

徐志刚, 刘风雨, 陈瑞刚, 等. 基于洪水分级的青山殿水库洪水预报[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 661-671. XU Z G, LIU F Y, CHEN R G, et al. Flood forecast of the Qingshandian Reservoir based on flood-based classification[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 661-671. (in Chinese)

## 基于洪水分级的青山殿水库洪水预报

徐志刚<sup>1</sup>, 刘风雨<sup>2</sup>, 陈瑞刚<sup>3</sup>, 杨丽丽<sup>4</sup>, 康爱卿<sup>5</sup>

(1. 杭州市林业水利局, 杭州 310014; 2. 云粒智慧科技有限公司 北京 100037; 3. 浙江省钱塘江流域中心, 杭州 310020; 4. 北京合源科技有限公司, 北京 100086; 5. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 为提高洪水预报精度, 减小全流域使用单一参数集而产生的预报误差, 以青山殿水库为研究对象, 将历史洪水分为大、中、小 3 个等级, 采用新安江模型和 SCE-UA 参数优化算法, 基于皮尔逊相关系数分析累计降雨量和实测洪峰流量的相关性, 选取相关性最优的最大 6 h 累积降雨量作为参数应用指标, 分级后的大中小洪水选用对应的参数集进行洪水验证及预报。结果表明: 未对洪水进行分级时, 38 场洪水总体合格率为 92.1%, 平均确定性系数为 0.82; 按照洪水等级划分大中小洪水后进行洪水过程模拟, 大中小洪水场次合格率 100%, 确定性系数平均为 0.92、0.88 和 0.87, 平均确定性系数为 0.88, 分级后各场次的合格率与确定性系数提高, 拟合效果更好; 基于皮尔逊相关系数分析洪峰流量与最大 1、3、6、24 h 降雨量的相关关系, 最大 6 h 的降雨量与洪峰流量的皮尔逊相关系数最高, 取预见期内最大 6 h 累积降雨量作为大中小参数判定条件, 在 2021 年汛期实际预报中, 洪水预报结果全部合格, 4 场大中型洪水拟合程度好, 确定性系数高, 基于洪水分级的洪水预报精度较高、合理可行, 可为水库防洪提供参考。

**关键词:** 青山殿水库; 新安江模型; 洪水等级划分; 相关分析; 皮尔逊相关系数

**中图分类号:** TV697.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0068

青山殿水库是一座以发电为主, 兼有防洪等功能的中型水电工程。洪水预报作为重要的非工程防洪措施之一, 需要对洪水过程做出及时准确的预报, 获取水库未来一段时间内的来水总量、洪峰流量和洪峰出现时间等信息<sup>[1-3]</sup>。众多水文模型, 如 SHE(system hydrological European)模型<sup>[4-5]</sup>、SWAT(soil and water assessment tool)模型<sup>[6]</sup>、TOPKAPI(TOPographical kinematic approximation and integration)模型<sup>[7-9]</sup>等陆续提出, 实际作业时根据需选择模型进行预报<sup>[10-13]</sup>。但在我国, 应用最广泛、效果最好、最实用的水文模型仍是新安江模型<sup>[14-19]</sup>。目前大多数洪水预报方案针对全流域只有一套模型参数, 场次洪水数量大, 各个场次的雨型各不相同, 往往单一的一套参数难以匹配大部分洪水场次, 这将不可避免地产生误差<sup>[20-22]</sup>。李匡等<sup>[23]</sup>率定不同类型洪水模型参数进行洪水预报, 结果表明预报精

度优于洪水不分级的方案。苑希民等<sup>[24]</sup>以山东省小清河流域黄台桥水文站为例开展洪水分级智能预报研究, 有效提高洪水预报精度; 姬战生等<sup>[25]</sup>基于系统聚类分析将洪水分为两类进行洪水水位区间预报, 使两类洪水的洪峰水位预报精度有所提高, 提高了区间预报结果的可利用性。

本文以新安江模型为基础, 对水库历史洪水场次的入库流量进行大中小洪水划分, 充分利用历史监测数据, 以大中小洪水参数分别进行率定与检验。洪水划分依据于实测洪峰流量, 雨量作为模型的主要输入条件, 雨量与洪峰流量的相关性对参数的选用可提供参考。基于皮尔逊相关系数, 通过分析洪峰流量与最大 1、3、6、24 h 的累积降雨量, 分析相关性最好的降雨作为参数使用的判定条件, 可为水库的来水预报提供一定的参考依据与技术支持。

收稿日期: 2023-11-09 修回日期: 2024-04-04 网络出版时间: 2024-07-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240722.1421.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3006503); 浙江省水利科技计划项目(RA2204)

作者简介: 徐志刚(1975—), 男, 浙江杭州人, 主要从事林业水利信息化的规划、设计、建设和管理研究。E-mail: [syl319@163.com](mailto:syl319@163.com)

通信作者: 康爱卿(1983—), 男, 山西吕梁人, 正高级工程师, 博士, 主要从事流域综合治理信息化及水系调度研究。E-mail: [hydmodels@163.com](mailto:hydmodels@163.com)

## 1 研究区概况

青山殿水库位于临安区潜川镇青山殿村昌化江河段上,距临安区政府所在地 56.0 km,距杭州市 109.0 km。大坝位于分水江上游昌化江上,即昌化江和天目溪汇合口上游 3.8 km 的昌化江青山殿峡谷中。坝址多年平均流量为 47.2 m<sup>3</sup>/s,多年平均气温 15.3 ℃。青山殿水库流域属典型的副热带季风气候,春季夏初,太平洋副热带高压逐渐加强,与北方冷空气交汇,静止峰在本地区徘徊,形成连续阴雨天气。雨洪的历时长、强度大,雨量充沛。

青山殿水库流域多年平均降雨量为 1 723 mm,降雨量年内分配不均,集中于汛期 4—10 月,约占年降雨量的 75%,而汛期雨量又常常以梅汛期内的几场暴雨为主,尤其在梅雨期,降水时间长、强度大,极易发生洪涝灾害。因此,极端暴雨是青山殿水库来水预报的主要因素,降雨量的分析对水库的预报至关重要。

