

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.011

基于 Copula 函数推求的管运洪水防洪标准探讨

王文圣^{1,2}, 覃光华^{1,2}, 梁瀚续¹, 李深奇³

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 四川省水利水电勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要:探讨了 2 种洪水风险理念, 论述了现行防洪标准的含义及年标准洪水频率曲线的推求方法, 提出了基于年标准洪水频率曲线诊断管运洪水防洪标准的新方法。介绍了基于 Copula 函数推求管运洪水的方法, 研究了其风险结构。以马边河马边站洪水为例推求管运洪水, 结果表明: 基于 Copula 函数推求管运洪水选取的样本序列不完全符合防洪规范要求, 所得到的管运洪水对应标准高于现行防洪标准, 增大了洪水风险, 会加大涉水工程的规模。

关键词:洪水风险; 管运洪水; Copula 函数; 防洪标准; 马边河

中图分类号:TV121; TV124 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0079-04

Probe on flood control standards of manage-flood based on Copula function//WANG Wensheng^{1,2}, QIN Guanghua^{1,2}, LIANG Hanxu¹, LI Shenqi³ (1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Chengdu 610065, China; 3. Sichuan Water Resources and Hydroelectric Investigation & Design Institute Limited Company, Chengdu 610072, China)

Abstract: Two concepts of flood risk are probed in this paper, and the exact meaning of current flood control standards and annual standard flood frequency curve are discussed. Based on annual standard flood frequency curve, a new method to diagnose flood control standards of the manage-flood is proposed. The approach of manage-flood calculation using Copula function is introduced, and its flood risk structure is studied. A case study of flood at Mabian station in the Mabian River shows that the sampling flood series in Copula function approach is not in accord with requirements of flood control; the obtained flood control standards of manage-flood exceed current flood control standards, flood risk would be increased, and water project scale would be enlarged.

Key words: flood risk; manage-flood; Copula function; flood control standards; Mabian River

水利工程中管理运用阶段的分期设计洪水称为管运洪水, 不同于规划阶段的设计洪水, 管运洪水是水库管理运行的基础。管运洪水作为一个新的概念逐渐被重视, 计算和分析方法取得了显著进展。管运洪水计算方法有 3 类。第 1 类方法直接将分期设计洪水作为管运洪水。分期设计洪水是在分析流域洪水季节性规律的基础上, 按照设计和管理要求, 把整个汛期划分为若干个分期, 在各分期内进行最大值选样, 通过频率计算求得设计频率对应的分期设计洪水。这类方法得到的主汛期管运洪水小于指定防洪标准对应洪水, 降低了洪水风险; 次汛期管运洪水大于指定防洪标准对应洪水, 增大了洪水风险, 没

有达到制定的防洪要求^[1]。第 2 类方法基于全概率公式推求管运洪水。张泽慧等^[2]阐述了基于全概率公式推求管运洪水的基本原理, 提出了在资料较短或汛期前、后洪水特征大致相同的情况下运用全概率公式推求管运洪水的可行方法。王文圣等^[3]提出以洪水分期为条件的管运洪水直接推求法, 在资料充足和相对充足情况下, 根据全概率公式直接采用频率分析推求管运洪水; 在资料不足情况下, 建立了基于全概率公式的管运洪水反算法。覃光华等^[4]研究了以前期水量为条件的管运洪水推求方法——直接法和间接法, 将前期水量分为少水和多水 2 种状态, 直接法以实测洪水资料为基础, 采用单

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC1510701); 国家自然科学基金(51679155)

作者简介:王文圣(1970—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文不确定性研究。E-mail:wangws70@scu.edu.cn

通信作者:覃光华(1975—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文预报研究。E-mail:ghqin2000@163.com

变量频率计算分析原理推求前期水量为少水和多水的条件分布;间接法以 Copula 函数描述年最大时段洪量和前期水量的二维联合分布。此类方法得到的主汛期管运洪水大于年最大设计洪水,次汛期管运洪水小于年最大设计洪水,管运洪水满足防洪要求,达到了指定的防洪标准。第 3 类方法基于 Copula 函数推求管运洪水^[5-6],得到的主汛期管运洪水大于年最大设计洪水,次汛期管运洪水小于年最大设计洪水。基于 Copula 函数推求的管运洪水设计值能否满足现行防洪标准需要进一步讨论。针对涉水工程的洪水风险问题,本文探讨基于 Copula 函数推求管运洪水的防洪达标问题。

