

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.014

感潮地区涝区暴雨与承泄区上游洪水的遭遇规律

刘曾美^{1,2}, 王尚伟¹, 蔡玉婷¹, 蓝福鹏¹

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640;

2. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

摘要:感潮地区内涝防治规划设计必须合理确定与设计暴雨相组合的承泄区设计潮位过程,而上游洪水会抬高承泄区潮位,对低潮位的抬高作用尤为显著,导致利用闸门抢排涝水非常不利,故需进行涝区暴雨与承泄区上游洪水的遭遇分析。以中(山)珠(海)联围为例,分别采用定性分析法和概率风险分析法分析中珠联围暴雨与承泄区磨刀门水道的上游西江马口站洪水的遭遇规律。定性分析结果表明,在每年的5—8月,中珠联围发生大暴雨时,有较大可能遭遇到西江洪水,尤其在6—7月遭遇概率特别大。概率风险分析结果表明,当中珠联围发生不低于20年一遇大暴雨和未发生超过20年一遇大暴雨时,马口站发生不低于频率为90%、频率为75%、多年平均、5年一遇、10年一遇最大洪水的概率分别为15.21%、10.99%、6.58%、4.12%、2.93%和13.62%、9.80%、5.84%、3.65%、2.59%。

关键词:感潮地区;涝区暴雨;承泄区上游洪水;雨洪遭遇;概率风险分析法;Copula函数;联合分布函数;中珠联围

中图分类号:TV122

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2021)02-0089-06

Coincidence rules of rainfall in waterlogging area of tide-affected area and upstream flood in flood area of drainage receiver // LIU Zengmei^{1,2}, WANG Shangwei¹, CAI Yuting¹, LAN Fupeng¹ (1. Department of Water Conservancy and Hydropower Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Planning design for preventing waterlogging in tide-affected area must reasonably determine the design process of tidal level combined with the design rainfall in waterlogging area, while the upstream flood will raise the tide level in the drainage receiver, having especially effects on the raising of lower tide level, which is very unfavorable for the use of the gate to rush the drainage water, so the coincidence between the rainfall in the waterlogging area and the upstream flood in the drainage receiver needs to be analyzed. Taking Zhong-Zhu union catchment as an example, the qualitative analysis and the probabilistic risk analysis are adopted respectively to analyze the coincidence rules of the rainfall of Zhong-Zhu union catchment and the flood in the upstream of Modaomen waterway in the drainage receiver. The results of the qualitative analysis show that during the period from May to August every year, when there is a heavy rain in Zhong-Zhu union catchment, it is likely to encounter the flood from XiJiang River, especially during June to July. The results of the probability risk analysis show that when there is a rainstorm with a return period of no less than 20 years and no rainstorm with a return period of more than 20 years, and the probability of maximum flood with a return period of no less than 90%, 75%, multi-year average, 5-year and 10-year is 15.21%, 10.99%, 6.58%, 4.12%, 2.93% and 13.62%, 9.80%, 5.84%, 3.65% and 2.59%, respectively.

Key words: tide-affected area; rainfall in waterlogging area; upstream flood in drainage receiver; coincidence of rainfall and flood; probabilistic risk analysis; Copula function; joint distribution function; Zhong-Zhu union catchment

珠江三角洲等感潮地区受海洋季风气候的影响,降水量多、暴雨强度大,加上常受到承泄区洪

(潮)水位的顶托,因此经常导致严重的内涝灾害。感潮地区的内涝防治规划设计,必须合理确定与设

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508203);广东省水利科技创新项目(2011-18,2016-27)

