

长江下游干流与鄱阳湖洪水遭遇风险分析

卞佳琪, 史常乐, 何琦, 曹双, 李明生, 韦立新, 吴张勇

(长江水利委员会水文局长江下游水文水资源勘测局, 江苏 南京 210011)

摘要:为研究长江下游干流与鄱阳湖洪水遭遇的特征,基于长江下游干流重要水文站(九江站和大通站)以及鄱阳湖入汇控制站(湖口站)1950—2023 年的流量序列,采用有序聚类分析法识别了长江下游的年径流总量和年最大洪峰流量突变点(2003 年)。以年最大洪峰流量、年最大 7 d 洪量、年最大 15 d 洪量作为年最大洪水的特征参数,采用混合 von Mises 分布和 P-Ⅲ 分布分别拟合了三站的年最大洪水发生时间和量级边缘分布,并采用二维 Archimedean Copula 函数构建了长江下游二维年最大洪水发生时间联合分布、量级联合分布,依此分析了三峡水库蓄水前后长江下游的洪水发生时间、量级的遭遇风险以及变化特征。结果表明:三峡水库蓄水后长江下游年最大洪水发生时间遭遇风险有增有降,当前湖口站与长江干流的九江站、大通站的洪水发生时间遭遇风险于 6 月上旬至 7 月上旬达到最大值,九江站与大通站的洪水发生时间遭遇风险于 6 月下旬至 7 月下旬达到最大值,应予以重点关注;三峡水库蓄水后任意两站遭遇某量级洪水的风险率有所降低,三峡工程的运行能较好地降低长江下游干流与鄱阳湖年最大洪水量级遭遇的风险,其中九江站与大通站的年最大洪水量级遭遇的风险下降最大。

关键词:洪水遭遇风险; Archimedean Copula 函数; 长江下游; 鄱阳湖

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)06-0038-09

Analysis of flood encountering risks between main stream of the lower Yangtze River and Poyang Lake//BIAN Jiaqi, SHI Changle, HE Qi, CAO Shuang, LI Mingsheng, WEI Lixin, WU Zhangyong(*Lower Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Nanjing 210011, China*)

Abstract: To investigate the characteristics of flood encounters between the main stream of the lower Yangtze River and Poyang Lake, based on the discharge series (from 1950 to 2023) from important hydrological stations on the lower Yangtze River (Jiujiang Station and Datong Station) and the inflow control station of Poyang Lake (Hukou Station), the ordered clustering analysis method was used to identify the mutation point (2003) of the annual total runoff and annual maximum flood peak discharge in the lower Yangtze River. Using the annual maximum flood peak discharge, annual maximum 7-day flood volume, and annual maximum 15-day flood volume as characteristic parameters of the annual maximum flood, the mixed von Mises distribution and the P-Ⅲ distribution were used to fit the marginal distributions of the annual maximum flood occurrence time and magnitude at the three stations, respectively. A two-dimensional Archimedean Copula function was employed to construct the two-dimensional joint distributions of the annual maximum flood occurrence time and magnitude in the lower Yangtze River. Based on this, the encounter risks and changing characteristics of flood occurrence time and magnitude in the lower Yangtze River before and after the impoundment of the Three Gorges Reservoir were analyzed. The results show that after the impoundment of the Three Gorges Reservoir, the encounter risk of annual maximum flood occurrence time in the lower Yangtze River increased in some aspects and decreased in others. Currently, the encounter risk of flood occurrence time between Hukou Station and the main stream stations (Jiujiang Station and Datong Station) reaches its maximum from early June to early July, while the encounter risk between Jiujiang Station and Datong Station reaches its maximum from late June to late July, which should be paid special attention to. After the impoundment of the Three Gorges Reservoir, the risk rate of encountering a certain magnitude of flood at any two stations decreased. The operation of the Three Gorges Project effectively reduces the risk of encounter in the annual maximum flood magnitude between the main stream of the lower Yangtze River and Poyang Lake, with the greatest risk reduction observed between Jiujiang Station and Datong Station.

Key words: flood encountering risk; Archimedean Copula function; the lower Yangtze River; Poyang Lake

基金项目:国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2240209)

作者简介:卞佳琪(1991—),女,工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:jiaqibian@163.com

受气候、河道等自然条件与人为条件的综合影响,长江中下游洪水灾害频繁发生。长江中下游洪水的发生时间和区域分布与其暴雨特性密切相关。在理想状态下,上下游、干支流洪水相互错开,不至于形成大洪水,然而极端气候事件可能导致上下游、干支流洪水发生时间重叠,多源洪水就会相互遭遇形成大洪水,若暴雨覆盖面积广、强度大,多源洪水更有可能发生严重遭遇从而引发特大洪水。长江干流中下游因承泄上游来水及中下游各支流洪水,汛期一般为每年5—10月^[1],鄱阳湖水系洪水发生时间一般为4—6月^[2],当长江干流洪水遭遇鄱阳湖水系洪水时,受顶托作用,极易出现高水位,当下游感潮河段的大径流又逢外海天文大潮和风暴潮时,三者叠加将引起水位异常壅高,可能给社会经济和人民生活财产安全带来极其严重的损失。

针对洪水遭遇问题,已有相关学者采用 Copula 函数进行了分析。例如:陈璐等^[3-4]基于多维 Copula 函数建立了长江上游干支流控制站的年最大洪水发生时间和量级的联合分布,估计了洪水遭遇的可能性,为洪水遭遇风险研究提供了新途径;张超等^[5]构建了长江上游与洞庭湖的洪水发生时间、量级的 Copula 联合分布,分析了三峡工程的运行对其洪水遭遇风险的影响;李继清等^[6]构建了川江干支流间的洪水发生时间、量级 Copula 联合分布,分析了洪水遭遇的可能性;何朝飞等^[7]建立了玛纳斯河洪水峰量 Copula 联合分布,分析了各峰量相互作用下的风险概率;隆院男等^[8]构建了松澧地区年最大洪峰、连续7d年最大洪量的 Copula 二维联合分布,研究了澧水与松滋河的洪水遭遇规律。目前,关于长江下游江湖洪水遭遇特征的研究较少,尤其缺乏三峡工程的运行对其下游洪水遭遇影响的定量研究。本文以长江下游为研究区域,以干流九江站、大通站以及鄱阳湖入汇控制站湖口站为研究对象,以三峡水库蓄水前后为对比研究时段,在拟合洪水发生时间、量级边缘分布的基础上,分别构建了三峡水库蓄水前后长江下游干流与鄱阳湖年最大洪水的发生时间联合分布、量级联合分布,并定量分析了三峡工程的运行对洪水发生时间、量级遭遇造成的影响,以期长江流域梯级水库群联合调度提供理论依据。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

以长江下游干流的九江水文站、大通水文站以及鄱阳湖出口的湖口水文站为研究对象,探索其洪水遭遇及其变化。九江站位于江西省九江市,地处长江中游干流,其下游约32 km处有鄱阳湖汇入长