1 涉水工程洪水风险

对涉水工程的洪水风险而言,在未来可能出现的洪水中,只有出现大于工程所能承受的最大洪水时,工程才会出现风险。设工程能承受的最大管运洪水值为 x_0 ,未来可能出现的洪水为 x ,当 $x > x_0$ 时,涉水工程出现防洪风险;当 $x \leq x_0$ 时,涉水工程是安全的。目前存在 2 种洪水风险理念,假定一年出现 k 次洪水,记为 $x_i (i=1, 2, \dots, k)$,第 1 种洪水风险理念为,当 $x_i > x_0$ 时,洪水计入对工程造成风险,称为次风险^[7];第 2 种洪水风险理念为,当 $\max x_i > x_0$ 时,洪水计入对工程造成风险,称为年风险。在水利工程的防洪安全分析计算时,鉴于工程的特殊性及其重要性,一年中只计年最大洪水造成的风险,即年风险。

由于风险是不确定性事件,因此采用风险事件发生概率(频率)来衡量风险大小,称为风险度,记为 P 。 P 值越大,事件出现的可能性越大,洪水风险越小;反之亦然。次风险和年风险的风险度分别称为次风险度和年风险度。对次风险度,以次频率表示,记为 P_s ;对年风险度,以年频率表示,记为 P_y 。 P_s 和 P_y 有着本质差异,前者以次计量,后者以年计量。

2 现行防洪标准和年标准洪水频率曲线的推求

2.1 现行工程防洪标准

根据 GB 50201—2014《防洪标准》,水利工程的防洪标准采用重现期表示,超过工程所能承受最大洪水(年最大设计值)的概率,即风险度 P_y 为

$$P_y = 1/T \quad (1)$$

式中 T 为重现期。

2.2 年标准洪水频率曲线的推求

为了符合防洪标准的要求,只计及洪水年最大值造成的风险,洪水频率分析计算中的年洪峰流量

和不同时间段的洪量样本系列均由年最大值样本系列组成。依据洪水年最大值样本系列(包含历史洪水),通过频率分析计算可获得洪水频率曲线(称为直接法),由此获得的洪水频率曲线称为年标准洪水频率曲线(图 1 中的曲线 S),是我国洪水计算规范制定的基础。根据推求的年标准洪水频率曲线确定的风险度和洪水设计值符合现行洪水计算规范要求 and 防洪标准。年标准洪水频率曲线可以作为衡量其他方法推求的年频率曲线是否符合要求(达标)的判别依据。

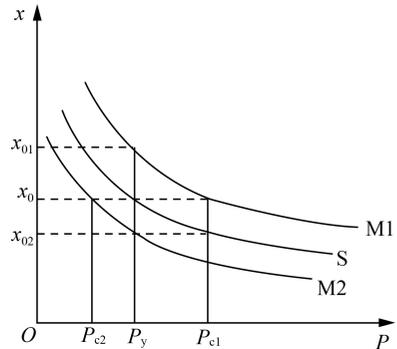


图 1 直接法和间接法推求的洪水频率曲线
Fig.1 Flood frequency curves obtained with direct method and indirect method

2.3 防洪达标分析

根据第 1 种洪水风险理念,以年最大值和次大值等洪水样本系列为基础推求洪水频率曲线(称为间接法),常规的和基于 Copula 函数推求的分期洪水频率曲线,即以次风险理念为基础得到的洪水频率曲线,如图 1 中的曲线 M1 和 M2。

将曲线 M1、M2 和曲线 S 进行对比,可以判断基于次风险理念推求的洪水成果是否符合防洪要求(达到防洪标准):①比较曲线 M1 和 S,间接法的成果超过防洪标准;②比较曲线 M2 和 S,间接法的成果低于防洪标准。具体结果如表 1 所示。

