理性检验表明,改进模糊集分析法较传统汛期分期方法确定的水库汛期分期节点更加合理。

关键词:汛期分期;改进模糊集分析法;分布拟合;分期设计洪水

中图分类号:TV877 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0061-12

Staged design flood calculation for reservoir using improved fuzzy set analysis method and Copula function// Li Jiqing^{1,2}, CHEN Jing¹, XIE Yutao¹, XU Zehui¹ (1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Suzhou Institute of North China Electric Power University, Suzhou 215000, China)

Abstract: By coupling the Critic weight method, local comparison method and fuzzy set analysis method, an improved fuzzy set analysis method for reservoir flood season staging is proposed. This method converts multiple indicators into a comprehensive index using the Critic weight method, and then use the local comparison method to analyze the fluctuation degree of the comprehensive index within the step size to objectively determine the flood season staging nodes. Subsequently, the staging results of the improved fuzzy set analysis method are compared with the results of other staging methods to determine the optimal flood season staging scheme. On this basis, the P-Ⅲ distribution, two-parameter Gamma distribution, log-normal distribution and generalized extreme value distribution are used to fit the marginal distribution of design elements and determine the optimal distribution line. The joint distributions of flood peaks and flood volumes in different periods are constructed by the Frank Copula function, the design frequency for each period is deduced, and the design values of the design elements and the design flood hydrograph for each period are determined. The proposed method is applied to the flood season staging and staged design flood calculation for the Longyangxia Reservoir. The flood season staging scheme of the Longyangxia Reservoir is determined as follows: the early flood season is from early June to late June, the main flood season is from early July to late August, and the late flood season is from early September to late October. The calculated design flood hydrograph of each stage at the Longyangxia Reservoir shows that the main flood season is characterized by mostly sharp and thin flood hydrographs, and the early and late flood seasons are characterized by mostly short and fat hydrographs. The flood peak and volume in the main flood season are greater than those in the early and late flood seasons. The rationality test of flood season staging shows that the flood season staging nodes determined by the

基金项目:国家自然科学基金项目 (U2243224, 52579009); 水灾害防御全国重点实验室开放基金 (2024nkzd01); 国家重点研发计划 (2022YFC3002702)

作者简介:李继清 (1972—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail:jqli6688@ncepu.edu.cn

improved fuzzy set analysis method are more reasonable than those determined by the traditional methods.

Key words: flood season staging; improved fuzzy set analysis method; distribution fitting; staged design flood

随着经济和社会的发展,水资源需求量日益增大^[1-2]。探究水库汛期洪水特性,不仅有利于充分发挥水库防洪功能,而且还能满足日益增长的洪水资源化利用需求^[3-4]。国内外学者对汛期分期和分期设计洪水方法进行了大量研究。目前,汛期分期方法主要分为定性和定量两大类。定性分析方法以成因分析法为主^[5],该方法高度依赖实践经验和主观判断,分析难度大,通常不单独用于汛期分期。定量分析方法可分为数理统计分析法和聚类分析法两类。数理统计方法^[6-9],如矢量图法等,原理简单,计算简便,但阈值选取主观性强。相较于数理统计方法,聚类分析方法,如模糊集分析法^[10-11]、Fisher 最优分割法^[12-13]等,具有更为完善的理论基础。其中,模糊集分析法结合了确定性分析、概率统计分析和模糊集分析,可以考虑汛期模糊性,但该方法存在指标单一、分期阈值确定主观性强的问题。对传统模糊集分析法进行改进,使其在综合考虑多种因素的同时,依据径流变化规律准确定位汛期分期节点,有利于提高分期方案的合理性,为分期设计洪水的推求提供基础。在汛期分期的基础上,相关研究取得了显著进展。例如:占润进^[14]对比分析了赛江和建溪流域的分期洪水频率,并将分期设计洪水应用于生产实践;雏鹰^[15]基于独立事件的概率组合原理,研究了水库防洪标准与分期运用下等价防洪标准间的关系,为分期防洪标准的推求提供了依据;刘攀等^[16-17]以全概率公式为基础,解析了分期设计洪水与年最大设计洪水的关系,并利用 Copula 函数研究了分期设计洪水频率与防洪标准之间的关系,完善了分期洪水设计理论;王文圣等^[18]采用 Gumbel Copula 函数分析了马边站的分期设计洪水,并探讨了分期设计洪水的防洪达标问题;蔺文慧等^[19]基于智能算法耦合多种 Copula 函数,求解多变量组合洪水的重现期,并将其应用于马达瓦斯克河流域的洪水联合概率计算。综上所述,优化水库汛期分期方法,并结合 Copula 函数对水库汛期进行合理分期并推求分期设计洪水,有利于在保证水库汛期防洪的前提下增加汛末蓄水^[20-21],缓解水库防洪与蓄水之间的矛盾。

本文提出一种融合 Critic 权重法、局部比较法和模糊集分析法的改进模糊集分析法,该方法能综合考虑多个分期评价指标,且更加客观地确定汛期分期节点。应用改进模糊集分析法对龙羊峡水库进行汛期分期,基于汛期分期方案,对各分期的洪水设

计要素进行取样,并开展边缘分布拟合,随后,采用 Frank Copula 函数构建各分期洪水序列之间的联合分布,推求不同频率下的分期设计洪水。

1 研究方法

本文使用改进模糊集分析法对水库进行汛期分期,对分期设计要素进行分布拟合后,通过 Copula 函数构建联合分布,确定分期设计频率,经同频率放大法推求分期设计洪水。首先,针对传统模糊集分析法分期阈值主观性强、指标单一的缺点,本文提出了改进模糊集分析法。该方法利用 Critic 权重法对旬均径流量、旬最大洪峰流量、旬最大 3 d 洪量进行归一化处理,计算各指标在汛期划分中的权重,基于权重加权平均构建综合指标,以全面反映多因素对汛期划分的综合影响;然后使用局部比较法^[22]分析该综合指标的波动特征,以综合指标变点作为汛期分期节点,实现分期阈值的客观确定。使用改进模糊集分析法对龙羊峡水库进行汛期分期,并与其他分期方法结果进行对比,再采用改进的 Cunderlik 法^[23]检验分期方案合理性,优选出最佳分期方案。基于最佳分期方案,对不同分期的洪峰流量 Q_m 、最大 3 d 洪量 W_{3d} 、最大 7 d 洪量 W_{7d} 、最大 15 d 洪量 W_{15d} 和最大 45 d 洪量 W_{45d} 共 5 个设计要素进行极大值取样。使用 P-Ⅲ 分布、两参数 Gamma 分布、对数正态分布和广义极值分布 4 种线型对各分期的 5 个设计要素样本进行适线拟合,并以均方根误差 (RMSE) 和赤池信息准则 (AIC) 筛选出各设计要素的最适分布线型。利用 Frank Copula 函数推求不同分期间设计要素的相关性结构,确定分期设计频率与对应的设计值。对各分期的实测洪水过程进行比较分析,从防洪后果角度出发,分别选取前汛期、主汛期和后汛期中峰高量大且具有代表性的不同线型的实测洪水作为典型洪水,推求分期设计洪水,具体流程如图 1 所示。

1.1 基于改进模糊集的汛期分期

改进模糊集分析法在传统模糊集分析法的基础上,采用 Critic 权重法对多指标进行相关性分析与加权平均,将多个指标转化为一个综合指标,再利用局部比较法对综合指标进行分析,依据数据自身波动程度确定汛期分期节点,从而克服了传统模糊集分析法指标单一、主观性强的缺点。