青山殿水库兴建于 1997 年,2008 年以前的历史数据由于资料可靠性不足不予使用,统计整理青

山殿水库 2008—2020 年洪水数据作为模型输入计算,统计可满足次洪过程模拟的场次共 38 场。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

所用数据包括青山殿水库水文整编数据、地理空间数据和预报降雨数据。青山殿水库整编数据由杭州市水库管理中心提供;地理空间数据含数字高程数据和矢量数据由浙江省自然资源厅提供,DEM 数据网格精度为 12.5 m;预报降雨数据含监测感知站点数据和气象数据,雨量站和蒸发站等监测感知站点数据由杭州市水文水资源监测中心提供,气象数据由浙江省水利厅水利数据仓提供。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 新安江模型

新安江模型是一个概念性模型,在我国湿润、半湿润地区得到了广泛的应用,模型建模基础为湿润地区的蓄满产流原理,本研究采用三水源新安江模型<sup>[26]</sup>。三水源新安江模型主要特点是“三分”,即分单元、分水源、分阶段,其模型结构见图 1。

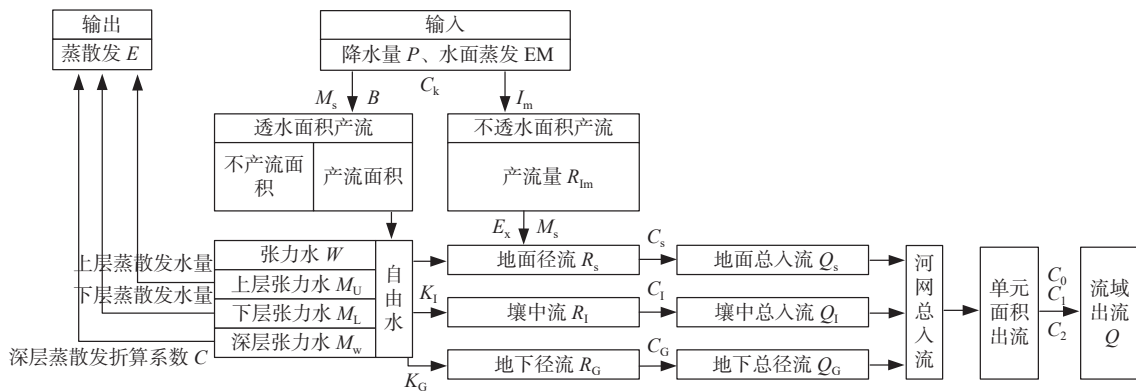


图 1 新安江模型结构

Fig. 1 Structure of Xin'anjiang model

#### 2.2.2 SCE-UA 算法

SCE-UA 算法是一种可快速有效地搜索到模型最优参数集的有效途径<sup>[17]</sup>。这种优化算法根据生物竞争进化的思路,通过对复合体的多次洗牌,确保每个复合体的信息在整个空间中得以共享,在收敛得到全局最优解的同时,有效地避免局部最优现象,对于多目标、高维度的实际应用问题具有很高的稳定性且效果更佳。

#### 2.2.3 皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数是一种用于度量 2 个变量之间相关性的统计方法<sup>[27-29]</sup>,它衡量的是 2 个变量之间

的线性关系的强度和方向,它的值介于-1 和 1 之间,其中,1 表示 2 个变量完全正相关,-1 表示 2 个变量完全负相关,0 表示 2 个变量之间没有任何线性关系,表达式为

$$P_{x,y} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(x-\mu_x)(y-\mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

式中:  $P_{x,y}$  表示总体相关系数;  $\text{cov}(x,y)$  表示变量  $x$ 、 $y$  的协方差;  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  表示变量  $x$ 、 $y$  的标准差。

皮尔逊相关系数  $r$  可以通过变量的标准分数均值估计得出,公式为

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \right) \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \right) \quad (2)$$

式中:  $\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x}$ 、 $\bar{x}$ 、 $\sigma_x$  分别为变量  $x$  的标准分数、样本平均值和样本标准差。

综上,皮尔逊相关系数的计算公式为

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x^2 - \left( \sum_{i=1}^n x \right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y^2 - \left( \sum_{i=1}^n y \right)^2}} \quad (3)$$

式中:  $r$  表示皮尔逊相关系数;  $x$  和  $y$  分别表示变量;  $n$  表示样本数量。

在采用皮尔逊相关系数分析累积时段降雨量与洪峰流量的线性拟合程度,需要注意的是,皮尔逊相关系数只能用于定量数据,要求 2 个变量都是连续的且具有大致相同的分布形状和方差。如果数据不符合这些条件,则需要使用其他类型的相关系数来度量变量之间的相关性。

### 3 模型构建

#### 3.1 流域分块

青山殿水库流域内共设 25 个遥测雨量站,基于 ArcGIS 软件进行泰森多边形划分,并计算各个分区的雨量站权重,雨量站权重划分结果见表 1。

表 1 青山殿水库 25 个雨量站权重划分

Tab. 1 Weight division of 25 rainfall stations in Qingshandian Reservoir

站名	权重	站名	权重
清凉峰岭下	0.05	大明岗湾脚	0.02
河桥蒲村	0.03	清凉峰昱岭关	0.05
湍口军建	0.10	昌化凉源	0.05
昌化道场坪	0.05	龙岗新溪坞	0.02
昌化龙门寺	0.03	龙岗龙井郑家	0.02
湍口桐坑	0.03	龙岗桃花村	0.05
湍口凉溪	0.04	岛石芦塘	0.02
湍口	0.06	龙岗双石	0.05
龙岗西坞	0.03	岛石上许	0.02
昌化	0.08	岛石坞	0.03
龙岗中梅家	0.07	岛石呼日村	0.03
岛石毛竹窠	0.01	龙岗外川村	0.02
清凉峰候头	0.04		