江,对该水文站水位、流量有一定影响。湖口站位于鄱阳湖水道最末端,距江湖汇流处约1 km。大通站为长江下游的控制站,距长江口约700 km,集水面积约170万 km²。研究区域如图1所示。

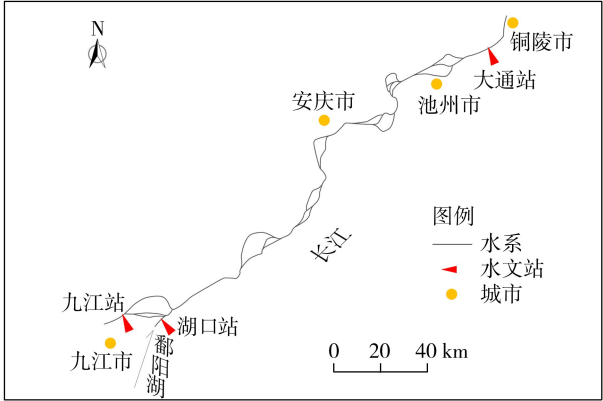


图1 研究区域示意图

1.2 数据来源

基于九江站、湖口站、大通站1950—2023年实测流量数据,探索长江下游干支流年最大洪水的遭遇特性,选取年最大洪峰流量 $Q_{\max}$ 、年最大7d洪量 $W_{7\max}$ 、年最大15d洪量 $W_{15\max}$ 作为年最大洪水的特征代表值。其中,九江站1950—1987年数据基于湖口站、大通站数据通过1stOpt软件^[9]中的“Quasi-Newton (BFGS)+通用全局优化法”^[10]以日步长非线性关系拟合外延所得。九江站流量拟合效果见图2。经统计分析,拟合所得的1988—2023年九江站日均流量的平均绝对误差为1052 m³/s,平均相对误差为5.0%,确定性系数为0.99,总体拟合效果较好,符合GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,依此获得九江站1950—1987年日均流量序列,再基于九江站日均流量与日最大流量的相关关系,获得其1950—1987年日最大流量序列。

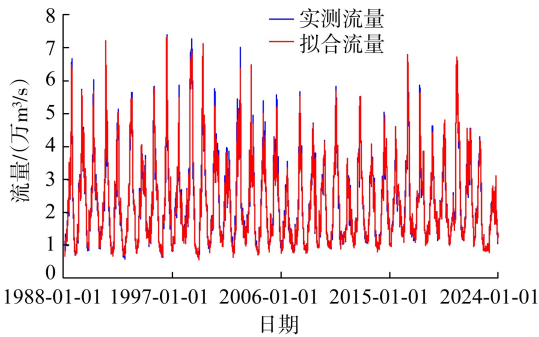


图2 九江站日均流量拟合结果

本文采用的水文资料来自正式刊布的水文年鉴,可保证资料序列的连续性及精度,具有较高的可靠性;资料序列长度达到水利行业规范、规程的要求,包含丰、平、枯水年,具有较好的代表性;取显著性水平为0.05,采用自相关系数法、序列秩号自相

关系数法分别检验序列的持续性,采用秩号-序号相关关系数法、Kendall 法分别检验序列的趋势性,均能通过检验,说明满足一致性要求。

2003 年,长江上游大型水利枢纽三峡工程第一批机组发电,2008 年开始试验性蓄水,自此总体进入正常运行规模,其运行对长江下游的水位、流量产生了一定影响。大通站为长江下游的控制站,大通站以下干流区间入汇流量约占大通站流量的 2%~3%,因此大通站的流量特征基本代表工程河段来水特征。分别对大通站 1950—2023 年的年径流总量、年最大洪峰流量序列采用有序聚类分析法^[11-12]进行突变分析。计算并点绘时间序列离差平方和的变化曲线,最低点即为突变点,结果如图 3 所示。剔除端部数据可能造成的偶然误差影响^[12],可以看出,2003 年为大通站年径流总量序列和年最大洪峰流量序列的突变点。

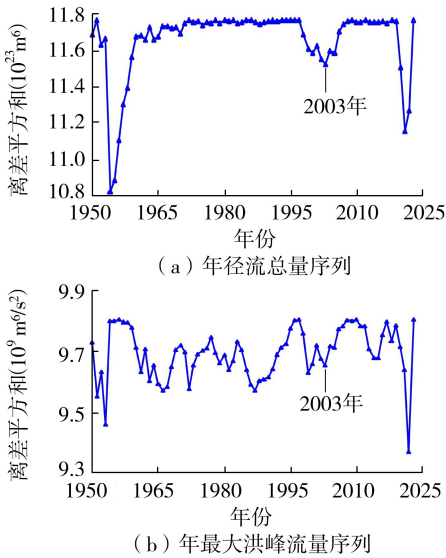


图3 大通站径流序列有序聚类离差平方和曲线

为验证突变点的产生是否受三峡工程运行的影响,选取三峡水库蓄水前后丰平枯水典型年,进而分析宜昌站与九江站日均流量的相关性,其 Pearson 相关系数如表 1 所示。可以看出,三峡水库蓄水前后,丰平枯水典型年宜昌站与九江站的日均流量均显著正相关,且径流状态越丰,二者相关关系越显著,说明

表1 三峡水库蓄水前后典型年宜昌站与九江站日均流量的 Pearson 相关系数

时段	典型年	年份	Pearson 相关系数
蓄水前	丰水年	1998	0.950 **
	平水年	1995	0.874 **
	枯水年	1992	0.846 **
蓄水后	丰水年	2020	0.919 **
	平水年	2019	0.857 **
	枯水年	2023	0.778 **

注:**表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

宜昌站的流量过程对九江站的流量有着持续且显著的影响。因此,可以认为大通站径流 2003 年发生的突变受三峡工程运行的部分影响,故将研究时段分为三峡水库蓄水前(1950—2002 年)和三峡水库蓄水后(2003—2023 年)进行对比分析。

2 研究方法

2.1 混合 von Mises 分布

水文事件的发生时间呈现周期性特征,较多文献^[5,13-15]将年最大洪水发生时间采用方向数据^[16]来描述,并采用 von Mises 分布或混合 von Mises 分布来拟合洪水发生时间,拟合效果较好。本文考虑九江、湖口、大通三站的年最大洪水发生时间均呈现多峰特征,故将洪水发生时间经过旬尺度概化后,采用混合 von Mises 分布拟合时间分布。

2.2 Copula 函数

Copula 函数又称连接函数^[17],其理论基础为 Sklar 定理,是描述变量间的相关性特征、连接联合分布与边缘分布的一类函数。当前,Copula 函数已被较广泛应用于描述水文多变量间的联合分布^[6,17-19],其在水文事件遭遇组合分析、水文预报等方面应用效果较好。本文采用多种 Archimedean Copula 函数分别建立年最大洪水多变量(发生时间、量级)联合分布,主要有 G-H、Frank、Clayton 和 AMH Copula 函数,参数采用序列间的 Kendall 秩相关系数 τ 进行求解,采用 AIC 准则等进行拟合优度评价^[17]。