作者简介:刘曾美(1970—),女,副教授,博士,主要从事洪涝灾害防治研究。E-mail: liuzm@scut.edu.cn

计暴雨相组合的承泄区设计潮位过程,因为排涝规模不仅与涝区的设计暴雨有关,而且还与设计暴雨相组合的承泄区设计潮位过程息息相关,甚至排涝布置方案都与之相关^[1]。感潮地区涝区的承泄区通常为感潮河段,其水位既受自下而上的河口潮波的影响,又受自上而下的上游河川径流的作用,任一时刻的水位都是河口潮波和上游径流共同作用的结果^[2]。经大量同步实测资料分析得到,河口潮波的影响主要是抬高高潮位、降低低潮位,而上游洪水的影响会抬高感潮河段整个潮位过程;上游洪水来的愈大,潮位被抬高愈多,潮位愈高,且对低潮位的抬高作用尤为显著,这对利用闸门抢排是非常不利的^[3]。因此,为合理推求承泄区治涝设计潮位过程,必须进行感潮地区涝区暴雨与承泄区上游洪水的遭遇分析。

目前,水文要素的遭遇分析大致可分为定性分析^[4-6]和概率风险分析^[7-12]两种。定性分析法是根据研究区域历年同步观测资料进行简单的统计分析计算,分析某一频率水文要素可能遭遇到另一水文要素的大致情况。如陈立华等^[4]从洪水组成、遭遇时间以及洪峰重现期等方面,重点分析了梧州站干支流洪水遭遇规律;高慧琴等^[5]根据西江流域干、支流主要测站历年实测洪水资料系列,对西江流域干流洪水组成及干、支流洪水遭遇情况进行统计分析,揭示了西江流域洪水特性;朱龙腾等^[6]利用南四湖流域相关水信息资料分析了南四湖主要入湖河流干支流、入湖河流与湖区的洪水遭遇频率。而概率风险分析法需根据研究目的选择研究对象,基于所研究的对象之间的联合分布,分析各种遭遇(组合)的风险。如刘曾美等^[7]通过优选 Copula 函数构建区间暴雨与外江水位的联合分布,从而进行区间暴雨与外江水位的遭遇风险分析;曾明等^[8]通过优选 Copula 函数构建上海市年最大 1 d 和 3 d 降水量的联合分布,从而推算它们的同现重现期和组合风险概率;谢华等^[9]应用 Copula 函数分析了长江、淮河及黄河流域的径流量的联合概率和条件概率问题;吕振豫等^[10]应用 Copula 函数研究了东江流域上游龙川站、中游河源站和下游博罗站 3 个站点汛期、非汛期及全年降雨丰枯遭遇发生概率;刘曾美等^[12-13]基于 Copula 函数研究了感潮河段水位与上游洪水、河口潮位的遭遇风险规律;Pinya 等^[14]构建挡潮闸内水文站和闸外水位站的水文变量的联合分布,再基于联合分布用 Monte Carlo 模拟的多变量作为河道 MIKE11 模型的输入,根据模拟的闸内水位估计洪涝灾害风险,等等。

本文以中(山)珠(海)联围(简称为中珠联围)

为例,分别采用定性分析法和概率风险分析法两种方法分析中珠联围暴雨与承泄区磨刀门水道上游马口站洪水的遭遇规律。

1 研究区概况

中珠联围位于珠江三角洲下游、广东省中山市的南部,珠海市的西南部,地跨中山、珠海两市,总面积为 338 km²,其中中山市面积为 219 km²,珠海市面积为 119 km²^[15]。东南与澳门半岛相邻,西南面为磨刀门水道,隔磨刀门水道与珠海市斗门区相望,北接五桂山脉和凤凰山脉(图 1)。中珠联围的主要承泄区为磨刀门水道,7 个外排水闸中有 5 个是排入磨刀门水道。磨刀门水道是珠江的主要入海口门,是西江的主要泄洪口。中珠联围因地处特殊的地理位置和地形条件,不仅暴雨多、强度大,而且涝水的外排易遭受磨刀门水道洪(潮)水位的顶托而排水不畅,因此极易发生严重的内涝灾害。