#### 3.2 模型参数率定

基于历史洪水场次数据,使用 SCE-UA 算法对

新安江模型进行参数调优。新安江模型在日模型模拟中得到蒸散发系数等产流参数,在次洪过程模拟中拟合得到汇流参数,故在洪水分级过程中参数的差异性仅体现在汇流参数中。

青山殿水库 38 场洪水大中小场次划分以洪峰流量作为划分依据,洪峰流量超过 20 a 一遇设计洪水的场次为大洪水,在 20 a 一遇至 5 a 一遇的为中洪水,5 a 一遇以下为小洪水。各个场次划分率定期与检验期,经参数率定优化后得出各站点的最优参数集,模型参数率定结果见表 2。

#### 3.3 历史洪水验证结果分析

青山殿水库 2008—2020 年 38 场洪水,分为率定期 30 场,验证期 8 场。未按照洪水分级前,选用单一参数集进行历史洪水参数率定,青山殿水库未分级的洪水模拟结果见表 3。根据计算结果分析,新安江模型 38 场洪水的次洪模拟过程中,根据《GB/T 22482—2008 水文预报情报规范》选择洪峰相对误差、洪量相对误差、峰现时间误差和确定性系数作为评价依据,总体合格率 92.1%,满足甲级精度标准,平均确定性系数为 0.82。

青山殿水库 2008—2020 年 38 场洪水根据历史场次划分为大洪水 4 场、中洪水 9 场和小洪水 25 场。其中,大洪水对应洪峰等级为 20 a 一遇以上,中洪水对应洪峰等级为 5 a 一遇至 20 a 一遇,小洪水对应洪峰等级为 5 a 一遇以下。青山殿水库洪水分级后的模拟结果见表 4。

在历史洪水模拟计算中,对于洪峰、洪量的计算,各场次的合格率较高,但确定性系数较低,表明洪水过程线拟合程度一般。分析原因为青山殿水库的入库流量是由自身出库流量及水库水位、库容曲线反推而来的,出库流量易受下游分水江水库的调度影响,历史错峰调度对洪水资料的可靠性产生一定误差。

按照洪水等级划分大中小洪水后并进行洪水过程模拟,大中小洪水场次全部合格,确定性系数的平均值分别为 0.92、0.88 和 0.87,平均确定性系数 0.88,分级后各场次的合格率与确定性系数提高,拟合效果更好。在原有产流参数的基础上,针对大洪水提高了汇流参数  $C_s$  和  $C_t$ ,校正了原有基础大洪水汇流少的误差,修改马斯京根法演算参数,坦化洪水流量过程。对小洪水降低汇流参数,校正了汇流大、滞时长的误差,优化高瘦型洪水过程线,进一步提高精度。

表 2 模型参数率定结果

Tab. 2 Calibration results of model parameters

参数	参数名称 参数释义	洪水分级			洪水分级前
		大洪水	中洪水	小洪水	
$C_k$	蒸散发折算系数	1.04	1.04	1.04	1.04
$C$	深层蒸散发折算系数	0.19	0.19	0.19	0.19
$I_m$	不透水面积占全流域面积比例	0.02	0.02	0.02	0.02
$M_U$	上层张力水容量	14.26	14.26	14.26	14.26
$M_L$	下层张力水容量	71.99	71.99	71.99	71.99
$M_w$	深层张力水容量	155.48	155.48	155.48	155.48
$B$	蓄水容量-面积分布曲线指数	0.4	0.4	0.4	0.4
$M_s$	表层自由水蓄水容量	46.91	46.91	46.91	46.91
$E_x$	自由水分布曲线指数	1.2	1.2	1.2	1.2
$K_G$	地下水出流系数	0.29	0.29	0.29	0.29
$K_t$	壤中流出系数	0.44	0.44	0.44	0.44
$C_s$	河网蓄水消退系数	0.72	0.68	0.65	0.67
$C_t$	壤中流退水系数	0.83	0.77	0.71	0.72
$C_G$	地下径流退水系数	0.97	0.97	0.98	0.97
$C_0$	马斯京根法演算参数	0.23	0.22	0.25	0.25
$C_1$	马斯京根法演算参数	0.55	0.6	0.63	0.41
$C_2$	马斯京根法演算参数	0.22	0.18	0.12	0.34

## 4 洪水预报验证

采用半分布式新安江模型对青山殿水库开展洪水预报,通过历史洪水模拟,表明新安江模型在该流域是适用的。为验证本预报方案的科学性,以预报降雨为输入,模型逐小时滚动预报,预见期为 72 h,以 2021 年汛期验证模型的精准性。

### 4.1 降雨分级的相关系数分析

在次洪洪水模拟过程中,参数分为大、中、小洪水 3 套参数,在实时滚动预报中,参数的选取是模型预报的关键。

选取次洪过程 38 场洪水的最大 1、3、6、24 h 的累积降雨量,整理实测洪峰流量,计算皮尔逊相关系数(表 5),洪峰流量与最大 6 h 的累积降雨相关性最高,皮尔逊系数为 0.92,24 h 次之,1 h 最低,可得出洪峰流量与峰值雨量的相关性未必最优,以最大 6 h 雨量作为参数划分评定条件。统计最大 6 h 累积雨量,超过 110 mm 时采用大洪水参数,在 80~110 mm 时采用中洪水参数,在 80 mm 以下时采用小洪水参数。

### 4.2 汛期洪水预报

#### 4.2.1 20210516 场次洪水

根据青山殿水库坝址上游 25 个遥测雨量站的

预报数据,2021 年 5 月 16 日凌晨发生暴雨,此次降雨集中在 5 月 16 日 0 点至 10 点,10 点后几乎无降雨。降雨中心位于流域中上游,最大小时降雨量为 5 月 16 日 7 时达到 18.7 mm,最大 6 h 累计降雨量为 77.4 mm,根据降雨划分采用小洪水参数进行预报。

青山殿水库于 5 月 16 日 10 时达到最大流量,青山殿最大入库流量为 1856 m<sup>3</sup>/s,断面洪水预报过程见图 2。经验证,洪峰相对误差为 6%,洪量相对误差为 5%,峰现时间误差为 1 h,确定系数为 0.96,模拟结果在许可误差范围之内。