2.3 水文事件遭遇风险

2.3.1 洪水发生时间遭遇风险率

采用上述 4 种 Archimedean Copula 函数构建九江、湖口、大通任意两站年最大洪水发生时间的联合分布。不同测站的年最大洪水发生在同一天的概率较小,此处将两站年最大洪水发生时间的间隔不超过 Δt 天定义为遭遇,则洪水发生时间遭遇的概率为

$$P_k = P(t_k < T_1 \leq t_{k+1}, t_k + \tau_{12} - \Delta t_{12} < T_2 \leq t_{k+1} + \tau_{12} + \Delta t_{12}) = F_T(t_k, t_k + \tau_{12} - \Delta t_{12}) + F_T(t_{k+1}, t_{k+1} + \tau_{12} + \Delta t_{12}) - F_T(t_k, t_{k+1} + \tau_{12} + \Delta t_{12}) - F_T(t_{k+1}, t_k + \tau_{12} - \Delta t_{12}) \quad (1)$$

式中:下标 1 和 2 代表任意测站,测站 2 在测站 1 的下游; P_k 为测站 1 和测站 2 洪水发生时间遭遇的概率; T_1 、 T_2 分别为测站 1、测站 2 的洪水发生时间; t_k 为测站 1 洪水发生的日期(自 3 月开始的第 k 天); τ_{12} 为测站 1 至测站 2 的水流传播时间; Δt_{12} 为测站 1 和测站 2 洪水发生的时间间隔,本文将两站年最大洪水发生时间间隔 2 d 以内定义为洪水遭遇; F_T 为两站年最大洪水发生时间的联合分布函数。

2.3.2 洪水量级遭遇风险率

为定量描述洪水量级遭遇的风险,本文引入同现风险率的概念。测站 A 年最大洪水量级超过 q_1 且测站 B 年最大洪水量级超过 q_2 的概率为同现风险率,公式为

$$\begin{aligned} P(Q_{mB} > q_2, Q_{mA} > q_1) = \\ 1 - P(Q_{mA} \leq q_1) - P(Q_{mB} \leq q_2) + \\ P(Q_{mA} \leq q_1, Q_{mB} \leq q_2) = \\ 1 - F(q_1) - F(q_2) + F_q(q_1, q_2) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Q_{mA} 、 Q_{mB} 分别为测站 A、B 年最大洪水量级; F 为年最大洪水量级的边缘分布函数; F_q 为两站年最大洪水量级的联合分布函数。

3 结果与分析

3.1 年最大洪水特征分析

统计九江站、湖口站、大通站 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 序列的变化特征,结果见图 4。综合 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 发生时间的变化特征可知:三峡水库蓄水后,九江站年最大洪水发生时间范围较蓄水前均有所扩大,上限提前,下限延后;湖口站和大通站的年最大洪水发生时间范围较蓄水前更为集中,上限延后,下限提前。综合 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 量级的变化特征可知:三峡水库蓄水后,九江站、湖口站、大通站的 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 较蓄水前均有所降低,其中多年平均 $Q_{\max}$ 分别降低 9.2%、2.6%、4.4%,多年平均 $W_{7\max}$ 分别降低 7.4%、3.8%、5.0%,多年平均 $W_{15\max}$ 分别降低 6.8%、4.9%、5.4%。

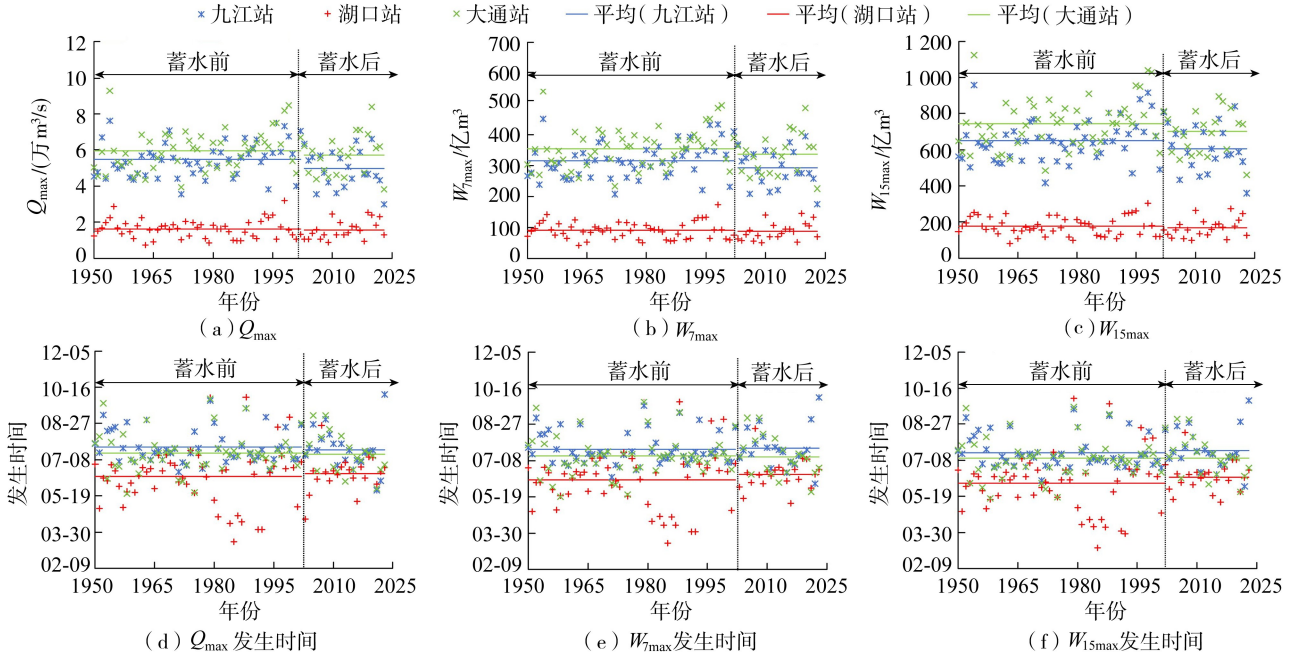


图 4 三站年最大洪水量级和发生时间

3.2 长江下游洪水发生时间遭遇

3.2.1 二维洪水发生时间联合分布

据统计,九江站、湖口站、大通站 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 的出现时间分别为 5—10 月、3—10 月、5—9 月,故拟合时段为 3—10 月。采用混合 von Mises 分布分别拟合三站三峡水库蓄水前后的 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 的发生时间分布,采用 1stOpt 软件^[7]中的“Quasi-Newton (BFGS)+通用全局优化法”^[8]对混合 von Mises 分布参数进行优化计算,具体参数和拟合优度指标见表 2 和表 3。三站混合 von Mises 分布均通过了卡方检验,说明拟合的分布函数合理。