图 1 中珠联围所在区域

Fig. 1 Region of Zhong-Zhu union catchment

中珠联围内三乡镇有三乡雨量站,西面紧邻的神湾镇有神湾雨量站,南面紧邻的珠海竹仙洞水库有竹仙洞雨量站,因此可采用神湾、三乡和竹仙洞 3 个雨量站数据来分析中珠联围的面雨量。承泄区磨刀门水道有广东省省级灯笼山潮位站和中山市级马角潮位站与大涌口潮位站,西江上距离磨刀门水道最近的水文站为位于佛山市三水区的马口站(距离较远,未能包括在图 1 中)。承泄区磨刀门水道水位既受河口潮波的影响,也受西江洪水的影响。当中珠联围暴雨遭遇西江上游大洪水时,西江洪水会抬高承泄区整个潮位过程,导致外排水闸几乎没机会抢排涝水,从而发生极其严重的内涝灾害。因此,需要研究中珠联围暴雨与承泄区上游洪水的遭遇规

律,为中珠联围的治涝规划设计提供科学依据。

2 中珠联围暴雨与西江洪水遭遇的定性分析

西江大洪水多发生在5—8月,且以6—7月概率最大,主要是由锋面雨导致;中珠联围的大暴雨多发生在5—9月,既可能是锋面雨,也可能是台风雨。锋面雨主要发生在5—8月,台风雨的活跃期是7—9月,所以中珠联围暴雨与西江大洪水在5—月遭遇的可能性比较大,尤其是6—7月。

2.1 时间可能性

采用中珠联围的逐日面雨量与西江马口站的逐日平均径流量资料来分析。中珠联围的面雨量采用神湾、三乡和竹仙洞3个雨量站的加权平均值。由于资料条件的限制,中珠联围的面雨量系列长度仅33年(1973—2008年,其中缺1986年、1987年和2000年),西江马口站则采用1960—2008年共49年历年逐日资料。

根据33年的面雨量资料统计分析的多年各月降水量百分比成果见表1,统计分析的历年年最大日暴雨发生的时间规律见表2。采用马口水文站1960—2008年逐日资料统计历年各月径流,求得多年各月径流量的百分比成果汇总于表1,统计分析的历年年最大日均流量发生时间规律成果汇总于表2。

由表1可见,中珠联围每年5—9月间各月的降水量占比都比较大,这5个月的降水量占全年雨量的76.9%;表2显示,年最大日暴雨有87.88%的概率发生在5—9月,但10—11月的台风会带来大暴雨,甚至是年度的最大暴雨。

由表1明显可见,西江马口站每年5—8月各月的径流量占比都比较大,其次是9月和4月;表2显示,年最大日均流量有98%的概率发生在5—9月,

表1 各月多年平均降水量与径流量占全年的比例
Table 1 Monthly average precipitation and runoff as a proportion of the year

月份	中珠联围各月降水量占比/%	西江马口站各月平均径流量占比/%
1	1.45	2.70
2	2.43	2.83
3	3.65	3.77
4	8.13	7.07
5	14.89	11.84
6	18.68	16.77
7	14.67	16.80
8	16.14	14.42
9	12.51	9.92
10	4.44	6.02
11	1.63	4.47
12	1.37	3.05

表2 历年年最大日暴雨与日均流量发生的月份统计

Table 2 Monthly statistics of the maximum daily rainstorm and daily average flow in the past years

月份	中珠联围年最大日暴雨		西江马口站年最大日均流量	
	发生次数	发生概率/%	发生次数	发生概率/%
4			1	2.04
5	9	27.27	6	12.24
6	7	21.21	17	34.69
7	5	15.15	17	34.69
8	6	18.18	6	12.24
9	8	24.24	2	4.08
10	3	9.09		
11	1	3.03		
合计	33	100	49	100

有69.4%的概率是发生在6—7月。1960—2008年49年中,年最大日均流量有48年是发生在5—9月,其中有34年发生在6—7月,有1年发生在4月还是在30日。

综上所述,在每年的5—8月,中珠联围发生大暴雨时,有较大可能遭遇到西江较大洪水,尤其是6—7月,中珠联围发生大暴雨时,遭遇西江大洪水的概率特别大,但10月和11月中珠联围发生大暴雨时,几乎不大可能遭遇到西江洪水。