#### 4.2.2 20210703 场次洪水

2021 年 7 月 2 日发生暴雨,此次降雨集中在 7 月 2 日 12 点至 19 点,降雨中心位于流域下游,最大小时降雨量为 7 月 2 日 16 时达到 34.4 mm,最大 6 h 累计降雨量为 111.1 mm,根据降雨划分采用大洪水参数进行预报。

青山殿水库于 7 月 2 日 18 时达到最大流量,最大入库流量为 3 028 m<sup>3</sup>/s,断面洪水预报过程见图 3。经验证,洪峰相对误差为 2%,洪量相对误差为 7%,峰现时间误差为 1 h,确定系数为 0.91,模拟结果在许可误差范围之内。



表3 青山殿水库未分级的洪水模拟结果

Tab. 3 Unclassified flood simulation results of Qingshadian Reservoir

洪号	降雨/ mm	实测洪峰/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	模拟洪峰/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	洪峰相对 误差/%	实测洪量/ $10^6 \text{m}^3$	模拟洪量/ $10^6 \text{m}^3$	洪量相对 误差/%	峰现时间 误差/h	确定性系数	是否合格	场次
20190811	197.65	4 122.2	3 993.2	-3.1	384.5	382.3	-0.6	0	0.83	合格	率定期
20200706	165.06	3 672.5	3 809.4	3.7	277.6	266.1	-4.1	-1	0.91	合格	验证期
20170627	161.88	3 573.8	3 701.8	3.6	439.7	434.9	-1.1	0	0.87	合格	率定期
20130607	175.94	3 125.2	3 244.1	3.8	370.0	386.2	4.4	-2	0.91	合格	率定期
20190713	146.42	2 821.1	2 865.4	1.6	161.1	151.2	-6.1	0	0.82	合格	率定期
20080610	111.36	2 790.0	2 380.9	-14.7	186.0	177.8	-4.4	1	0.77	合格	验证期
20080618	139.87	2 765.6	2 952.7	6.8	168.7	159.5	-5.5	2	0.79	合格	验证期
20190621	128.77	2 511.7	2 585.8	3.0	126.6	130.6	3.2	-3	0.91	合格	率定期
20110619	109.26	2 486.5	2 551.3	2.6	138.6	140.5	1.4	-1	0.83	合格	率定期
20110615	132.18	2 207.8	2 603.3	17.9	153.9	162.9	5.8	-1	0.80	合格	率定期
20130627	106.00	1 885.0	1 883.4	-0.1	103.5	98.0	-5.3	0	0.92	合格	率定期
20180621	127.39	1 879.4	1 432.7	-23.8	137.0	141.0	2.9	0	0.65	不合格	率定期
20140513	122.00	1 832.3	1 886.3	2.9	139.2	143.0	2.7	0	0.84	合格	率定期
20150608	97.59	1 728.3	1 976.6	14.4	78.6	81.1	3.2	0	0.89	合格	率定期
20160625	101.00	1 587.6	1 591.7	0.3	50.1	48.5	-3.2	0	0.94	合格	率定期
20140621	97.50	1 528.3	1 535.5	0.5	66.6	61.5	-7.7	0	0.81	合格	率定期
20100714	62.41	1 518.4	1 489.4	-1.9	54.2	51.8	-4.4	0	0.79	合格	验证期
20180423	70.90	1 450.4	1 528.2	5.4	51.8	56.8	9.7	0	0.91	合格	率定期
20150623	54.50	1 449.0	1 326.0	-8.5	43.3	43.1	-0.5	0	0.87	合格	率定期
20160529	59.35	1 421.2	1 083.4	-23.8	21.6	21.3	-1.4	0	0.63	不合格	率定期
20120808	88.81	1 412.8	1 288.2	-8.8	27.1	29.5	8.9	1	0.72	合格	率定期
20100306	54.79	1 312.3	1 162.3	-11.4	38.1	37.0	-2.9	-1	0.79	合格	率定期
20090728	89.85	1 274.1	1 230.0	-3.5	74.3	67.3	-9.4	0	0.72	合格	率定期
20150809	106.50	1 236.7	1 348.8	9.1	71.5	74.7	4.5	0	0.88	合格	验证期
20150821	81.50	1 151.2	1 279.2	11.1	63.1	60.5	-4.1	0	0.78	合格	验证期
20200621	52.60	1 111.6	1 144.5	3.0	78.8	80.6	2.3	0	0.95	合格	率定期
20140715	64.24	1 097.4	955.7	-12.9	21.9	21.0	-4.1	-1	0.81	合格	率定期
20100303	80.74	1 094.5	1 050.2	-4.0	25.6	27.2	6.2	-2	0.84	合格	验证期
20160929	33.00	1 067.2	947.3	-11.2	52.1	38.5	-26.1	0	0.61	不合格	率定期
20170612	37.90	982.8	1029.2	4.7	86.7	94.6	9.1	2	0.96	合格	率定期
20160406	48.73	955.2	952.5	-0.3	66.7	67.6	1.3	-2	0.87	合格	率定期
20110717	97.15	853.0	827.5	-3.0	47.0	48.5	3.2	1	0.88	合格	率定期
20170319	33.84	716.4	658.4	-8.1	30.1	36.1	19.9	1	0.87	合格	率定期
20110831	57.63	662.0	635.0	-4.1	46.3	46.1	-0.4	0	0.88	合格	率定期
20200604	34.19	657.3	579.5	-11.8	27.7	24.9	-10.1	0	0.75	合格	验证期
20120306	38.20	520.0	543.9	4.6	49.8	49.3	-1.0	-1	0.79	合格	率定期
20120426	44.00	507.0	549.4	8.4	32.5	31.9	-1.8	1	0.79	合格	率定期
20130430	64.50	507.0	513.0	1.2	32.5	29.1	-10.5	1	0.71	合格	率定期

表 4 青山殿水库分级后洪水模拟结果

Tab. 4 Reservoir flood simulation results of Qingshadian Reservoir after classification