三峡水库蓄水前后三站 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 发生时间概率密度拟合对比见图 5。可以看出,蓄水前后三站的年最大洪水发生时间均不同步,且发生了变化,具体如下:

a. 三峡水库蓄水前后,九江站 $Q_{\max}$ 发生时间的 3 个概率峰值为 7 月上、中、下旬,其中蓄水后 7 月上、中旬概率较蓄水前有所降低,7 月下旬概率较蓄水前有所增加,其他时段变化不大。 $W_{7\max}$ 发生时间概率由蓄水前的 7 月上、中旬最大变为蓄水后的 7 月中、下旬最大,峰值变化不大,时段有所后移。 $W_{15\max}$ 发生时间概率由蓄水前的 6 月下旬至 7 月上旬最大变为蓄水后的 7 月上旬至 7 月下旬最大,峰值更为集中,时段有所后移。

b. 三峡水库蓄水前,湖口站 $Q_{\max}$ 发生时间的 3 个概率峰值为 6 月中旬至 7 月上旬,蓄水后变为 2 个峰值(6 月中、下旬),峰值和时段均有所集中。 $W_{7\max}$ 发生时间概率由蓄水前的 6 月中、下旬最大变

表 2 年最大洪水发生时间混合 von Mises 分布的参数及检验 (蓄水前)

测站	数据序列	m	混合 von Mises 分布的拟合参数($p_i, \bar{\mu}_i, k_i$)	RMSE	χ^2
九江站	$Q_{\max}$	3	(0.07, 4.5, 11.6), (0.53, 3, 425.4), (0.4, 3.5, 312.9)	0.006	2.040(68.7)
	$W_{7\max}$	3	(0.77, 4.3, 598.8), (0.04, 4.6, 6.4), (0.19, 3.3, 20)	0.007	0.253(68.7)
	$W_{15\max}$	3	(0.06, 4.4, 11.9), (0.58, 3, 374.7), (0.36, 3.5, 372.6)	0.003	0.467(68.7)
湖口站	$Q_{\max}$	4	(0.004, 5.5, 605.4), (0.18, 2.7, 2.8), (0.791, 3, 592.7), (0.024, 1, 35.5)	0.014	2.463(65.0)
	$W_{7\max}$	3	(0.25, 2.2, 1.4), (0.78, 2.8, 562.7), (-0.03, 1.7, 46.3)	0.016	6.145(68.7)
	$W_{15\max}$	4	(0.2, 2.4, 1.5), (0.74, 0.9, 689.3), (0.09, 2.7, 231.1), (-0.03, 3.5, 207.1)	0.010	1.438(65.0)
大通站	$Q_{\max}$	3	(0.52, 3.8, 2.8), (0.77, 3.3, 622.6), (-0.29, 4, 5.5)	0.009	0.628(68.7)
	$W_{7\max}$	4	(0.1, 2.9, 4.2), (0.54, 5.1, 649.5), (0.13, 3.4, 17.3), (0.23, 4.3, 522.1)	0.006	0.152(65.0)
	$W_{15\max}$	4	(0.78, 2.8, 596.5), (0.15, 3.3, 17.6), (0.04, 2.1, 9.7), (0.03, 4.6, 10.6)	0.005	0.629(65.0)

注: m 代表混合 von Mises 分布由 m 个 von Mises 分布组成,为采用最小二乘法寻求到的与实测拟合最优的 von Mises 分布个数; p_i 为第 i 个 von Mises 分布所占的权重; $\bar{\mu}_i, k_i$ 分别为第 i 个 von Mises 分布的位置参数(平均角)、尺度参数(查第一类变型 Bessel 函数一阶与零价值之比的反函数表^[9]);应用 χ^2 检验对拟合函数进行假设检验,在 5%显著性水平下,自由度为 $k-r-1$ (r 为参数个数, k 为 χ^2 检验的分组数)的 χ^2 检验的接受域小于等于临界值(表中括号内数据为检验的临界值),则为假设检验通过。下同。

表 3 年最大洪水发生时间混合 von Mises 分布的参数及检验 (蓄水后)

测站	数据序列	m	混合 von Mises 分布的拟合参数($p_i, \bar{\mu}_i, k_i$)	RMSE	χ^2
九江站	$Q_{\max}$	4	(0.63, 3, 479.4), (0.1, 3.6, 72.6), (0.08, 4.2, 2.6), (0.19, 2.2, 344.5)	0.010	3.641(21.7)
	$W_{7\max}$	3	(0.16, 3.5, 26.6), (0.14, 4.6, 261.2), (0.7, 3, 543.1)	0.027	17.391(26.2)
	$W_{15\max}$	3	(0.78, 4.5, 712.1), (0.12, 3.4, 34.8), (0.1, 3.2, 2.7)	0.021	12.487(26.2)
湖口站	$Q_{\max}$	3	(0.12, 2.8, 4.6), (0.01, 1.8, 625.2), (0.87, 2.8, 463.7)	0.026	15.127(26.2)
	$W_{7\max}$	3	(0.45, 2.8, 368.7), (0.42, 2.5, 526), (0.13, 2.5, 2.4)	0.016	7.326(26.2)
	$W_{15\max}$	4	(0.16, 2.5, 163.8), (0.09, 3, 126.1), (0.75, 1.9, 492), (0.01, 4.2, 338.6)	0.000	0.000(21.7)
大通站	$Q_{\max}$	3	(0.18, 3.4, 5.1), (0.06, 4.8, 711.7), (0.76, 4, 665.6)	0.021	1.972(26.2)
	$W_{7\max}$	3	(0.75, 4.6, 712.1), (0.26, 3.2, 4), (-0.01, 3.1, 709.8)	0.009	0.697(26.2)
	$W_{15\max}$	3	(0.07, 2.6, 44.3), (0.79, 4.6, 712.1), (0.14, 3.4, 25.2)	0.016	1.334(26.2)