1.1.1 模糊集分析法

模糊集分析法作为一种结合成因分析、数理统计

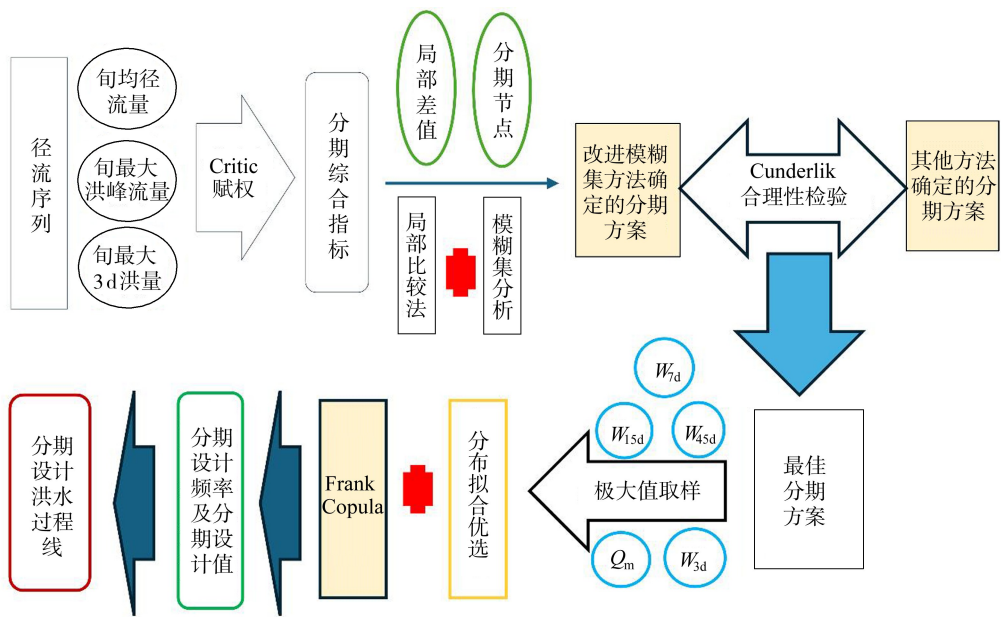


图 1 水库分期设计洪水推求流程

Fig. 1 Flow chart for staged design flood calculation

和模糊统计的汛期分期方法,能在考虑前汛期、主汛期和后汛期分界模糊性的情况下,通过构建隶属度函数量化某一时段“属于”不同汛期的程度,再依据隶属度大小决定该时段属于主汛期的倾向程度^[24]。

根据水库所在流域的实际情况,选择合适的指标和对应的指标阈值,并以此阈值为依据确定第 s 年主汛期起始旬 $I_{0,s}$ 和结束旬 $I_{1,s}$,依此方法对 p 年数据进行上述操作,可以得到 p 个主汛期样本区间的集合 $\{[I_{0,s}, I_{1,s}] | s=1, 2, \dots, p\}$ 。检查第 s 年第 j 旬 j_s 是否位于第 s 年的主汛期区间 $[I_{0,s}, I_{1,s}]$ 内,如果位于,则记为被覆盖。统计所有 p 年中,旬 j (指不同年第 j 旬的集合) 被覆盖的总次数 k_j ,则旬 j 属于主汛期的隶属频率 λ_j 为

$$\lambda_j = k_j / p \quad (j = 1, 2, \dots, 36) \quad (1)$$

当 p 足够大时,隶属频率即可收敛为旬 j 属于主汛期模糊集合的隶属度。由式(1)可以得到旬 j 对于主汛期的隶属度为 λ_j ,当 $\lambda_j > 0.5$ 时,说明旬 j 更倾向于主汛期,应当将其划入主汛期;当 $\lambda_j < 0.5$ 时,说明旬 j 更倾向于非主汛期,应当将其划入非主汛期,同时若该旬在主汛期前,则为前汛期,若该旬在主汛期后,则为后汛期;当 $\lambda_j = 0.5$ 时,旬 j 对主汛期和非主汛期倾向相同,应当将其划入过渡期。模糊集分析法虽然具有完备的理论,能考虑分期之间模糊性,但仍然存在指标单一、变点阈值确定偏主观的问题。

1.1.2 改进模糊集分析法

Critic 权重法^[25] 基于评价指标的对比强度和指标间的冲突性来综合权衡指标的客观权重。该方法不仅考虑指标变异性,还兼顾指标之间的相关性,完全利用数据自身的客观属性进行科学评价,有效解

决了传统模糊集分析法指标单一的问题。

为消除不同指标间的量纲影响,同时保留各指标的波动性,首先对原始数据进行归一化处理,然后基于 Critic 权重法,通过分析指标变异性 and 冲突性确定指标权重。其中,指标的变异性 and 冲突性越强,其转化为综合指标的权重越大。通过 Critic 权重法将旬均径流量、旬最大洪峰流量、旬最大 3 d 洪量转化为一个包含原始数据信息的综合指标。

在获得综合指标后,采用局部比较法分析综合指标的变化特征,综合指标变化最显著的两个变点即为主汛期的起始节点和结束节点。

设综合指标序列为 $\{x_i | i=1, 2, \dots, N\}$, 其中 N 为综合指标序列的总数据个数,选取适当步长 d , 计算节点 i 左右两侧各 d 个观测值之和的差值,作为综合指标 x_i 在 i 节点的局部变化程度 y_i :

$$y_i = (x_i + x_{i+1} + \dots + x_{i+d-1}) - (x_{i-d} + x_{i-d-1} + \dots + x_{i-1}) \quad (2)$$

设 $\hat{m}_1$ 为使 y_i 达到最大值的下标, $\hat{m}_2$ 为使 y_i 达到最小值的下标,则取 $\hat{m}_1$ 和 $\hat{m}_2$ 作为变点 m 的估计,即 $y_{\hat{m}_1}$ 和 $y_{\hat{m}_2}$ 对应的旬分别为主汛期起始旬和结束旬。在检验水平 δ 下,步长 d 的计算公式为

$$d = 2 \left(\frac{|\theta|}{\sigma} \right) - 2(R + u_{\delta/2})^2 \quad (3)$$

$$\text{其中 } R = \left(\frac{6}{\pi} \ln \left(\frac{3}{l} - 3 \right) \right)^{-1/2} \left[x_{\delta/2} + 2 \ln \left(\frac{3}{l} - 3 \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\ln \left(\frac{3}{l} - 3 \right) \right) - \frac{1}{2} \ln x_{\delta} \right]$$

$$l = 2d/N$$

式中: σ 为综合指标的标准差; θ 为综合指标变点前

后数据平均值的差值; $|\theta|/\sigma$ 为数据信噪比,一般取 2; l 一般取 0.1; 检验水平 $\delta = 0.05$ (置信系数 0.95); $u_{\delta/2}$ 为标准正态分布上 $\delta/2$ 分位点,其值可通过查标准正态分布表获得。

采用局部比较法确定 p 年的主汛期样本区间集合 $\{[I_{0,s}, I_{1,s}] | s=1,2,\cdots,p\}$ 后,计算旬 j 属于主汛期的隶属频率,并将其作为旬 j 属于主汛期模糊集合的隶属度。然后,根据主汛期隶属度判别条件确定汛期分期结果。本文通过耦合 Critic 权重法和局部比较法对传统模糊集分析法进行了改进,使改进模糊集分析法在考虑多个汛期分期指标的同时更加客观地确定汛期分期节点完成汛期分期。

1.2 分期合理性检验及优选

在汛期分期实践中要求不同分期的洪水发生的量级和相对频率具有显著差异^[26],Cunderlik 于 2004 年提出了一种检验特定流域洪水在全年是否有季节性变化规律的方法,但该方法应用到汛期分期合理性检验中有时并不适用。为此,陈璐等^[23] 对该方法进行了改良,提出了一种汛期分期合理性检验方法。该方法假设汛期内每天发生洪水的概率服从均匀分布,通过重复模拟确定各分期洪水均匀分布的置信区间上、下限相对频率,再采用非参数统计自助法取样,并统计新样本中各分期洪水发生的相对频率,利用自助取样法的相对频率与置信区间上、下限相对频率的广义距离来判断不同分期洪水发生的差异,从而对汛期分期结果的合理性进行评价。可用其检验结果的优属度 C_k 对汛期分期方案进行评价,计算公式为

$$C_k = \frac{\sum_{j=1}^n [w_{k,j}(r_{k,j} - 1)]^2}{\sum_{j=1}^n (w_{k,j}r_{k,j})^2} \quad (4)$$

式中: C_k 为第 k 个汛期分期方案的优属度,取值为 0~1,其值越大越好; $w_{k,j}$ 为第 k 个汛期分期方案中第 j 个分期的权重,取分期总数的倒数; $r_{k,j}$ 为第 k 个汛期分期方案的第 j 个分期归一化后的广义距离; n 为分期总数。

1.3 分期设计洪水

根据汛期分期结果,分别对前汛期、主汛期、后汛期和年洪水序列的洪峰流量、最大 3 d 洪量、最大 7 d 洪量、最大 15 d 洪量和最大 45 d 洪量进行极大值取样。采用 P-Ⅲ分布、两参数 Gamma 分布、对数正态分布和广义极值分布 4 种线型曲线对极大值样本序列进行拟合与优选,推求前汛期、主汛期、后汛期和年序列的最适频率曲线。