洪水等级	洪号	总降雨/ mm	实测洪峰/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	模拟洪峰/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	洪峰相对 误差/%	实测洪量/ $10^6 \text{m}^3$	模拟洪量/ $10^6 \text{m}^3$	洪量相对 误差/%	峰现时间 误差/h	确定性系数	是否合格	场次
大洪水	20190811	197.65	4 122.2	4 031.9	-2.2	384.5	383.0	-0.4	0	0.91	合格	率定期
	20200706	165.06	3 672.5	3 768.3	2.6	277.6	269.6	-2.9	-1	0.93	合格	验证期
	20170627	161.88	3 573.8	3 663.4	2.5	439.7	436.3	-0.8	0	0.89	合格	率定期
	20130607	175.94	3 125.2	3 208.4	2.7	370.0	381.3	3.1	-2	0.96	合格	率定期
中洪水	20190713	146.42	2 821.1	2 852.1	1.1	161.1	154.2	-4.3	0	0.90	合格	率定期
	20080610	111.36	2 790.0	2 503.6	-10.3	186.0	180.3	-3.1	1	0.85	合格	验证期
	20080618	139.87	2 765.6	2 896.6	4.7	168.7	162.3	-3.8	1	0.89	合格	验证期
	20190621	128.77	2 511.7	2 563.6	2.1	126.6	129.4	2.2	-2	0.88	合格	率定期
	20110619	109.26	2 486.5	2 531.9	1.8	138.6	139.9	1.0	0	0.92	合格	率定期
	20110615	132.18	2 207.8	2 484.7	12.5	153.9	160.2	4.1	-1	0.86	合格	率定期
	20130627	106.00	1 885.0	1 883.9	-0.1	103.5	99.7	-3.7	0	0.92	合格	率定期
	20180621	127.39	1 879.4	1 636.7	-12.9	137.0	139.8	2.0	0	0.81	合格	率定期
20140513	122.00	1 832.3	1 870.1	2.1	139.2	141.9	1.9	0	0.93	合格	率定期	
小洪水	20150608	97.59	1 728.3	1 902.1	10.1	78.6	80.4	2.2	0	0.93	合格	率定期
	20160625	101.00	1 587.6	1 590.5	0.2	50.1	49.0	-2.2	0	0.90	合格	率定期
	20140621	97.50	1 528.3	1 533.3	0.3	66.6	63.0	-5.4	1	0.83	合格	率定期
	20100714	62.41	1 518.4	1 498.1	-1.3	54.2	52.5	-3.1	0	0.85	合格	验证期
	20180423	70.90	1 450.4	1 504.9	3.8	51.8	55.3	6.8	0	0.93	合格	率定期
	20150623	54.50	1 449.0	1 362.9	-5.9	43.3	43.2	-0.3	0	0.87	合格	率定期
	20160529	59.35	1 421.2	1 254.7	-11.7	21.6	21.4	-1.0	0	0.76	合格	率定期
	20120808	88.81	1 412.8	1 325.6	-6.2	27.1	28.8	6.2	1	0.77	合格	率定期
	20100306	54.79	1 312.3	1 207.3	-8.0	38.1	37.3	-2.0	-1	0.81	合格	率定期
	20090728	89.85	1 274.1	1 243.2	-2.4	74.3	69.4	-6.6	0	0.77	合格	率定期
	20150809	106.50	1 236.7	1 315.2	6.3	71.5	73.7	3.1	0	0.93	合格	验证期
	20150821	81.50	1 151.2	1 240.8	7.8	63.1	61.3	-2.9	0	0.85	合格	验证期
	20200621	52.60	1 111.6	1 134.6	2.1	78.8	80.1	1.6	0	0.92	合格	率定期
	20140715	64.24	1 097.4	998.2	-9.0	21.9	21.3	-2.9	-1	0.84	合格	率定期
	20100303	80.74	1 094.5	1 063.5	-2.8	25.6	26.7	4.4	-2	0.93	合格	验证期
	20160929	33.00	1 067.2	1 123.3	5.3	52.1	56.6	8.6	0	0.92	合格	率定期
	20170612	37.90	982.8	1 015.3	3.3	86.7	92.2	6.4	2	0.94	合格	率定期
	20160406	48.73	955.2	953.3	-0.2	66.7	67.3	0.9	-2	0.89	合格	率定期
	20110717	97.15	853.0	835.2	-2.1	47.0	48.1	2.2	1	0.96	合格	率定期
	20170319	33.84	716.4	675.8	-5.7	30.1	34.3	14.0	1	0.91	合格	率定期
20110831	57.63	662.0	643.1	-2.9	46.3	46.2	-0.3	0	0.92	合格	率定期	
20200604	34.19	657.3	602.8	-8.3	27.7	25.7	-7.1	0	0.80	合格	验证期	
20120306	38.20	520.0	536.7	3.2	49.8	49.5	-0.7	-1	0.84	合格	率定期	
20120426	44.00	507.0	536.7	5.9	32.5	32.1	-1.3	1	0.84	合格	率定期	
20130430	64.50	507.0	511.2	0.8	32.5	30.1	-7.3	1	0.72	合格	率定期	