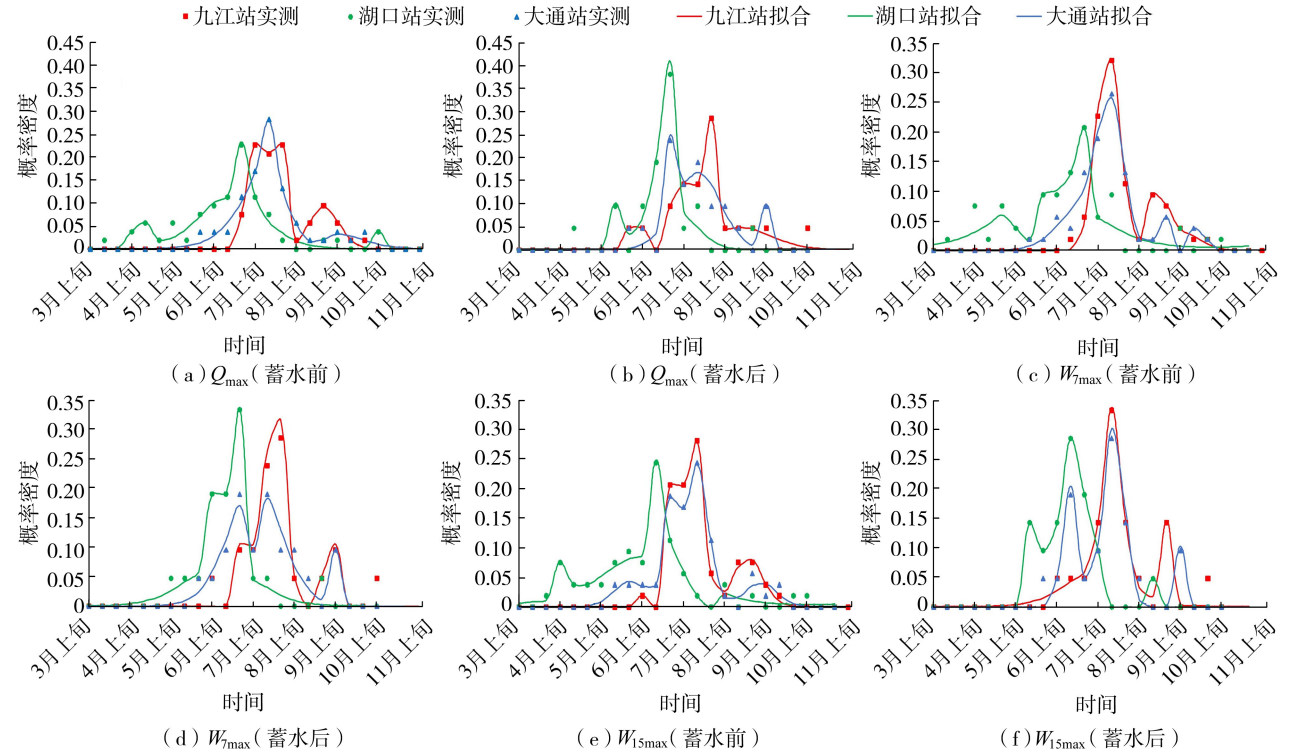


图 5 三峡水库蓄水前后年最大洪水发生时间概率密度对比

为蓄水后的 6 月上旬至下旬最大,峰值更为集中。蓄水后 $W_{15\max}$ 发生时间概率向 5 月中旬至 7 月上旬集中,这几个时段的概率较蓄水前均有所增加,其他时段显著下降。

c. 三峡水库蓄水前后,大通站 $Q_{\max}$ 发生时间的概率峰值均集中在 6 月下旬至 8 月上旬,蓄水后的概率峰值较蓄水前有所降低,整体有所坦化。 $W_{7\max}$ 发生时间的概率峰值由蓄水前的 7 月上、中旬变为

蓄水后的 6 月下旬、7 月上旬,整体有所坦化。 W_{15max} 发生时间的概率峰值由蓄水前的 6 月下旬至 7 月中旬变为蓄水后的 6 月中旬、7 月中旬,峰值有所增加。

3.2.2 洪水发生时间遭遇风险

分别采用 G-H、Frank、Clayton 和 A-M-H Copula 函数建立三峡水库蓄水前后九江站-湖口站、湖口站-大通站、九江站-大通站 Q_{max} 、 W_{7max} 、 W_{15max} 发生时间的二维联合分布函数,并用均方根误差 (RMSE) 最小和 AIC 准则选择 Copula 函数,拟合参数和拟合优度指标如表 4 所示,结果表明:用 G-H Copula 函数拟合九江站-湖口站、湖口站-大通站、九江站-大通站蓄水前的 Q_{max} 、 W_{7max} 、 W_{15max} 联合分布以及九江站-大通站蓄水后的 Q_{max} 、 W_{7max} 联合分布均最优,用 Frank Copula 函数拟合九江站-湖口站蓄水后 Q_{max} 、九江站-大通站蓄水后 W_{15max} 联合分布均最优,用 Clayton Copula 函数拟合九江站-湖口站蓄水后 W_{7max} 、 W_{15max} 联合分布以及湖口站-大通站蓄水后的 Q_{max} 、 W_{7max} 、 W_{15max} 联合分布均最优。

考虑九江站、湖口站、大通站之间的汛期洪水传播时间(文中近似取 $1\text{ d}^{[20]}$),本文将任意两控制站的洪水发生时间间隔 2 d 以内称之为洪水遭遇。计算任意两站洪水发生时间遭遇的二维联合分布概率值,以天为计算步长,以旬为横坐标,以发生时间遭

遇风险率为纵坐标,绘制风险率图如图 6 所示。由图 6 可以看出:

a. 九江站-湖口站的时间遭遇风险变化。三峡水库蓄水前后,6 月上旬(含)前、8 月(含)后 Q_{max} 、 W_{7max} 、 W_{15max} 遭遇风险均较低,蓄水后 Q_{max} 、 W_{7max} 遭遇风险曲线较蓄水前均更为尖瘦,但 W_{15max} 遭遇风险曲线较蓄水前有所坦化,蓄水后三者风险峰值均有所前移。蓄水后 Q_{max} 遭遇风险峰值由蓄水前的 7 月上旬提前至 6 月下旬,风险率增加了 53%;蓄水后 W_{7max} 遭遇风险峰值由蓄水前的 7 月中旬起)提前至 6 月下旬起,风险率增加了 122%;蓄水后 W_{15max} 遭遇风险峰值由蓄水前的 6 月下旬起提前至 6 月中旬起,风险率降低了 35%。

b. 湖口站-大通站的洪峰时间遭遇风险变化。三峡水库蓄水前后,6 月上旬(含)前、7 月下旬(含)后 Q_{max} 、 W_{7max} 、 W_{15max} 遭遇风险均较低,蓄水后 Q_{max} 、 W_{7max} 、 W_{15max} 遭遇风险曲线较蓄水前均更为尖瘦,但风险峰值发生时段仅 W_{15max} 有所前移, Q_{max} 、 W_{7max} 风险峰值发生时段变化不大。蓄水前后 Q_{max} 遭遇风险峰值均为 6 月上旬,但风险率从 3.06×10^{-3} 增大至 10.98×10^{-3} ,增大了 259%;蓄水前后 W_{7max} 遭遇风险峰值均为 6 月上旬起,但风险率从 2.74×10^{-3} 增大至 6.08×10^{-3} ,增大了 122%;蓄水后 W_{15max} 遭遇风险峰值由蓄水前的 6 月下旬起提前至 6 月中旬