本文采用 Copula 函数构建不同分布间的联合

分布^[27-30],量化分期设计洪水频率和防洪标准之间的关系,推求分期设计洪水频率。在众多 Copula 函数中, Frank Copula 函数^[31-32] 结构简单,能够描述正、负相关关系,且对不同变量间的相关程度无特殊要求,适用于描述三分期(前汛期、主汛期、后汛期)最大洪水要素的相关性结构^[17]。基于 Frank Copula 函数,分期设计频率与年防洪标准应满足如下关系:

$$\frac{1}{T} \geq 1 - \theta_1^{-1} \ln \left\{ 1 - (1 - e^{-\theta_1})^{-1} \left[1 - (1 - e^{-\theta_2})^{-1} \cdot (1 - e^{-\theta_2(1-P_{x2})})(1 - e^{-\theta_2(1-P_{x3})}) \right]^{\theta_1/\theta_2} (1 - e^{-\theta_1(1-P_{x1})}) \right\} \quad (5)$$

式中: T 为年防洪标准; P_{x1} 、 P_{x2} 、 P_{x3} 分别为前汛期、主汛期和后汛期最大洪水的分期设计频率; θ_1 、 θ_2 为设计频率的联合分布参数。通过 Frank Copula 函数确定不同设计要素的设计频率,结合各设计要素的最适分布曲线计算得到对应的设计值,随后采用同频率放大法对分期典型洪水过程进行放大,即可得到分期设计洪水过程线。

2 实例应用

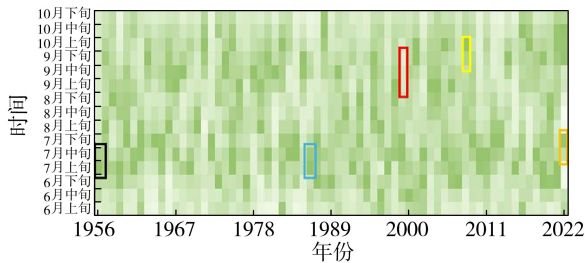
龙羊峡水库是黄河上游具有多年调节能力的“龙头”水库,开发任务以发电为主,兼有防洪、防凌、灌溉、养殖、旅游等综合效益。但随着人类活动和气候变化影响的加剧,黄河流域水资源供需矛盾日益尖锐^[33-34]。龙羊峡水库来水具有明显季节性特征^[35-36],对其来水进行汛期分期并推求分期设计洪水,有利于水库汛期防洪和高效利用后汛以来水,提升水库洪水资源化能力。唐乃亥水文站是龙羊峡水库入库代表站,本文选用该站 1956—2022 年共 67 年的实测径流资料进行汛期分期及分期设计洪水推求。

2.1 改进模糊集汛期分期

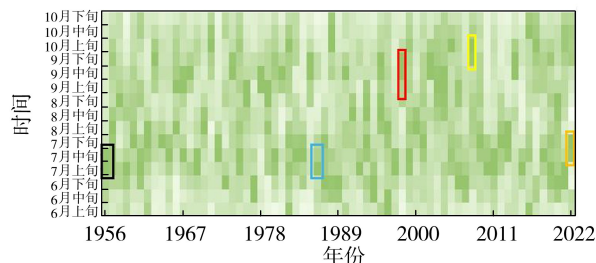
以旬为单位将汛期(6—10 月)划分为 15 个旬,选取唐乃亥水文站 1956—2022 年每年汛期的旬均径流量、旬最大洪峰流量和旬最大 3 d 洪量 3 项特征指标,构建共计 67 个样本容量为 15 的三维向量 $\mathbf{X}$ 。通过 Critic 权重法对各项特征指标进行分析计算,确定 3 个特征指标的权重,进而加权计算得到综合指标。采用局部比较法计算综合指标的局部差值,基于局部差值的极值特征初步确定每年的汛期分期节点,再结合模糊集分析法最终确定龙羊峡水库的汛期最优分期节点。归一化后的各项指标及局部差值变化过程如图 2 和图 3 所示。

由图 2 可见,1956—2022 年汛期的旬均径流量、旬最大洪峰流量和旬最大 3 d 洪量变化趋势大

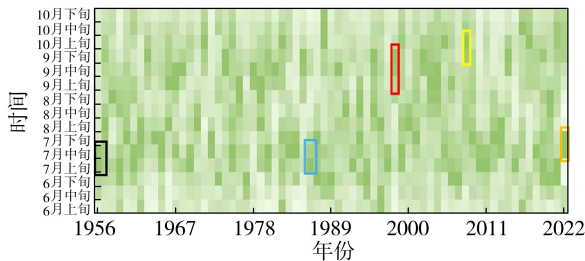
归一化指标
0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0



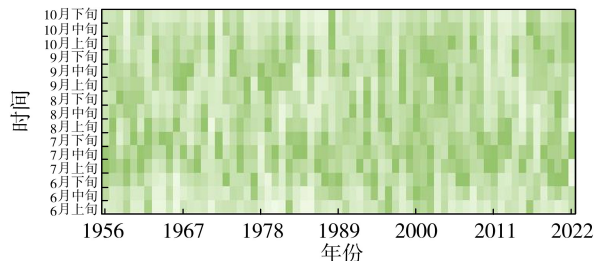
(a) 归一化旬均径流量



(b) 归一化旬最大洪峰流量



(c) 归一化旬最大3 d洪量



(d) 归一化综合指标

图2 龙羊峡水库汛期分期归一化指标

Fig. 2 Normalized indices for flood season staging at Longyangxia Reservoir

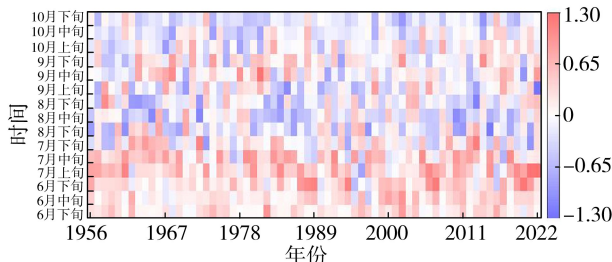


图3 龙羊峡水库综合指标的局部差值

Fig. 3 Local difference of comprehensive index at Longyangxia Reservoir

致相同,但同色框所示区域的局部变化存在一定差异。因此,通过 Critic 权重法将 3 个指标转化为综合指标,可同时考虑径流量、洪峰流量与洪量对汛期分期结果的影响,避免单一指标的局限性。由图 3 可见,1956—2022 年综合指标的局部差值变化趋势大体为先增后减,其中极大值(深红色)多出现在 6 月下旬后,极小值(深蓝色)出现在 9 月上旬前,这些极值位置直接影响后续分期节点的确定。

以 1956 年和 1964 年数据为例,特征指标旬均径流量的权重分别为 0.36、0.41;旬最大洪峰流量的权重分别为 0.44、0.41;旬最大 3 d 洪量的权重分别为 0.20、0.18;进而通过加权计算得到综合指标。采用局部比较法依次以各旬作为变点进行估计,计算得到对应的局部差值,选取局部差值最大值对应的旬为主汛期起始旬,局部差值最小值对应的旬为主汛期结束旬。对 1956—2022 年所有年份重复上述操作,确定每年的主汛期开始旬和结束旬,统计旬 j 在所有年份中被主汛期覆盖的总次数,代入式(1)

计算各旬的主汛期隶属度,结果如图 4 所示。

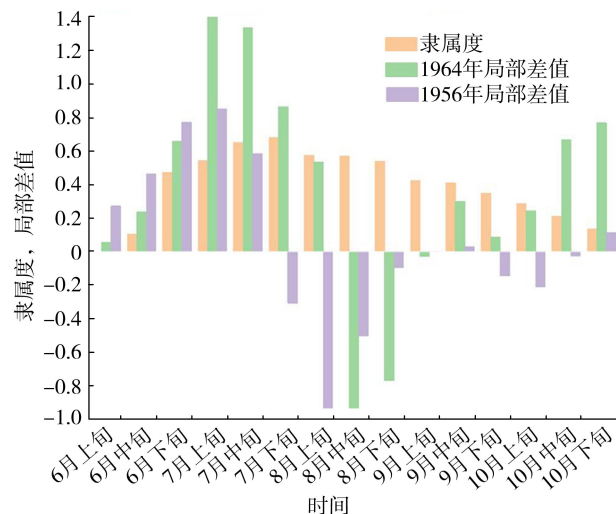


图4 各旬的局部差值和隶属度

Fig. 4 Local difference and membership degree for each ten-day period

根据龙羊峡水库汛期各旬隶属度(图 4),采用改进模糊集分析法进行汛期分期,最终得到如下分期结果:6 月上旬至 6 月下旬为前汛期;7 月上旬至 8 月下旬为主汛期;9 月上旬至 10 月下旬为后汛期。