表 5 时段累积降雨的皮尔逊相关系数

Tab. 5 Pearson correlation coefficient of cumulative rainfall during the period

项目		时段			
		1 h	3 h	6 h	24 h
大洪水	20190811	37.21	96.47	178.22	197.65
	20200706	34.74	87.49	144.89	165.06
	20170627	36.47	73.62	132.59	161.88
	20130607	37.34	81.56	150.31	175.94
中洪水	20190713	38.27	71.22	108.47	146.42
	20080610	29.00	52.73	99.56	111.36
	20080618	23.07	65.85	103.54	139.87
	20190621	23.15	63.21	87.07	128.77
	20110619	29.52	50.84	94.10	109.26
	20110615	31.80	62.31	87.05	132.18
	20130627	38.47	69.87	93.50	106.00
	20180621	21.36	60.63	85.12	127.39
小洪水	20140513	36.40	75.44	99.77	122.00
	20150608	16.74	38.25	95.42	97.59
	20160625	19.20	45.54	81.15	101.00
	20140621	22.20	48.54	96.67	97.50
	20100714	23.86	41.13	60.12	62.41
	20180423	12.90	33.24	62.05	70.90
	20150623	14.06	26.63	52.01	54.50
	20160529	11.70	27.86	52.10	59.35
	20120808	19.41	43.00	83.20	88.81
	20100306	16.46	26.71	52.05	54.79
	20090728	21.61	43.16	82.77	89.85
	20150809	17.86	32.77	64.58	106.50
	20150821	22.34	39.67	77.17	81.50
	20200621	10.25	24.61	45.86	52.60
	20140715	16.56	29.69	54.53	64.24
	20100303	18.26	36.67	65.95	80.74
20160929	8.34	15.64	29.56	33.00	
20170612	8.82	17.73	33.02	37.90	
20160406	7.89	22.15	39.85	48.73	
20110717	27.31	46.62	59.35	97.15	
20170319	7.83	16.18	30.88	33.84	
20110831	16.80	37.93	54.10	57.63	
20200604	8.18	16.07	30.10	34.19	
20120306	7.98	18.35	35.19	38.20	
20120426	7.70	21.13	40.51	44.00	
20130430	18.27	41.95	53.31	64.50	
皮尔逊相关系数		0.79	0.87	0.92	0.90

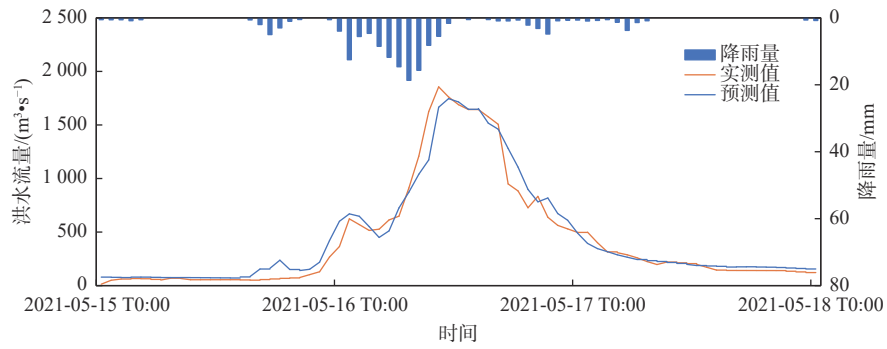


图 2 青山殿水库 20210516 洪水预报结果

Fig. 2 Flood forecast results of Qingshandian Reservoir 20210516

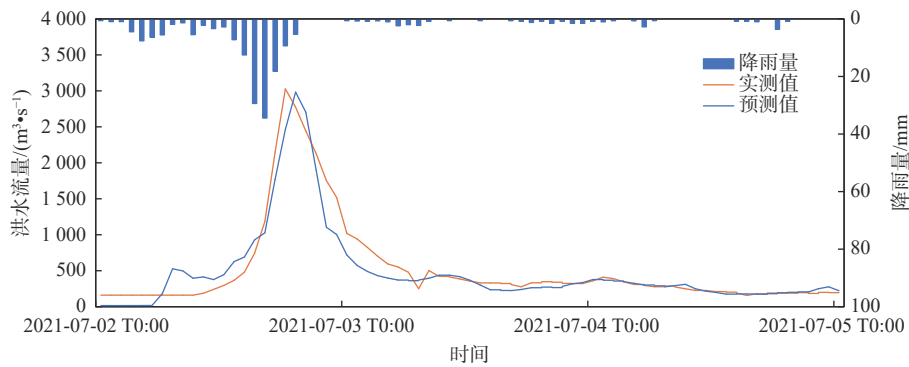


图 3 20210703 洪水预报结果

Fig. 3 20210703 flood forecast results

#### 4.2.3 20210726 场次洪水

2021 年 7 月 26 日, 流域内发生长时间强降雨, 最大小时降雨量于 7 月 26 日 11 时达到 26.5 mm, 最大 6 h 累计降雨量为 87.7 mm, 根据降雨划分采用中洪水参数进行预报。

青山殿水库于 7 月 26 日 13 时达到最大流量, 青山殿最大入库流量为  $2\ 382.5\ \text{m}^3/\text{s}$ , 断面洪水预报过程见图 4。经验证, 洪峰相对误差为 4%, 洪量相对误差为 12%, 峰现时间误差为 1 h, 确定系数为 0.91, 模拟结果在许可误差范围之内。

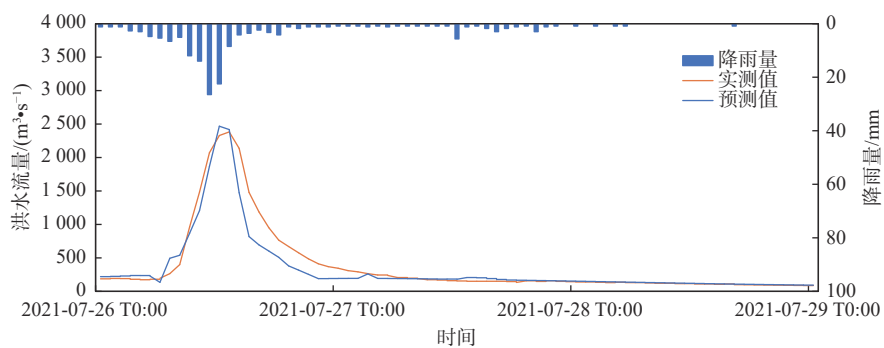


图 4 20210726 洪水预报结果

Fig. 4 20210726 flood forecast results

#### 4.2.4 20210813 场次洪水

2021 年 8 月 13 日发生暴雨, 此次降雨集中在 8 月 12 日 22 点至 13 日 6 点, 最大小时降雨量于 8 月 13 日 1 时达到 23.3 mm, 最大 6 h 累计降雨量为 80.1 mm, 根据降雨划分采用中洪水参数进行预报。

青山殿水库于 8 月 13 日 5 时达到最大流量, 青山殿最大入库流量为  $2\ 078.9\ \text{m}^3/\text{s}$ , 断面洪水预报过程见图 5。经验证, 洪峰相对误差为 2%, 洪量相对误差为 7%, 峰现时间误差为 1 h, 确定系数为 0.84, 模拟结果在许可误差范围之内。