表 4 三峡水库蓄水前后年最大洪水发生时间的二维 Copula 参数及拟合优度

区间	数据序列	蓄水前				蓄水后			
		最优 Copula	θ	RMSE	AIC 值	最优 Copula	θ	RMSE	AIC 值
九江站-湖口站	Q_{max}	G-H	1.1965	0.029	-375	Frank	1.6130	0.030	-146
	W_{7max}	G-H	1.1871	0.032	-361	Clayton	0.2353	0.039	-134
	W_{15max}	G-H	1.1667	0.030	-370	Clayton	0.2128	0.038	-135
湖口站-大通站	Q_{max}	G-H	1.2266	0.027	-382	Clayton	0.2623	0.049	-125
	W_{7max}	G-H	1.2275	0.034	-356	Clayton	0.2353	0.028	-148
	W_{15max}	G-H	1.1544	0.033	-359	Clayton	0.1558	0.036	-137
九江站-大通站	Q_{max}	G-H	1.7989	0.032	-364	G-H	2.4940	0.033	-141
	W_{7max}	G-H	1.7720	0.036	-349	G-H	1.5255	0.046	-127
	W_{15max}	G-H	2.1393	0.029	-375	Frank	4.8320	0.038	-135

注: θ 为 Archimedean Copula 函数中生成元的参数。
--- Q_{max} (蓄水前) — Q_{max} (蓄水后) --- W_{7max} (蓄水前) — W_{7max} (蓄水后) --- W_{15max} (蓄水前) — W_{15max} (蓄水后)

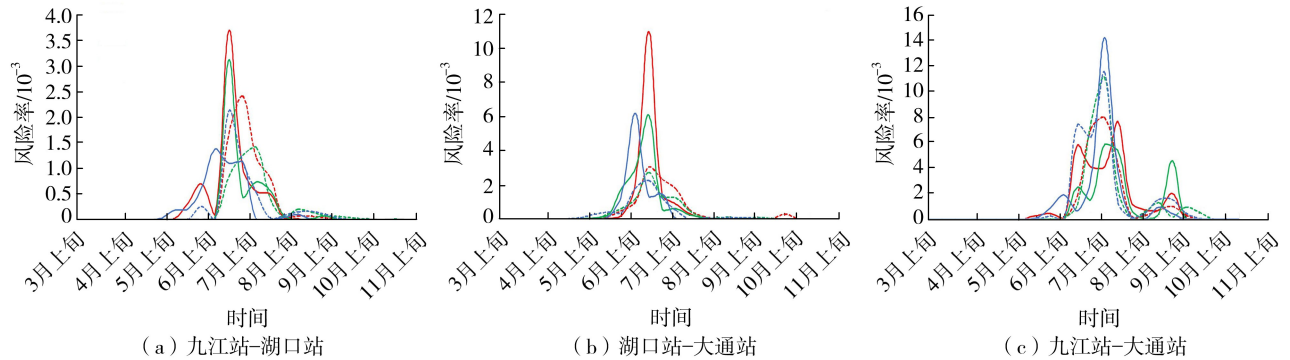


图 6 三峡水库蓄水前后长江下游年最大洪水发生时间遭遇风险

起,风险率增加了 173%。

c. 九江站-大通站的洪峰时间遭遇风险变化。三峡水库蓄水前后,6月中旬(含)前、9月中旬(含)后 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 遭遇风险均较低,蓄水后 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 遭遇风险曲线较蓄水前均有所坦化,但 $W_{15\max}$ 遭遇风险曲线较蓄水前较为尖瘦。其中:蓄水前 $Q_{\max}$ 遭遇风险峰值为 7 月上、中旬,蓄水后 $Q_{\max}$ 遭遇风险峰值为 6 月下旬和 7 月下旬,风险率均有所降低;蓄水后 $W_{7\max}$ 遭遇风险峰值由蓄水前的 7 月上、中旬起推后至 7 月中、下旬起,风险率均有所降低,但蓄水后于 9 月上旬起出现较高峰值 (4.55×10^{-3});蓄水前 $W_{15\max}$ 遭遇风险峰值为 6 月下旬至 7 月中旬起,蓄水后 $W_{15\max}$ 遭遇风险峰值为 7 月中旬,风险率有所增加但持续时段较短。

综上,三峡水库蓄水前后,6 月上旬(含)前、9 月中旬(含)后,任意两站的 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 时间遭遇风险均较低。当前长江下游洪水发生时间遭遇风险特征发生了变化,湖口站与干流九江站、大通站的洪水发生时间遭遇风险于 6 月上旬至 7 月上旬达到最大,九江站与大通站的洪水发生时间遭遇风险于 6 月下旬至 7 月下旬达到最大,应重点关注。

3.3 长江下游洪水量级遭遇

3.3.1 二维洪水量级联合分布

以 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 为特征参数,采用 P-Ⅲ分布函数拟合三峡水库蓄水前后九江、湖口、大通三站的洪水量级分布,蓄水前后参数及检验结果见表 5。P-Ⅲ分布均通过了卡方检验,说明拟合的分布函数合理。

3.3.2 洪水量级遭遇风险

由于洪水量级为水文极值事件,G-H Copula 函数能较好地描述上尾相关特征,适用于洪峰等上尾相关变量的联合分布^[4],故本文分别构建三峡水库蓄水前后九江站-湖口站、九江站-大通站、湖口站-大通站的 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 二维 G-H Copula 联合分布,函数参数和拟合优度指标如表 6 所示。由此可计算各站点间年最大洪水量级遭遇的同现风险率。以任意两站点年最大洪水量级(洪峰流量或洪量)为 x 轴和 y 轴,以同现风险率为 z 轴,可绘制风险率三维图,见图 7。由图 7 可以看出,同现风险率随洪水量级的增大而减小,且三峡水库蓄水后,九江站、湖口站、大通站任意两站遭遇某量级洪水的同现风险率,较蓄水前均有一定程度的降低。

三峡水库蓄水前,九江站和湖口站遭遇超 10 年一遇、20 年一遇、100 年一遇 $Q_{\max}$ 的概率分别为 24.86×10^{-3} 、 10.52×10^{-3} 、 1.80×10^{-3} ,同现风险率逐渐降低。蓄水后遭遇超 10 年一遇、20 年一遇、

表 5 三峡水库蓄水前后年最大洪水量级 P-Ⅲ分布参数及检验结果

测站	数据序列	蓄水前		
		拟合参数(α,β,δ)	RMSE	χ^2
九江站	$Q_{\max}$	(12.3,0.00034,1.8)	0.025	11.378(74.9)
	$W_{7\max}$	(11.5,0.056,1.1)	0.022	8.476(74.9)
	$W_{15\max}$	(7.3,0.022,3.2)	0.033	16.115(74.9)
湖口站	$Q_{\max}$	(5.9,0.00044,2766)	0.038	19.223(74.9)
	$W_{7\max}$	(5.9,0.079,15.4)	0.033	21.883(74.9)
	$W_{15\max}$	(9.8,0.055,0)	0.024	13.058(74.9)
大通站	$Q_{\max}$	(6.3,0.00021,29810)	0.033	14.256(74.9)
	$W_{7\max}$	(6.3,0.035,177)	0.034	16.080(74.9)
	$W_{15\max}$	(6.3,0.017,372)	0.035	20.657(74.9)
测站	数据序列	蓄水后		
		拟合参数(α,β,δ)	RMSE	χ^2
九江站	$W_{\max}$	(20.7,0.00042,0)	0.038	7.574(33.4)
	$W_{7\max}$	(20.7,0.071,0)	0.040	9.816(33.4)
	$W_{15\max}$	(20.7,0.034,0)	0.039	9.093(33.4)
湖口站	$Q_{\max}$	(5.4,0.00043,3304)	0.038	7.775(33.4)
	$W_{7\max}$	(5.4,0.079,18.2)	0.027	5.130(33.4)
	$W_{15\max}$	(5.3,0.043,44)	0.033	6.936(33.4)
大通站	$Q_{\max}$	(10.4,0.00026,16541)	0.053	16.140(33.4)
	$W_{7\max}$	(11.9,0.047,81.4)	0.047	13.146(33.4)
	$W_{15\max}$	(12.8,0.023,151)	0.040	11.124(33.4)