2.2 其他方法汛期分期

除改进模糊集分析法外,本文还使用传统模糊集分析法、矢量统计法、Fisher 最优分割法对龙羊峡水库进行汛期分期。在传统模糊集分析法^[11]中,常以旬径流量平均值作为参考确定分期阈值,并在平均值左右各选取若干个旬径流量指标值。经分析计算,龙羊峡水库 1956—2022 年汛期的旬径流量平均值为 9.97 亿 m^3 ,选取 7.92 亿、9.90 亿、11.88 亿 m^3

为指标值进行分析,得到传统模糊集分析法的汛期分期方案为:6月上旬至6月下旬为前汛期;7月上旬至9月下旬为主汛期;10月上旬至10月下旬为后汛期。矢量图法^[9]认为可以依据矢量的方向性来判断洪水的季节性分期。在单位圆上作图,以整个汛期为圆周,将每场取样洪水的发生时间转换为角度,再以每场取样洪水的指标大小作为矢量的模,最后以矢量聚集程度为标准对汛期进行分期,得到矢量图法的汛期分期方案为:6月上旬至6月下旬为前汛期;7月上旬至9月中旬为主汛期;9月下旬至10月下旬为后汛期。Fisher 最优分割法^[12]以径流数据总离差平方和最小、各分割段内样本差异最小、各分割段间差异最大为标准对龙羊峡水库进行汛期划分,得到的汛期分期方案为:6月上旬至7月上旬为前汛期;7月中旬至10月上旬为主汛期;10月中旬至10月下旬为后汛期。将上述不同方法得到的分期节点进行组合,构成分期组合方案,最终得到共计8种龙羊峡水库汛期分期方案。

2.3 分期合理性检验及优选

采用陈璐等^[23]改进的 Cunderlik 法对分期方案进行合理性检验,计算均匀分布假设下的置信区间上、下限相对频率,通过 Matlab 曲线拟合工具得到龙羊峡水库的理论频率曲线。对于发生 x 场次洪水,该水库置信区间上限 Z_1 和下限 Z_2 的相对频率拟合公式分别为

$$Z_1 = 0.1857e^{-0.0189x} + 0.4253e^{-0.0002x} \quad (6)$$

$$Z_2 = 0.0434\ln x + 0.0225 \quad (7)$$

拟合结果显示,曲线 Z_1 的相关系数为 0.98,均方根误差为 0.005;曲线 Z_2 的相关系数为 0.94,均方根误差为 0.007。由拟合曲线可计算出,当 $x = 67$ 时,置信区间上、下限分别为 0.47 和 0.21。模拟计算洪水发生相对频率与置信区间上、下限相对频率的广义距离,代入式(4)可求得汛期分期方案优属度。不同分期方案的分期结果与优属度如表 1 所示。

由表 1 可知,在 8 种汛期分期方案中,前汛期广义距离最大值为 0.17,主汛期广义距离最大值为 0.21,后汛期广义距离最大值为 0.15。其中,改进

模糊集分析法分期方案的前汛期与后汛期的广义距离均为 8 种方案中的极大值,主汛期广义距离接近极大值;矢量图法分期方案仅前汛期广义距离为极大值;传统模糊集分析法分期方案的前汛期和主汛期广义距离为极大值,后汛期广义距离为极小值;Fisher 最优分割法分期方案的前汛期与主汛期广义距离为极小值。在龙羊峡水库的汛期分期中,改进模糊集分析法、矢量图法和传统模糊集分析法均较好地确定了前汛期的分期节点,前汛期广义距离为极大值。但矢量图法和传统模糊集分析法在确定分期节点时,受操作者的经验与主观判断影响较大,导致主汛期与后汛期分期结果不佳。改进模糊集分析法通过综合指标自身的变化确定分期节点,其主汛期与后汛期的分期节点相较于矢量图法和传统模糊集分析法更合理。优属度越大,表明不同分期间洪水发生的量级和相对频率差异越大,分期方案越合理。计算结果显示,改进模糊集分析法分期方案的优属度最高,为 0.96,在 8 种汛期分期方案中最合理。

2.4 分期设计洪水

根据汛期分期成果,本文分别分析了洪峰流量、最大 3 d 洪量、最大 7 d 洪量、最大 15 d 洪量和最大 45 d 洪量 5 个设计要素在不同分期间的相关性结构,并基于 Frank Copula 函数分别建立 3 个分期间设计要素的联合分布,进而求得满足防洪设计标准(包括可能最大洪水(probable maximum flood,PMF)以及 0.05%、0.1%、1%、2%和 5%频率)的各分期实际设计频率和设计值。

对洪水资料进行统计整理,分别对各分期和全年的 Q_m 、 W_{3d} 、 W_{7d} 、 W_{15d} 和 W_{45d} 进行分期极大值取样和年极大值取样。在此基础上,采用 P-Ⅲ分布、两参数 Gamma 分布、对数正态分布和广义极值分布 4 种线型,对各设计要素的极大值序列进行统计分析与拟合,并计算经验频率。各时期设计洪水的 5 个设计要素的部分边缘分布拟合效果如图 5 所示。由图 5 可见,主汛期洪峰流量和年序列最大 7 d 洪量频率曲线的上部拟合效果存在明显差别,主汛期最大 3 d 洪量和后汛期最大 45 d 洪量频率曲线的

表 1 不同汛期分期方案的分期结果和优属度

Table 1 Staging results and superiority degrees of different flood season staging schemes

分期方案	前汛期		主汛期		后汛期		优属度
	时段	广义距离	时段	广义距离	时段	广义距离	
改进模糊集分析法的方案	6月上旬至6月下旬	0.17	7月上旬至8月下旬	0.19	9月上旬至10月下旬	0.15	0.96
矢量图法的方案	6月上旬至6月下旬	0.17	7月上旬至9月中旬	0.09	9月下旬至10月下旬	0.09	0.80
传统模糊集分析法的方案	6月上旬至6月下旬	0.17	7月上旬至9月下旬	0.21	10月上旬至10月下旬	-0.08	0.62
组合方案1	6月上旬至6月下旬	0.17	7月上旬至10月上旬	0.07	10月中旬至10月下旬	0.09	0.58
组合方案2	6月上旬至7月上旬	0.08	7月中旬至8月下旬	0.14	9月上旬至10月下旬	0.15	0.45
组合方案3	6月上旬至7月上旬	0.08	7月中旬至9月中旬	0.10	9月下旬至10月下旬	0.09	0.43
组合方案4	6月上旬至7月上旬	0.08	7月中旬至9月下旬	0.18	10月上旬至10月下旬	-0.08	0.69
Fisher 最优分割法的方案	6月上旬至7月上旬	0.08	7月中旬至10月上旬	0.05	10月中旬至10月下旬	0.09	0.55

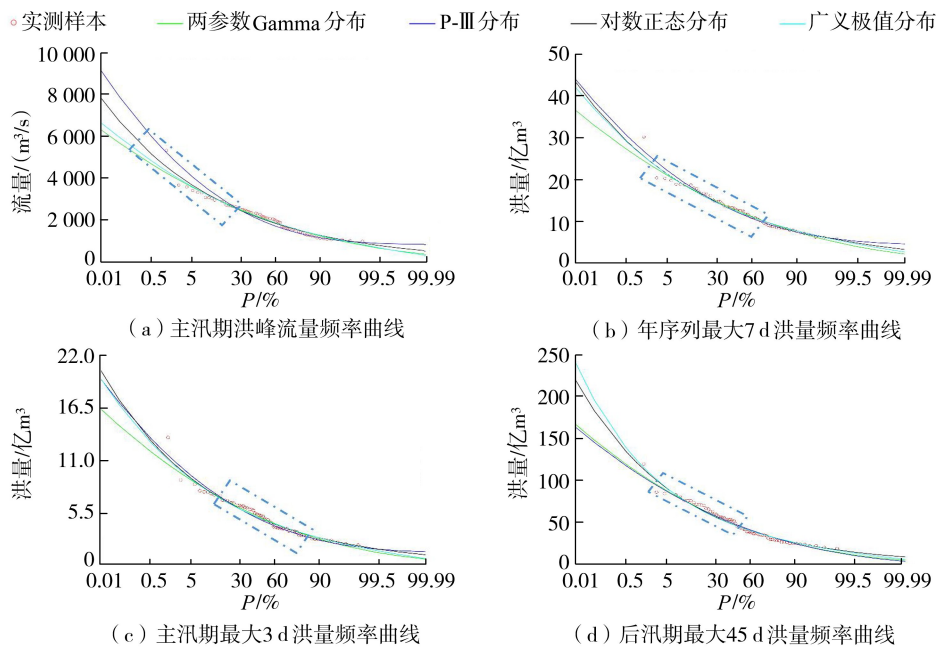


图5 龙羊峡水库部分洪峰流量、洪量序列在不同分布曲线下的拟合效果对比

Fig. 5 Comparison of fitting performance of different distribution curves for some flood peak and volume sequences at Longyangxia Reservoir