3 基于 Copula 函数推求的管运洪水

3.1 管运洪水的推求

以两分期为例进行说明,将整个汛期分为次汛期 A 和主汛期 B。分期 A 和分期 B 的风险度分别用 P_A 和 P_B 表示,基于 Copula 函数推求管运洪水的基本思路如下^[5]:

根据分期 A 和分期 B 内最大洪水样本系列分别获得各期洪水频率曲线,建立两分期洪水的 Copula 函数 $C(u, v)$,推求出年风险度:

$$P_c = 1 - C(u, v) \quad (2)$$

其中 $u = 1 - P_A$ $v = 1 - P_B$

式中 P_c 为根据 P_A 和 P_B 估计的年风险度。

表 1 洪水成果达标情况分析

Table 1 Analysis of flood results of different methods to reach standards

方法	洪水频率曲线	依据资料	年风险度	特征	达标情况	含义
直接法	S	洪水年最大值	$P_y(x > x_0)$	符合标准	达标	
间接法	M1	洪水年最大值及次大值等	$P_{c1}(x > x_0)$	$P_{c1} > P_y$	超过标准	根据 M1 曲线,由 P_y 得到的管运洪水 $x_{01} > x_0$,即超过了防洪要求,偏安全
	M2	洪水年最大值及次大值等	$P_{c2}(x > x_0)$	$P_{c2} < P_y$	低于标准	根据 M2 曲线,由 P_y 得到的管运洪水 $x_{02} < x_0$,即降低了防洪要求,风险增大

令 $P_c = P_y$, 并假设 $P_A = P_B$, 据此可得分期 A 和分期 B 的风险度 P_A 和 P_B , 最后通过各分期洪水频率曲线得到各分期管运洪水 x_A 和 x_B 。

3.2 分期管运洪水的风险结构

由上述推求过程可得:①计算分期洪水频率分布曲线时,选样为分期内洪水最大值,依据资料必然包含年最大值和次大值,因此,基于式(2)获得的年风险度 P_c 含有次大值产生的洪水风险,这不完全符合现行防洪标准规定的选样要求^[8],即在研究时间尺度上按年最大值选样;②式(2)中 $C(u, v)$ 表示的是两分期洪水值均小于分期管运洪水的概率,也就是说, P_c 表示的是两分期至少有 1 个分期内洪水值大于分期管运洪水的概率(风险度),这不符合防洪规范中规定的涉水工程 1 年仅破坏 1 次的要求。

基于 Copula 函数推求管运洪水的年风险既包括了年最大值导致的风险,又包括次大值造成的风险。对于同一管运洪水 x_0 , 基于第 1 种风险理念的年风险度 $P_c(x > x_0)$ 大于基于第 2 种风险理念的年风险度 $P_y(x > x_0)$ 。假设基于 Copula 函数推求出的分期管运洪水分别为 x_{0A} 和 x_{0B} , 未来某一年发生的分期洪水最大值分别为 x_A 和 x_B , 并且 x_B 为年内最大值,即 $x_A < x_B$ 。两种情况分析如下:

第 1 种情况: $x_A > x_{0A}$, $x_B < x_{0B}$ 。根据第 1 种风险理念,这一年涉水工程仅在分期 A 内出现 1 次风险,工程被破坏;根据第 2 种风险理念,该年未出现风险,工程正常运行。

第 2 种情况: $x_A > x_{0A}$, $x_B > x_{0B}$ 。根据第 1 种风险理念,则这一年涉水工程在分期 A 和分期 B 均出现风险,即 1 年内出现 2 次风险,工程被破坏 2 次;根据第 2 种风险理念,这一年仅分期 B 内出现风险,工程仅破坏 1 次。

3.3 达标检验

从风险结构分析可见,基于 Copula 函数推求出的管运洪水是超标的,防洪是偏安全的。对基于 Copula 函数推求出的管运洪水达标情况进行检验,基本步骤如下:①根据流域洪水特性合理划分次汛期 A 和主汛期 B,获取各分期内最大值序列样本和