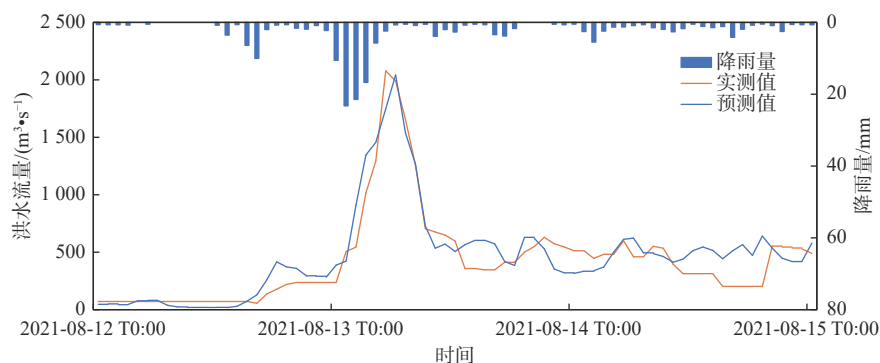


图5 20210813 洪水预报结果

Fig. 5 20210813 flood forecast results

本文通过历史洪水场次进行大中小洪水划分后的参数,基于皮尔逊相关系数分析累积时段降雨量与洪峰流量的相关关系,以最大6 h累积降雨量为参数判定条件。青山殿水库2021年汛期大中型洪水共4场,在预报过程中洪峰流量相对误差,洪量相对误差均在20%以下,确定性系数分别为0.96、0.91、0.91和0.84,拟合程度较高,小洪水场次洪峰流量模拟全部合格,模型预报精度达到甲级精度。

## 5 结论

以三水源新安江模型为基础,采用SCE-UA算法进行参数优化,对青山殿水库上游25个雨量站进行泰森多边形划分水文分区,以流域内4个河道水文站数据为支撑,对青山殿水库2008—2020年共38场洪水,分为率定期与检验期进行水文预报,其精度满足甲级预报精度标准。基于洪水等级划分大中小洪水,大洪水4场,中洪水9场,小洪水25场,并分别率定大、中、小洪水参数,分级后各场次的合格率与确定性系数提高,拟合效果更好。基于皮尔逊相关系数,对1、3、6、24 h时段的最大累积降雨量与实测洪峰流量的相关关系,以最大6 h时段降雨量为参数判定条件。在2021年汛期实际运用中,4场洪水的洪峰误差分别为6%、2%、4%和2%,洪量误差分别为5%、7%、12%和7%,确定性系数为0.96、0.91、0.91和0.84。模型预报结果的精度较高,洪水过程拟合较好,方案合理可行,可为青山殿水库防洪调度提供合理参考。

降雨作为模型输入的主要条件,对模型的精准度至关重要,在分析降雨径流的相关性时,初始土壤含水量、植被系数、水库蓄水量等易对相关性系数计算产生误差。洪水场次的划分与雨量等级的划分过程中,应考虑到不同工况下的下垫面数据和

雨型产生的计算误差。

## 参考文献:

- [1] 马亚楠,李巧玲,胡友兵,等.考虑中小水库/塘坝影响的洪水预报研究[J].水电能源科学,2022,40(4):79-82.
- [2] 刘扬,王立虎.基于改进EMD-LSTM的洪水预测方法研究[J].水利水电技术(中英文),2022(1):35-44. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.01.004.
- [3] 程颖新,何中政,陈济天,等.万安水库后汛期实时防洪预报优化调度策略研究[J].中国农村水利水电,2022(11):66-70. DOI: 10.12396/znsd.220258.
- [4] 刘斯文,刘海隆,王玲. MIKE SHE模型的发展与应用研究[J].水文,2018,38(5):23-28. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2018.05.005.
- [5] 刘蛟,刘晓辉,刘铁,等.驱动数据对流域水文模拟中不同结果要素的影响[J].自然资源学报,2019,34(11):2481-2490. DOI: 10.31497/zrzyxb.20191118.
- [6] SATHIAGASA M C, TONGDEENOK P, KAEWJAMPA N. Assessing the implication of climate change to forecast future flood using SWAT and HEC-RAS model under CMIP5 climate projection in Upper Nan watershed, Thailand[J]. Sustainability, 2023, 15(6): 5276. DOI: 10.3390/su15065276.
- [7] 刘志雨,孔祥意,李致家. TOKASIDE模型及其在洪水预报中的应用[J].水文,2021,41(3):49-56. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200438.
- [8] KONG X Y, LI Z J, LIU Z Y. Flood prediction in ungauged basins by physical-Based TOPKAPI model[J]. Advances in Meteorology, 2019(4): 1-16. DOI: 10.1155/2019/4795853.
- [9] LIANG L L, HU Y F, LIU Z W, et al. Application of