中部拟合效果存在明显区别。

本文采用均方根误差 (RMSE) 最小准则与赤池信息准则 (AIC) 对 4 种分布曲线的拟合效果进行对比优选。首先,利用全部点据对各分布曲线进行拟合,并依据 RMSE 和 AIC 进行优选。当不同分布的 RMSE 和 AIC 值相近时,则依据 SL44—2006《水利水电工程设计洪水计算规范》要求,需兼顾点群整

体变化趋势,使频率曲线尽可能通过点群中心,且可适当侧重上部和中部点据。在此基础上,通过对比各拟合分布上 70%点据的 RMSE 与 AIC 指标,选择 RMSE 与 AIC 最小序列的分布曲线为最适分布曲线。计算得出的 RMSE 和 AIC 指标结果见表 2 和表 3。由表 2 和表 3 可见,广义极值分布对前汛期洪峰流量序列拟合效果最优,两参数 Gamma 分布

表 2 龙羊峡水库不同分布洪峰流量、洪量序列全点据拟合效果

Table 2 Fitting performance of different distribution curves for complete flood peak and volume series at Longyangxia Reservoir

指标	时段	RMSE				AIC			
		两参数 Gamma	P-III	对数正态	广义极值	两参数 Gamma	P-III	对数正态	广义极值
Q_m	全年	62.99	128.99	84.36	75.14	711.72	762.91	708.32	712.76
	前汛期	75.91	48.91	47.51	41.96	679.72	634.19	667.71	638.54
	主汛期	89.66	160.22	109.92	100.80	778.52	849.85	775.54	778.84
	后汛期	71.54	78.72	78.29	75.72	693.48	776.78	749.47	700.53
W_{3d}	全年	0.28	0.37	0.38	0.26	2343.24	2358.56	2423.94	2344.94
	前汛期	0.17	0.14	0.11	0.10	2287.32	2254.16	2265.71	2268.95
	主汛期	0.23	0.29	0.27	0.28	2357.22	2364.07	2352.83	2356.01
	后汛期	0.17	0.15	0.15	0.16	2295.15	2291.25	2322.46	2332.46
W_{7d}	全年	0.31	0.36	0.36	0.37	2449.19	2450.91	2444.99	2448.41
	前汛期	0.22	0.64	0.23	0.20	2380.49	2445.63	2344.92	2362.20
	主汛期	0.43	0.72	0.57	0.51	2463.57	2475.09	2460.44	2463.73
	后汛期	0.29	0.18	0.19	0.21	2383.96	2372.38	2390.89	2410.90
W_{15d}	全年	0.56	0.54	0.63	0.63	2523.47	2522.48	2519.10	2523.39
	前汛期	0.85	0.81	0.85	0.83	2478.87	2472.59	2526.36	2488.70
	主汛期	0.97	0.96	1.04	1.08	2555.21	2554.74	2544.05	2545.91
	后汛期	0.66	0.63	0.57	0.62	2492.91	2497.93	2525.23	2528.03
W_{45d}	全年	1.82	1.67	1.85	1.90	2584.79	2576.39	2590.47	2596.59
	前汛期	1.67	1.17	1.35	1.37	2594.41	2561.75	2583.09	2556.83
	主汛期	2.79	2.56	2.87	3.07	2622.51	2610.55	2622.97	2638.59
	后汛期	2.38	2.27	2.37	2.48	2618.96	2615.14	2648.47	2664.15

表 3 龙羊峡水库不同分布洪峰流量、洪量序列中上 70%点据拟合效果

Table 3 Fitting performance of different distribution curves for upper 70% points in flood peak and volume series at Longyangxia Reservoir									
指标	时段	RMSE				AIC			
		两参数 Gamma	P-Ⅲ	对数正态	广义极值	两参数 Gamma	P-Ⅲ	对数正态	广义极值
Q_m	全年	136.29	191.78	133.10	135.38	427.58	502.68	459.37	447.57
	前汛期	116.58	83.42	107.13	86.02	437.95	395.99	393.07	380.67
	主汛期	152.84	239.75	149.91	151.17	490.57	555.26	514.57	505.21
	后汛期	105.49	182.73	154.00	109.16	449.10	461.04	460.47	457.00
W_{3d}	全年	0.38	0.42	0.70	0.38	1618.05	1645.50	1646.94	1610.18
	前汛期	0.25	0.19	0.21	0.22	1570.96	1550.67	1530.51	1524.27
	主汛期	0.42	0.44	0.41	0.41	1597.72	1623.68	1616.68	1617.24
	后汛期	0.27	0.25	0.33	0.35	1570.09	1558.83	1559.59	1565.57
W_{7d}	全年	0.84	0.84	0.82	0.82	1626.31	1643.27	1642.41	1645.31
	前汛期	0.50	0.81	0.38	0.43	1594.66	1696.42	1599.13	1587.52
	主汛期	0.94	1.01	0.91	0.92	1656.88	1707.48	1686.02	1675.77
	后汛期	0.52	0.47	0.54	0.62	1621.49	1575.37	1580.27	1590.51
W_{15d}	全年	1.46	1.43	1.42	1.44	1682.64	1680.55	1695.10	1695.14
	前汛期	1.05	0.99	1.50	1.11	1720.78	1718.53	1723.11	1721.20
	主汛期	1.86	1.82	1.71	1.71	1733.91	1734.27	1741.96	1745.50
	后汛期	1.17	2.08	1.48	1.49	1697.52	1694.67	1685.16	1693.97
W_{45d}	全年	2.31	2.14	2.41	2.49	1792.72	1786.58	1796.33	1798.84
	前汛期	2.49	1.92	2.28	1.85	1784.93	1753.53	1766.68	1768.00
	主汛期	3.07	2.76	3.08	3.41	1832.82	1827.01	1837.50	1844.01
	后汛期	2.99	2.86	3.72	3.52	1817.16	1815.50	1819.53	1823.76

对年洪峰流量序列和主汛期、后汛期洪峰流量序列拟合效果最优；广义极值分布对年最大 3 d 洪量和前汛期最大 3 d 洪量序列拟合效果最优，两参数 Gamma 分布对主汛期最大 3 d 洪量序列拟合最优，P-Ⅲ分布对后汛期最大 3 d 洪量序列拟合最优；两参数 Gamma 分布对年最大 7 d 洪量和主汛期最大 7 d 洪量拟合效果最优，广义极值分布对前汛期最大 7 d 洪量序列拟合效果最优，P-Ⅲ分布对后汛期最大 7 d 洪量序列拟合效果最优；对数正态分布对后汛期最大 15 d 洪量序列拟合效果最优，P-Ⅲ分布对年最大 15 d 洪量、前汛期和主汛期最大 15 d 洪量序列拟合效果最优；P-Ⅲ分布对最大 45 d 洪量的年序列及 3 个分期序列拟合效果均为最优。

在优选出设计要素在不同分期对应的边缘分布后,使用 Frank Copula 函数对前汛期、主汛期、后汛期的 Q_m 、 W_{3d} 、 W_{7d} 、 W_{15d} 和 W_{45d} 5 个设计要素分别进行三维联合分布拟合,并对 Frank Copula 函数联合分布参数 θ_1 、 θ_2 进行估计,结果见表 4。根据 Frank Copula 函数绘制设计要素的联合分布如图 6 所示。

表 4 Frank Copula 函数联合分布参数估计值
Table 4 Estimated parameter values of joint distribution of Frank Copula function