注: α,β,δ 分别为 P-Ⅲ分布的形状、尺度、位置参数。

表 6 三峡水库蓄水前后年最大洪水联合分布的 Copula 参数及拟合优度

区间	数据序列	蓄水前		蓄水后	
		θ	RMSE	θ	RMSE
九江站-湖口站	$Q_{\max}$	1.1496	0.030	1.1737	0.035
	$W_{7\max}$	1.1363	0.027	1.2353	0.033
	$W_{15\max}$	1.1388	0.031	1.1932	0.032
九江站-大通站	$Q_{\max}$	2.2292	0.024	2.5394	0.059
	$W_{7\max}$	2.4428	0.021	2.6025	0.055
	$W_{15\max}$	2.7126	0.029	2.5610	0.046
湖口站-大通站	$Q_{\max}$	1.6127	0.036	1.8829	0.034
	$W_{7\max}$	1.5530	0.035	1.9671	0.035
	$W_{15\max}$	1.5277	0.029	1.8421	0.034

100 年一遇 $Q_{\max}$ 的概率分别为 16.35×10^{-3} 、 6.95×10^{-3} 、 1.15×10^{-3} ,同现风险率逐渐降低且略低于蓄水前,分别降低了 34%、34%、36%。

三峡水库蓄水前,九江站和湖口站遭遇超 10 年一遇、20 年一遇、100 年一遇 $W_{7\max}$ 的概率分别为 23.73×10^{-3} 、 9.92×10^{-3} 、 1.67×10^{-3} ,同现风险率逐渐降低。蓄水后遭遇超 10 年一遇、20 年一遇、100 年一遇 $W_{7\max}$ 的概率分别为 21.13×10^{-3} 、 9.32×10^{-3} 、 1.59×10^{-3} ,同现风险率逐渐降低且略低于蓄水前,分别降低了 11%、6%、5%。

三峡水库蓄水前,九江站和湖口站遭遇超 10 年一遇、20 年一遇、100 年一遇 $W_{15\max}$ 的概率分别为 23.95×10^{-3} 、 10.03×10^{-3} 、 1.70×10^{-3} ,同现风险率逐渐降低。蓄水后遭遇超 10 年一遇、20 年一遇、100 年一遇 $W_{15\max}$ 的概率分别为 18.69×10^{-3} 、 $8.11\times$

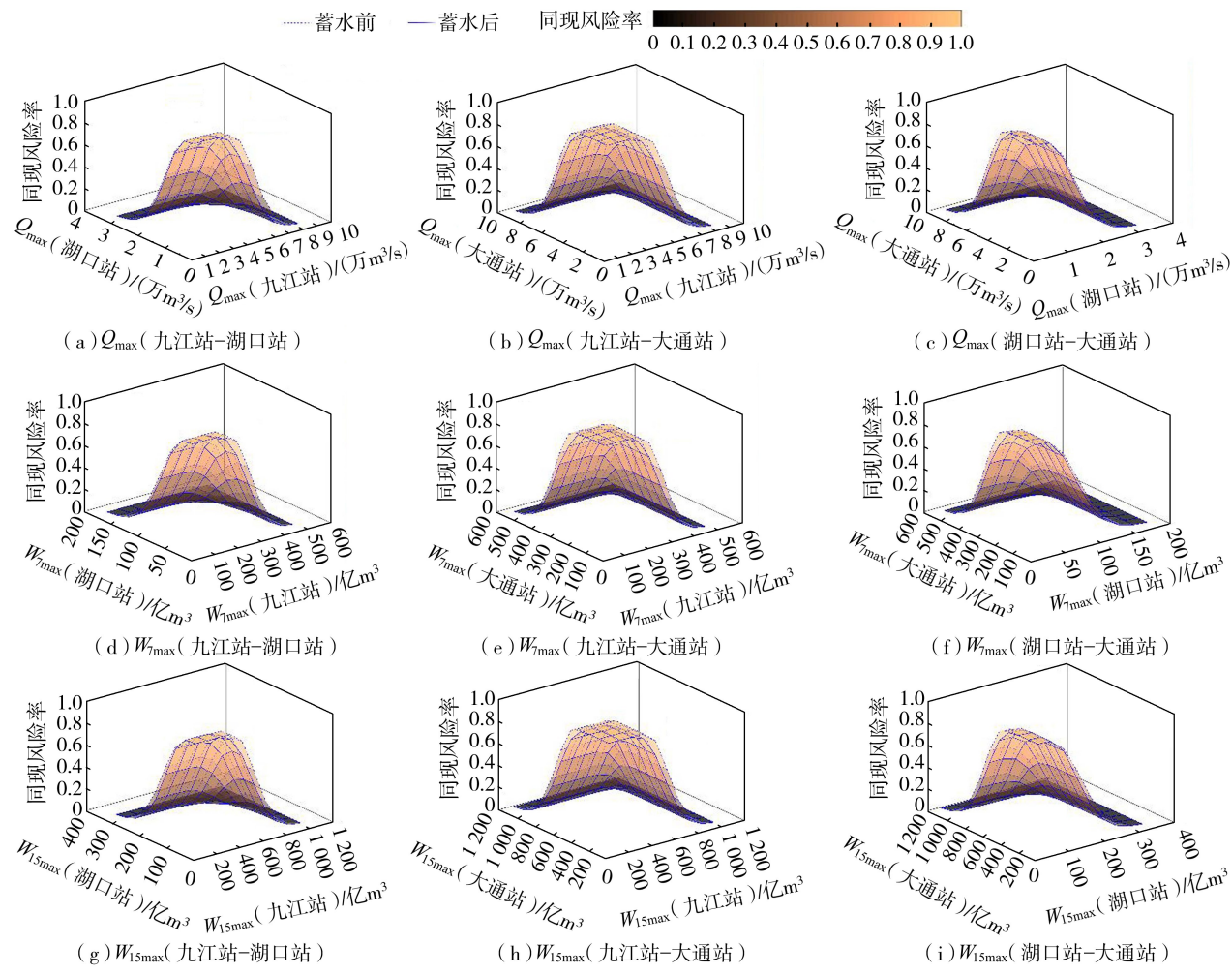


图7 三峡水库蓄水前后年最大洪水量级遭遇的同现风险率

10^{-3} 、 1.36×10^{-3} , 同现风险率逐渐降低且略低于蓄水前, 分别降低了22%、19%、20%。

三峡水库蓄水后, 九江站与大通站遭遇超100年一遇 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 的风险率分别降低了44%、40%、45%, 湖口站与大通站遭遇超100年一遇 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 的风险率分别降低了9%、13%、19%。