年最大值序列样本;②推求分期 A 和分期 B 及全年最大洪水频率分布曲线,分别记为曲线 A、B 和 S;③建立分期 A 和分期 B 洪水的 Copula 函数 $C(u, v)$;④给定一系列的洪水值 x ,分别在 A、B、S 频率曲线上获得相的频率 P_A 、 P_B 和 P_y ;⑤由 P_A 和 P_B 根据 $C(u, v)$ 可推求出 P_c ,得到洪水 x 与 P_c 对应的频率曲线,此曲线即为基于 Copula 函数推求的年洪水频率曲线,计为曲线 M;⑥将曲线 M 和 S 点绘在一张坐标纸上,根据表 1 检验其防洪达标情况。

4 实例分析

马边站是岷江流域马边河上重要的水文站,集水面积 1 830 km²。根据马边站 1957—2013 年洪峰流量资料和洪水特性,将 5 月、6 月、9 月、10 月划分为次汛期 A,将 7 月、8 月划分为主汛期 B,分别选出次汛期、主汛期以及全年的最大洪峰流量系列,并假定它们服从 P-III 分布。采用 Gumbel-Hougaard Copula 函数构造次汛期与主汛期最大洪峰流量的联合分布^[5],其中参数 θ 根据 Kendall 秩相关系数进行估计,得到 $\theta = 1.0089$ 。

次汛期 A 最大洪峰流量均值为 $\bar{x}_A = 777 \text{ m}^3/\text{s}$,变差系数和偏差系数分别为 $C_{vA} = 0.49$ 、 $C_{sA} = 1.54$;主汛期 B 最大洪峰流量均值为 $\bar{x}_B = 1 280 \text{ m}^3/\text{s}$,变差系数和偏差系数分别为 $C_{vB} = 0.34$ 、 $C_{sB} = 0.95$;年最大洪峰流量均值为 $\bar{x} = 1 330 \text{ m}^3/\text{s}$,变差系数和偏差系数分别为 $C_v = 0.32$ 、 $C_s = 1.01$ 。次汛期、主汛期、年洪峰流量频率曲线如图 2 所示,从图 2 中可以看出,3 条曲线符合频率分布规律。

基于 Copula 函数推求的洪水频率曲线 M 见图 3,曲线 M 和 S 不同是由于计算方法的不同。对两条频率曲线代表的管运洪水对应的风险度进行计算,结果见表 2。从表 2 中可以看出,对于同一管运洪水,频率曲线 M 对应的风险度大于频率曲线 S。对 50 年一遇的管运洪水,曲线 M 的风险度比曲线 S 高约 14.3%;对 1000 年一遇的管运洪水,曲线 M 的风险度比曲线 S 高约 30%;随着管运洪水的增加,两者风险度的差距也越来越大。可见,基于 Copula 函数推求出的管运洪水偏于安全的,防洪不达标。

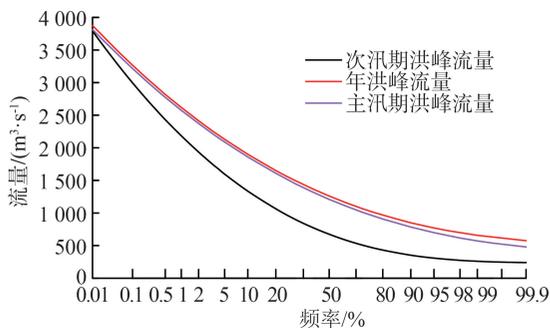


图2 次汛期、主汛期、年洪峰流量频率曲线对比

Fig.2 Comparison of flood frequency curves of peak discharges of non-major flood period, major flood period, and annual flood period

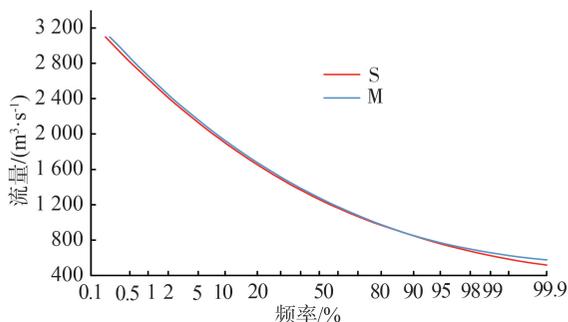


图3 基于 Copula 函数的洪水频率曲线与年标准洪水频率曲线对比

Fig.3 Comparison of flood frequency curve based on Copula function and annual standard flood frequency curve