变量	θ_1	θ_2	变量	θ_1	θ_2
Q_m	0.64	1.43	W_{15d}	2.83	1.15
W_{3d}	2.10	2.40	W_{45d}	3.18	2.98
W_{7d}	2.17	0.86			

由图 6 可见,随着各分期 Q_m 设计值的增大,其联合概率值逐渐减小。 Q_m 、 W_{3d} 、 W_{7d} 、 W_{15d} 和 W_{45d} 5 个设计要素的联合概率变化规律大致相同,但不同设计要素的分期间相关性存在差异,具体表现为不同设计要素联合分布图中,联合概率明显变化区域在形状上存在差异。

依据 Frank Copula 函数描述的三分期洪水之间的相关性结构,可推求出在设定前汛期、主汛期、后汛期的分期设计频率相同的前提下,使三者的联合概率等于防洪标准对应的概率,进而得到满足防洪标准的分期设计频率,并根据最适边缘分布曲线得出各设计要素的设计值。龙羊峡水库分期设计洪水成果见表 5。

以峰高量大、防洪不利为基本原则对已有的洪水资料进行分期选择,并兼顾典型洪水线型多样性。将龙羊峡水库不同频率下各分期设计洪水的洪峰流量、洪量与不同峰现时间的分期典型洪水过程线相结合,经同频率放大法缩放和修匀,从而得到不同线型(如尖瘦型、矮胖型等)的龙羊峡水库分期设计洪水过程线。龙羊峡水库部分线型设计洪水过程线如图 7 所示,图中黑色实线为各分期最大可能洪水的设计洪水过程线,白色实线为各分期千年一遇设计洪水过程线。图 7 中第一排为尖瘦型洪水,主汛期 1958 年型设计洪水过程线呈急涨急落、主峰靠后的尖瘦型特征。图 7 中第二排以矮胖型洪水为主,前汛期 1989 年型洪水与后汛期 1965 年型洪水均为缓

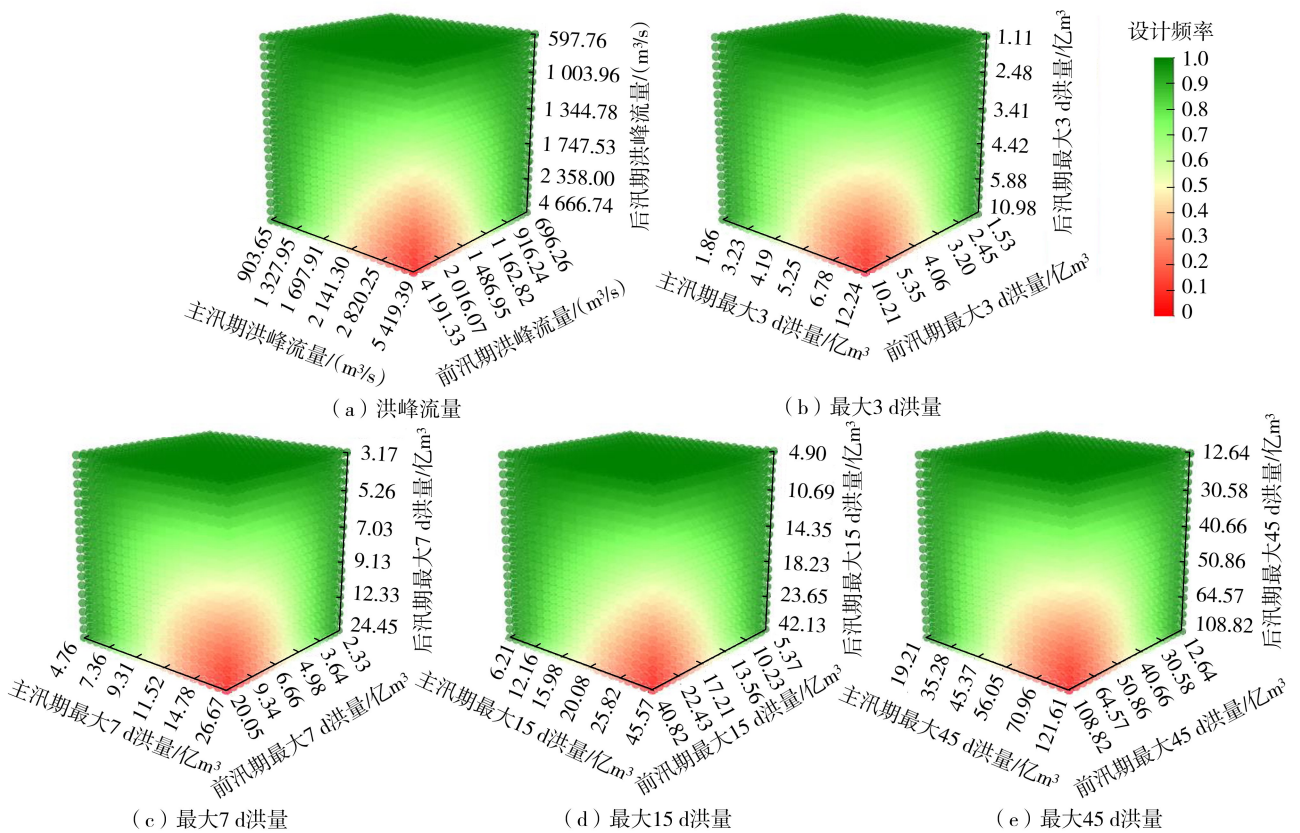


图 6 龙羊峡水库不同频率下不同分期设计洪水要素联合概率分布

Fig. 6 Joint probability distribution of staged design flood elements under different frequencies at Longyangxia Reservoir

表 5 龙羊峡水库分期设计频率及设计要素值

Table 5 Staged design flood frequency and design element values at Longyangxia Reservoir

防洪标准	分期	Q_m		W_{3d}		W_{7d}		W_{15d}		W_{45d}	
		设计 频率/%	设计值/ (m^3/s)	设计 频率/%	设计值/ ($亿 m^3$)	设计 频率/%	设计值/ ($亿 m^3$)	设计 频率/%	设计值/ ($亿 m^3$)	设计 频率/%	设计值/ ($亿 m^3$)
PMF	年最大		10400.00		22.78		51.57		82.75		226.76
	前汛期		8937.00		20.44		43.14		75.47		162.83
	主汛期		10950.00		23.94		52.98		83.06		238.62
	后汛期		9514.00		22.40		50.45		78.36		212.84
$P=0.05\%$	年最大	0.050	7772.29	0.050	16.73	0.050	36.14	0.050	60.46	0.050	168.18
	前汛期	0.048	6317.29	0.044	14.70	0.045	30.51	0.047	54.52	0.045	105.39
	主汛期	0.048	7971.40	0.044	17.44	0.045	38.78	0.047	61.95	0.045	172.59
	后汛期	0.048	7064.70	0.044	16.35	0.045	37.39	0.047	60.45	0.045	154.01
$P=0.1\%$	年最大	0.100	7067.00	0.100	15.74	0.100	34.95	0.100	56.61	0.100	160.28
	前汛期	0.097	5828.00	0.098	13.68	0.098	28.15	0.098	50.85	0.097	113.68
	主汛期	0.097	7293.00	0.098	16.34	0.098	36.42	0.098	58.84	0.097	166.80
	后汛期	0.097	6319.00	0.098	15.34	0.098	33.58	0.098	53.58	0.097	150.87
$P=1\%$	年最大	1.000	5404.00	1.000	12.34	1.000	26.63	1.000	43.31	1.000	127.39
	前汛期	0.950	4149.00	0.970	10.23	0.990	20.24	0.990	38.26	0.920	75.61
	主汛期	0.950	5619.00	0.970	12.58	0.990	28.34	0.990	47.87	0.920	135.56
	后汛期	0.950	4666.00	0.970	11.85	0.990	24.89	0.990	41.21	0.920	110.45
$P=2\%$	年最大	2.000	4841.00	2.000	11.27	2.000	24.03	2.000	39.10	2.000	116.18
	前汛期	1.870	3698.00	1.960	9.16	1.980	17.83	1.980	34.30	1.990	68.32
	主汛期	1.870	4886.00	1.960	11.40	1.980	25.80	1.980	44.31	1.990	124.57
	后汛期	1.870	4155.00	1.960	10.75	1.980	22.21	1.980	37.28	1.990	104.17
$P=5\%$	年最大	5.000	4061.00	5.000	9.78	5.000	20.50	5.000	33.29	5.000	104.30
	前汛期	4.560	3036.00	4.360	7.71	4.530	14.59	4.530	28.86	4.210	58.30
	主汛期	4.560	4181.00	4.360	9.79	4.530	22.32	4.530	39.29	4.210	113.96
	后汛期	4.560	3643.00	4.360	9.24	4.530	18.58	4.530	31.84	4.210	86.28