- the TOPKAPI model in flood forecasting of the upstream of the Zhenjiang River in China[J]. *Water*, 2022, 14(4): 618. DOI: [10.3390/w14040618](https://doi.org/10.3390/w14040618).
- [10] 马亚楠, 李致家, 刘墨阳, 等. 洪泽湖以上流域洪水预报研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 19-26. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.008](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.008).
- [11] ZHANG S H, LI Z J, YAO C, et al. A new runoff routing scheme for Xin'anjiang Model and its routing parameters estimation based on geographical information[J]. *Water*, 2020, 12(12): 3429. DOI: [10.3390/w12123429](https://doi.org/10.3390/w12123429).
- [12] 魏子钧, 梁国华, 葛于晋. 考虑上游水利工程影响的产流预报方法研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(6): 49-52. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.06.011](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.06.011).
- [13] 谷一, 王国庆, 郝振纯, 等. 基于新安江模型的曲江流域水文模拟研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(2): 50-55. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2018.02.09](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2018.02.09).
- [14] LI Y T, CAI Y P, FU Q, et al. Flooding prediction for a rainy, dense population river basin of central China [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(4): 689-699. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.007](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.007).
- [15] 张润庆, 何蒙, 姚成等. 新安江-海河模型在烟台市典型流域的径流模拟 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(6): 78-84. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0117](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0117).
- [16] 邓元倩, 李致家, 刘甲奇, 等. 基于 SCE-UA 算法新安江模型在沔河流域的应用 [J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(3): 27-31. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2017.03.06](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2017.03.06).
- [17] 刘希琛, 阚光远, 丁留谦, 等. 新安江模型参数优化的一种约束 SCE-UA 算法研究 [J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2023, 21(5): 434-443. DOI: [10.13244/j.cnki.jiwhr.20230101](https://doi.org/10.13244/j.cnki.jiwhr.20230101).
- [18] 张晓菁, 刘攀, 周丽婷, 等. 考虑水文模型参数时变的水库水位多预见期实时预报: 以水布垱水库为例 [J]. *水利学报*, 2023, 54(4): 426-438. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20220416](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20220416).
- [19] 李琼, 龚珺夫, 王洪心, 等. 湿润地区山区小流域水文模型应用与比较 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 81-86. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0074](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0074).
- [20] 李志超, 张怡雯, 邬强, 等. 基于分级优化与 LSTM 方法的中小流域洪水预报研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(8): 41-49. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2022.08.004](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.08.004).
- [21] 刘可新, 包为民, 阙家骏, 等. 基于主成分分析的 K 均值聚类法在洪水预报中的应用 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2015, 48(4): 447-450. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdak.2020.0117](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdak.2020.0117).
- [22] 陈立华, 冯世伟, 邓芳芳. 漓江流域上游洪水预报方案研究与应用 [J]. *广西大学学报*, 2016, 41(4): 1298-1305.
- [23] 李匡, 刘可新, 刘建军, 等. 基于洪水分级的两江电站洪水预报方案研究 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*. 2018, 16(1): 37-44.
- [24] 苑希民, 李达, 田福昌, 等. 基于 AE-RCNN 的洪水分级智能预报方法研究 [J]. *水利学报*, 2023, 54(9): 1070-1079. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.2023.0148](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.2023.0148).
- [25] 姬战生, 刘小勇, 王军, 等. 基于系统聚类的分水江站水位分类预报和区间预报 [J]. *水电能源科学*, 2023, 41(2): 11-14. DOI: [10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220723](https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220723).
- [26] 吴锐, 马峰, 冯亚鹏. 基于三水源新安江模型的三河口水库洪水预报 [J]. *水资源开发与管理*, 2023, 9(8): 65-71. DOI: [10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2023.08.12](https://doi.org/10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2023.08.12).
- [27] RAHMANI F, FATTAHI H M. A multifractal cross-correlation investigation into sensitivity and dependence of meteorological and hydrological droughts on precipitation and temperature[J]. *Natural Hazards*, 2021, 109(3): 1-23. DOI: [10.1007/s11069-021-04916-1](https://doi.org/10.1007/s11069-021-04916-1).
- [28] 余亚飞, 温忠辉, 商金华, 等. 基于泉群流量与降水量相关性的明水泉域岩溶水强径流带识别 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 56-60. DOI: [10.3880/i.issn.1004-6933.2021.03.009](https://doi.org/10.3880/i.issn.1004-6933.2021.03.009).
- [29] HELMY R, STEVEN B, AUGIE W, et al. Image encoding selection based on person correlation coefficient for time series anomaly detection[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, 82(2): 304-322. DOI: [10.1016/j.aej.2023.09.070](https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.09.070).

## Flood forecast of the Qingshandian Reservoir based on flood-based classification

XU Zhigang<sup>1</sup>, LIU Fengyu<sup>2</sup>, CHEN Ruigang<sup>3</sup>, YANG Lili<sup>4</sup>, KANG Aiqing<sup>5</sup>

( 1. Hangzhou Forestry Water Conservancy Bureau, Hangzhou 310014, China; 2. Yunli Intelligent Technology Co., Ltd., Beijing 100037, China;

3. Zhejiang Qiantang River Basin Center, Hangzhou 310020, China; 4. Beijing Heyuan Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China;

5. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China )

**Abstract:** To enhance the accuracy of flood forecasting and mitigate prediction errors resulting from the utilization of a single parameter set across the entire hydrological model basin, various corresponding parameters were employed in distinct precipitation scenarios.

The research focused on Qingshandian Reservoir, where historical floods were categorized into three levels: large, medium, and small. The Xin'anjiang model and SCE-UA parameter optimization algorithm were employed to investigate the correlation between cumulative rainfall and measured flood peak flow, utilizing the Pearson correlation coefficient. The parameter application index was determined as the maximum 6 h cumulative rainfall exhibiting the strongest correlation. Flood verification and prediction were subsequently performed utilizing the corresponding parameter set.

The findings indicated that when floods were not classified, the overall pass rate for 38 floods stood at 92.1%, with an average deterministic coefficient of 0.82. Following the classification of floods into large, medium, and small categories, flood process simulation was conducted. Consequently, the pass rate for large, medium, and small floods reached 100%, accompanied by average deterministic coefficients of 0.92, 0.88, and 0.87, respectively, resulting in an overall average deterministic coefficient of 0.88. The classification demonstrated enhancements in both the pass rate and deterministic coefficient for each individual flood, contributing to an improved fitting effect. Furthermore, an analysis was conducted on the correlation between flood peak flow and maximum rainfall within 1 h, 3 h, 6 h, and 24 h, based on the Pearson correlation coefficient. Results revealed that the maximum 6 h rainfall exhibited the highest Pearson correlation coefficient with flood peak flow. Accordingly, the maximum 6-hour cumulative rainfall during the forecast period was employed as the criterion for determining large, medium, and small parameters.

In the actual flood forecasting during the 2021 flood season, all flood forecast results were deemed satisfactory. Notably, four significant and medium-sized floods exhibited a strong fitting degree and high deterministic coefficient. The flood forecasting accuracy, predicated on flood classification, demonstrated a high level of reasonableness and feasibility, thereby offering valuable reference for reservoir flood control.

**Key words:** Qingshandian Reservoir; Xin'anjiang model; flood grade division; correlation analysis; Pearson correlation coefficient