表2 曲线 S 和 M 对应的管运洪水风险度

Table 2 Risk degree of manage-flood corresponding to curves S and M

管运洪水 流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	P_y	P_c	风险度增量/%
3 265	0.001	0.001 3	30.2
3 075	0.002	0.002 5	26.2
2 819	0.005	0.006 1	21.2
2 619	0.010	0.011 8	17.6
2 414	0.020	0.022 9	14.3

5 结 语

本文提出了洪水次风险和年风险理念,2种洪水风险理念有本质区别,现行设计洪水计算以第2类洪水风险(年风险)理念为基础,基于 Copula 函数推求的分期管运洪水以第1类洪水风险(次风险)理念为基础。基于 Copula 函数推求的管运洪水不符合现行设计洪水计算规范要求,防洪风险超标,风险结构和应用分析表明,基于 Copula 函数推求的管运洪水是不达标的。可进一步研究次风险和年风险的合理转换以推求出达标的管运洪水,或者在资料允许的条件下尝试以分期内年最大值为依据,基于 Copula 函数推求分期管运洪水。

参考文献:

- [1] 丁晶,何清燕,覃光华,等.论水库工程之管运洪水[J].水科学进展,2016,27(1):107-115. (DING Jing, HE Qingyan, QIN Guanghua, et al. Research on the flood for reservoirs engineering management[J]. Advances in Water Science, 2016,27(1):107-115. (in Chinese))
- [2] 张泽慧,丁晶,覃光华,等.基于全概率公式直接推求管运洪水[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(增刊2):34-38. (ZHANG Zehui, DING Jing, QIN Guanghua, et al. Calculation of the manage-flood based on the total probability formula[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2016,48(Sup 2):34-38. (in Chinese))
- [3] 王文圣,姚瑞虎,覃光华,等.以洪水分期为条件的管运洪水直接推求法[J].工程科学与技术,2019,51(1):75-82. (WANG Wensheng, YAO Ruihu, QIN Guanghua, et al. Direct method of calculating the manage-flood based on division of flood period[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019,51(1):75-82. (in Chinese))
- [4] 覃光华,曹冷然,王文圣,等.以前期水量为条件的管运洪水推求[J].工程科学与技术,2019,51(5):17-24. (QIN Guanghua, CAO Lingran, WANG Wensheng, et al. Calculation of manage-flood based on the previous flood volume in a river[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019,51(5):17-24. (in Chinese))
- [5] 张娜,郭生练,刘攀,等.基于 Copula 函数法推求分期设计洪水和汛限水位[J].武汉大学学报(工学版),2008,41(6):33-36. (ZHANG Na, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Seasonal design floods and flood control water levels based on Copula[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008,41(6):33-36. (in Chinese))
- [6] 胡义明,梁忠民,姚轶,等.变化环境下洪峰-洪量组合设计值计算方法研究[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):492-498. (HU Yiming, LIANG Zhongmin, YAO Yi, et al. Calculation method of design value combination of flood peak and flood volume under changing environment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(6):492-498. (in Chinese))
- [7] 刘曾美,熊腮敏,雷勇,等.城镇内涝防治中市政排水与水利排涝的标准衔接研究[J].水资源保护,2022,38(1):125-132. (LIU Zengmei, XIONG Saimin, LEI Yong, et al. Study on design standard matching between municipal drainage and water conservancy drainage in urban local flood control[J]. Water Resources Protection, 2022,38(1):125-132. (in Chinese))
- [8] 王文圣,黄伟军,覃光华,等.涉水工程洪水风险基本概念探讨[J].工程科学与技术,2021,53(1):13-17. (WANG Wensheng, HUANG Weijun, QIN Guanghua, et al. Preliminary probe on basic concept of flood risk for wading project[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021,53(1):13-17. (in Chinese))

(收稿日期:2022-01-11 编辑:施业)