注:根据龙羊峡水库水文设计相关研究^[37-38],PMF 设计值取 $P = 0.01\%$ 对应的设计值的 1.2 倍。

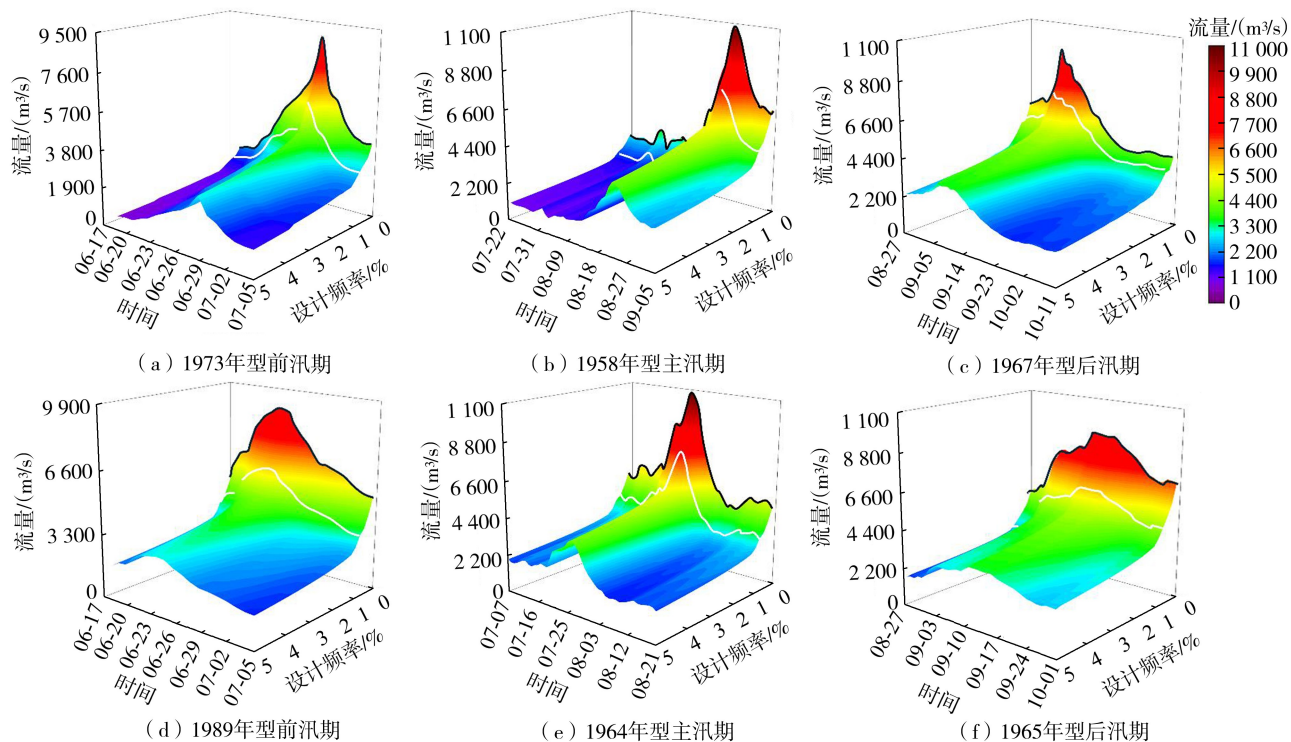


图7 龙羊峡水库部分线型不同分期设计洪水过程线

Fig. 7 Staged design flood hydrographs with varying patterns at Longyangxia Reservoir

涨缓落的矮胖型洪水,主汛期1964年型洪水为双峰尖瘦型洪水。不同分期的洪水线型存在明显差异,且在相同设计频率下,前汛期的设计洪峰流量和各时段设计洪量在3个分期中最小,主汛期的设计洪峰流量和各时段设计洪量在3个分期中最大。

3 结论

a. 本文将 Critic 权重法、局部比较法与模糊集分析法相耦合,提出了一种水库汛期分期的改进模糊集分析法。该方法解决了传统模糊集分析法指标单一、分期阈值判断主观性强的问题,能够综合多种因素客观确定分期节点。将该法应用于龙羊峡水库,得到的汛期分期方案为:6月上旬至6月下旬为前汛期;7月上旬至8月下旬为主汛期;9月上旬至10月下旬为后汛期。经 Cunderlik 法合理性检验,该分期结果合理可行,为汛期分期提供了新方法。

b. 本文采用 P-Ⅲ分布、对数正态分布、广义极值分布、两参数 Gamma 分布4种线型对唐乃亥水文站的径流分期极大值样本进行拟合,结果表明4种分布线型的拟合效果各异,其中广义极值分布拟合最优次数最多,其次是两参 Gamma 分布、P-Ⅲ分布和对数正态分布。

c. 基于汛期分期结果,通过 Frank Copula 函数构建汛期各分期间的相关关系,推求了龙羊峡水库分期设计洪水。结果表明,主汛期设计洪水的洪峰流量和洪量均高于年设计洪水,而前汛期和后汛期

设计洪水的洪峰流量与多日洪量小于年设计洪水。

参考文献:

- [1] 刘波,张璐然,王文鹏,等.我国城市工业用水效率与经济发展水平的秩匹配度原理及特征解析[J].水资源保护,2024,40(2):64-71. (LIU Bo, ZHANG Luran, WANG Wenpeng, et al. Principle and characteristic analysis of rank matching degree between urban industrial water use efficiency and economic development level in China[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 64-71. (in Chinese))
- [2] 安莉娜,范国福,吴迪,等.基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):35-41. (AN Lina, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 35-41. (in Chinese))
- [3] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].中国水利,2019(20):1-3. (XI Jinping. Speech at the symposium on ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin[J]. China Water Resources, 2019(20): 1-3. (in Chinese))
- [4] 刘达,黄本胜,赵璧奎,等.飞来峡水库洪水资源化利用与风险分析[J].水资源保护,2023,39(5):18-24. (LIU Da, HUANG Bensheng, ZHAO Bikui, et al. Flood