综上, 三峡工程的运行较好地降低了长江下游干流与鄱阳湖年最大洪峰流量、年最大7d和15d洪量遭遇的风险, 其中九江站与湖口站的年最大洪水量级遭遇的风险下降最大。

4 结 论

a. 三峡水库蓄水前后, 6月上旬(含)前、9月中旬(含)后, 九江站、湖口站、大通站任意两站的年最大洪峰流量、年最大7d洪量、年最大15d洪量时间遭遇风险均较低。三峡水库蓄水前后年最大洪水发生时间遭遇风险有增有降, 当前湖口站与干流九江站、大通站的洪水发生时间遭遇风险于6月上旬至7月上旬达到最大, 干流九江站与大通站的洪水发

生时间遭遇风险于6月下旬至7月下旬达到最大, 应予以重点关注。

b. 长江下游洪水量级的同现风险率随洪水量级的增大而减小, 且三峡水库蓄水后任意两站遭遇某量级洪水的同现风险率较蓄水前有一定程度的降低, 其中九江站与湖口站100年一遇 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 遭遇风险分别降低36%、5%、20%, 九江站与大通站100年一遇 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 遭遇风险分别降低44%、40%、45%, 湖口站与大通站100年一遇 $Q_{\max}$ 、 $W_{7\max}$ 、 $W_{15\max}$ 遭遇风险分别降低9%、13%、19%, 说明三峡工程的运行能较好地降低长江下游干流与鄱阳湖洪峰量级遭遇的风险, 其中九江站与大通站的年最大洪水量级遭遇的风险下降最大。

参考文献:

[1] 张文胜, 赵学民. 长江洪水特性及防洪对策探讨[J]. 水利水电技术, 2004, 35(5): 80-82. (ZHANG Wensheng, ZHAO Xuemin. Flood characteristics of Yangtze River and related countermeasures for flood control [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(5): 80-82. (in Chinese))

- [2] 张广明,王志超,吴龙华,等. 江湖洪水遭遇下鄱阳湖水动力模拟[J]. 中国农村水利水电, 2024 (3): 69-77. (ZHANG Guangming, WANG Zhichao, WU Longhua, et al. Hydrodynamic simulation of Poyang Lake flood under Yangtze River flood encountering[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(3):69-77. (in Chinese))
- [3] 陈璐,郭生练,张洪刚,等. 长江上游干支流洪水遭遇分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 323-330. (CHEN Lu, GUO Shenglian, ZHANG Honggang, et al. Flood coincidence probability analysis for the upstream Yangtze River and its tributaries[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 323-330. (in Chinese))
- [4] 陈璐. Copula 函数理论在多变量水文分析计算中的应用研究[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2013.
- [5] 张超,彭杨,纪昌明,等. 长江上游与洞庭湖洪水遭遇风险分析[J]. 水力发电学报, 2020, 39 (8): 55-68. (ZHANG Chao, PENG Yang, JI Changming, et al. Floods encountering risk analysis for upper Yangtze River and Dongting Lake[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(8): 55-68. (in Chinese))
- [6] 李继清,谢宇韬,侯宇. 基于 Copula 函数的川江干支流洪水遭遇分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30 (5): 1275-1283. (LI Jiqing, XIE Yutao, HOU Yu. Analysis of floods encounter of the main stream and tributaries of Chuanjiang River based on Copula function [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(5): 1275-1283. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 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))
- [9] 王飞龙,胡挺. 鄱阳湖口水位流量关系研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(11): 112-118. (WANG Feilong, HU Ting. Research on the relationship between water level and discharge at the Poyang Lake Estuary [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023 (11): 112-118. (in Chinese))
- [10] 曹岩. 河冰强度标准值确定方法研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2013.
- [11] 温会. 吕梁市中西河流域径流变化特征分析及模拟[J]. 山西水土保持科技, 2023(4): 52-56. (WEN Hui. Analysis and simulation of runoff variation in Zhongxi River Basin[J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2023(4): 52-56. (in Chinese))
- [12] 陈梅,陈斯达,刘曾美,等. 广州市中心城区短历时暴雨变异特性研究[J]. 人民长江, 2016, 47 (12): 1-5. (CHEN Mei, CHEN Sida, LIU Zengmei, et al. Study on variation characteristics of short-duration rainstorm in central urban area of Guangzhou [J]. Yangtze River, 2016, 47(12): 1-5. (in Chinese))
- [13] 张超. 基于 Copula 函数的改进洪水遭遇模型及其应用[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2022.
- [14] 李娜. 长江降雨时空变化与典型洪水遭遇风险分析[D]. 武汉:武汉大学, 2022.
- [15] 李子远,冯平,苑希民. 黄河宁夏段干支流非一致性洪峰遭遇风险分析[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (6): 51-57. (LI Ziyuan, FENG Ping, YUAN Ximin. Coincidence risk analysis for non-stationary flood peak of Yellow River and its tributaries in Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 51-57. (in Chinese))
- [16] 李元生. 方向数据统计[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1998.
- [17] 卞佳琪,于慧,李强,等. 长江下游多维径流丰枯遭遇及丰枯演变分析[J]. 人民长江, 2021, 52(10): 120-127. (BIAN Jiaqi, YU Hui, LI Qiang, et al. Analysis on wetness-dryness encounter and evolution of multi-dimensional runoff in lower reaches of Changjiang River [J]. Yangtze River, 2021, 52 (10): 120-127. (in Chinese))
- [18] 刘章君,郭生练,许新发,等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 148-159. (LIU Zhangjun, GUO Shenglian, XU Xinfa, et al. Application of Copula functions in hydrology and water resources: a state-of-the-art review[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 148-159. (in Chinese))
- [19] 王伟,王乐,田逸飞,等. 丹江口水库入库洪水概率预报及调度风险分析[J]. 人民长江, 2023, 54(11): 60-67. (WANG Wei, WANG Le, TIAN Yifei, et al. Probabilistic forecasting on inflowing flood to Danjiangkou Reservoir and scheduling risk analysis[J]. Yangtze River, 2023, 54 (11): 60-67. (in Chinese))
- [20] 肖魁,陈进. 长江宜昌-九江站间水流传播时间分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(4): 1-5. (XIAO Kui, CHEN Jin. The flow travel time analysis of Yichang Hydrologic Station and Jiujiang Hydrologic Station of Changjiang River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(4): 1-5. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 12 - 08 编辑: 俞云利)