- resource utilization and risk analysis of Feilaixia Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (5) : 18-24. (in Chinese)
- [5] 张静,何俊仕. 大伙房水库汛期气象水文特征分析[J]. 人民黄河, 2012, 34 (11) : 45-47. (ZHANG Jing, HE Junshi. Study on hydro-meteorology characteristics in flood season of Dahuofang Reservoir[J]. Yellow River, 2012, 34(11):45-47. (in Chinese))
- [6] MA H B, NITTROUER J A, FU X D, et al. Amplification of downstream flood stage due to damming of fine-grained rivers[J]. Nature Communications, 2022, 13(1) : 3054.
- [7] 彭慧敏,李国芳,袁婷婷,等. 上游水库影响下河口村水库分期设计洪水研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(4) : 62-66. (PENG Huimin, LI Guofang, YUAN Tingting, et al. Study on seasonal design flood of Hekoucun Reservoir under the impact of the upstream reservoir [J]. Yellow River, 2021, 43(4) : 62-66. (in Chinese))
- [8] MO C, DENG J, LEI X, et al. Flood season staging and adjustment of limited water level for a multi-purpose reservoir[J]. Water, 2022, 14(5) : 775.
- [9] 王声扬,周研来,朱迪,等. 洞庭湖流域水系汛期分期研究[J]. 水资源研究, 2022, 11(4) : 366-379. (WANG Shengyang, ZHOU Yanlai, ZHU Di, et al. Study on flood season segmentation of Dongting Lake basin [J]. Journal of Water Resources Research, 2022, 11(4) : 366-379. (in Chinese))
- [10] MO C, ZHU C, RUAN Y, et al. Study on the staged operation of a multi-purpose reservoir in flood season and its effect evaluation[J]. Water, 2021, 13(18) : 2563.
- [11] 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 Xiaofei. Application of fuzzy set analysis method in staging flood season of reservoir [J]. Journal of Water Resources and Water, 2015, 26 (2) : 178-181. (in Chinese))
- [12] 林家慧,李俊. 基于区间 Fisher 最优分割法的汛期分期研究[J]. 人民长江, 2025, 56(2) : 91-98. (LIN Jiahui, LI Jun. Research on flood season dividing based on interval Fisher optimal segmentation method [J]. Yangtze River, 2025, 56(2) : 91-98. (in Chinese))
- [13] 虞慧,刘星根,吴晓彬,等. 指标权重算法对 Fisher 最优分割在水库汛期分期中的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2021 (1) : 105-110. (YU Hui, LIU Xinggen, WU Xiaobin, et al. The influence of the weight of algorithm on the Fisher's optimal segmentation in the reservoir's flood season [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021 (1) : 105-110. (in Chinese))
- [14] 占润进. 福建省洪水的季节性和分期设计洪水的分析计算[J]. 水电站设计, 2003(2) : 66-70. (ZHAN Runjin. Analysis and calculation of seasonal and staged design floods in Fujian Province [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2003(2) : 66-70 (in Chinese))
- [15] 邹鹰. 分期设计洪水标准计算方法研究[J]. 水文, 2007, 27(2) : 54-56. (ZOU Ying. A method of estimating stage design floods during flood season [J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(2) : 54-56. (in Chinese))
- [16] 刘攀,郭生练,肖义,等. 浅析分期设计洪水与年最大设计洪水的关系[J]. 人民长江, 2007, 38(6) : 27-28. (LIU Pan, GUO Shenglian, XIAO Yi, et al. A preliminary analysis of the relationship between staged design floods and annual maximum design floods [J]. Yangtze River, 2007, 38(6) : 27-28. (in Chinese))
- [17] 刘攀,郭生练,闫宝伟,等. 再论分期设计洪水频率与防洪标准的关系[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1) : 187-192. (LIU Pan, GUO Shenglian, YAN Baowei, et al. Supplementary of relationship between seasonal flood frequency and flood control standard [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30 (1) : 187-192. (in Chinese))
- [18] 王文圣,覃光华,梁瀚续,等. 基于 Copula 函数推求的管运洪水防洪标准探讨[J]. 水资源保护, 2023, 39(1) : 79-82. (WANG Wensheng, QIN Guanghua, LIANG Hanxu, et al. Probe on flood control standards of manage-flood based on Copula function [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1) : 79-82. (in Chinese))
- [19] 蒯文慧,宋松柏. 基于混合 Copula 函数的洪水联合概率计算方法[J]. 水力发电学报, 2021, 40(12) : 40-51. (LIN Wenhui, SONG Songbai. Calculation method of joint probability for flood based on mixed Copula function [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(12) : 40-51. (in Chinese))
- [20] 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 Xiaoying, ZHANG Yan, TONG Zechun. 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))
- [21] 石朋,樊鑫洋,陈干琴,等. 基于马斯京根法的区间洪水推求方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6) : 1-7. (SHI Peng, FAN Xinyang, CHEN Ganqin, et al. An inter-basin flood calculation method based on Muskingum routing method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (6) : 1-7. (in Chinese))
- [22] 文明征,郭磊,贾永刚,等. 变点分析理论在高密度电阻率探杆观测海床界面中的应用[J]. 海洋通报, 2017, 36(5) : 521-527. (WEN Mingzheng, GUO Lei, JIA Yonggang, et al. Application of change point theory in identifying water-seabed interface based on high-density resistivity probe [J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(5) : 521-527. (in Chinese))
- [23] 陈璐,郭生练,刘攀,等. 汛期分期合理性检验方法及应

- 用研究[J]. 中国防汛抗旱, 2008, 18(4): 55-58. (CHEN Lu, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Research on the rationality testing method and application of flood season staging[J]. China Flood & Drought Management, 2008, 18(4): 55-58. (in Chinese))
- [24] 舒章康, 刘冀, 董晓华, 等. 基于模糊集合分析的汛期分期降雨极值分布研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(7): 55-64. (SHU Zhangkang, LIU Ji, DONG Xiaohua, et al. Distribution of staged extreme rainfalls in flood season based on fuzzy set analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(7): 55-64. (in Chinese))
- [25] 王红瑞, 李一阳, 杨亚锋, 等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 18-25. (WANG Hongrui, LI Yiyang, YANG Yafeng, et al. Construction and application of evaluation model for intensive and safe utilization of water resources[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 18-25. (in Chinese))
- [26] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算规范: SL44—2006[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [27] 罗赞, 董增川, 管西柯, 等. 基于 Copula 函数的太湖流域汛期洪涝灾害危险性分析[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 223-235. (LUO Yun, DONG Zengchuan, GUAN Xike, et al. Flood risk analysis in the taihu basin during flood periods based on copula function[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(1): 223-235. (in Chinese))
- [28] 王慧颖, 刘舒, 李敏, 等. 基于 Copula 函数的区域洪水频率分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(8): 30-42. (WANG Huiying, LIU Shu, LI Min, et al. Regional flood frequency analysis based on copula function[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(8): 30-42. (in Chinese))
- [29] 何朝飞, 王晓云, 陈伏龙, 等. 玛纳斯河不同峰量组合下的融雪洪水风险分析[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1): 15-21. (HE Chaofei, WANG Xiaoyun, CHEN Fulong, et al. Risk analysis of snowmelt flood under different combination of flood peaks and flood volumes in Manas River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1): 15-21. (in Chinese))
- [30] 隆院男, 黄春福, 莫军成, 等. 非一致性条件下松澧地区洪水遭遇规律分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 14-22. (LONG Yuannan, HUANG Chunfu, MO Juncheng, et al. Analysis of flood coincidence law in Song-Li Region under non-consistency conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 14-22. (in Chinese))
- [31] 冯瑞瑞, 荣艳淑, 吴婷婷. 基于 Copula 函数的宜昌水文干旱特征分析[J]. 水文, 2020, 40(2): 23-30. (FENG Ruirui, RONG Yanshu, WU Futing. Analysis of hydrological drought characteristics in Yichang based on Copula function[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(2): 23-30. (in Chinese))
- [32] 吴志勇, 汪瑛琪, 何海, 等. 水库抗暴雨能力概率预报的降雨情景构建方法[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 9-16. (HU Zhiyong, WANG Yinqi, HE Hai, et al. A method of constructing rainfall scenario for probability forecast of rainstorm resistance capacity of reservoirs[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(03): 9-16. (in Chinese))
- [33] 赵子萌, 曹永强, 常志冬, 等. 黄河沿线 9 省区水土资源生态承载力耦合协调分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 121-129. (ZHAO Zimeng, CAO Yongqiang, CHANG Zhidong, et al. Coupling coordination analysis of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 121-129. (in Chinese))
- [34] 牛晨宇, 曾麒洁, 张志华, 等. 黄河流域水资源配置问题研究与优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4357-4366. (NIU Chenyu, ZENG Qijie, ZHANG Zhihua, et al. Research and optimization of water resources allocation in the Yellow River basin[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(10): 4357-4366. (in Chinese))
- [35] 贺顺德, 宋伟华, 崔鹏, 等. 龙羊峡水库现状防洪运用条件及汛限水位论证[J]. 人民黄河, 2020, 42(6): 22-26. (HE Shunde, SONG Weihua, CUI Peng, et al. Flood control operation conditions and flood limited water level demonstration of Longyangxia reservoir in 2019[J]. Yellow River, 2020, 42(6): 22-26. (in Chinese))
- [36] 席海潮, 解阳阳, 刘赛艳, 等. 龙羊峡水库蓄丰补枯特征研究[J]. 水文, 2024, 44(3): 47-51. (XI Haichao, XIE Yangyang, LIU Saiyan, et al. Characteristics of wetness storage and dryness compensation of Longyangxia reservoir[J]. Journal of China Hydrology, 2024, 44(3): 47-51. (in Chinese))
- [37] 王正发. 黄河上游龙羊峡以上大型水电站工程可能最大洪水估算初探[J]. 西北水电, 2012(1): 1-6. (WANG Zhengfa. Estimation of PMF for large-sized hydropower stations at the upper reach of Longyangxia hydropower station on the Yellow River[J]. Northwest Hydropower, 2012(1): 1-6. (in Chinese))
- [38] 祁善胜. 龙羊峡水库建库前后水文设计成果对比[J]. 红水河, 2022, 41(1): 44-49. (QI Shansheng. Comparison of hydrological design results before and after Longyangxia Reservoir construction[J]. Hongshui River, 2022, 41(1): 44-49. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-15 编辑: 雷燕)