2.2 实际发生的遭遇情况分析

首先对中珠联围的年最大日暴雨系列和西江马口站年最大日均流量系列进行频率分析,以了解中珠联围的年最大日暴雨与西江马口站年最大日均流量的各频率重现水平值。对中珠联围33年年最大日暴雨系列,分别采用尚缺乏严格概率理论依据但具有一定代表性并有较大实用性而得到广泛采用的P-Ⅲ分布和具有极值分布理论基础且在水文气象极端事件研究中应用适用性强的广义极值分布(GEV)^[16]来拟合,均能拟合得较好,但P-Ⅲ分布稍优,拟合的频率曲线见图2,各频率分析成果见表3。对马口站49年年最大日均流量系列也分别采用广

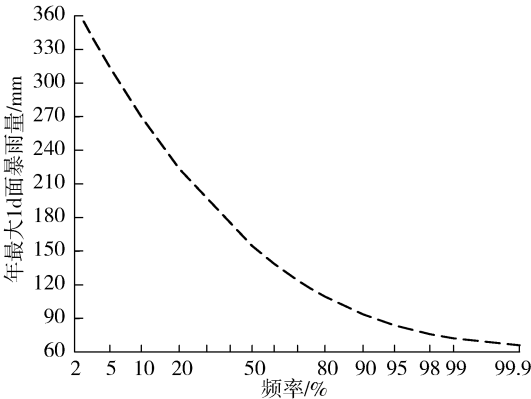


图2 中珠联围年最大1d面暴雨量频率曲线
Fig.2 Annual maximum daily rainstorm frequency curve of Zhong-Zhu union catchment

表3 各频率中珠联围年最大1d面暴雨量
和西江马口站年最大日均流量

Table 3 Annual maximum daily rainstorm and average
flow of Zhong-Zhu union catchment and Xijiang Makou
Station for per frequency

频率/%	中珠联围年最大 1d暴雨量/mm	西江马口站年最大 日均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
2.0	370.0	53 988
5.0	314.0	46 716
10.0	270.0	41 346
20.0	223.0	35 967
33.3	187.0	32 760
50.0	155.0	28 249
75.0	117.0	23 758
90.0	93.5	20 577
95.0	83.8	18 960
98.0	76.0	17 346

备注:西江马口站日均流量均值为 $29\,610 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

义极值分布和 P-Ⅲ 分布来拟合,也均能较好拟合,但广义极值分布拟合效果稍优,3 个分布参数分别为: $\xi=0.054\,5$ 、 $\delta=6\,471$ 、 $\mu=25\,853$,拟合的频率曲线见图 3,各频率分析成果见表 3。

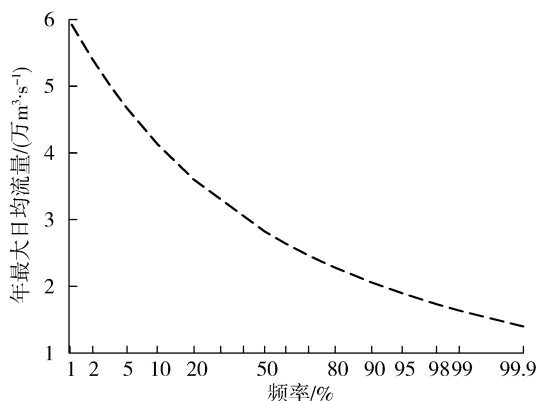


图3 西江马口站年最大日均流量频率曲线

Fig.3 Annual maximum daily flow frequency curve
of Xijiang Makou Station

采用中珠联围逐日面降水资料与西江马口站逐日洪水资料分析发生实际发生的雨洪遭遇。当中珠联围发生年最大1d面暴雨时,有8年遭遇到了西江洪水,其中5年是发生在6—7月。8次遭遇中,5次是遭遇到的一年一遇左右至接近两年一遇的洪水,另3次是较大洪水,这3次中珠联围暴雨与西江马口站大洪水的遭遇情况如下:

a. 1994年中珠联围年最大1d面暴雨发生在7月21日,暴雨量为263.6mm,接近10年一遇面暴雨。22日、23日面暴雨量分别为251.9mm、106mm;21—27日7d面暴雨量达753mm;上游马口站22—26日日均流量为2.94万 m^3/s 、3.35万 m^3/s 、3.81万 m^3/s 、4.14万 m^3/s 和4.08万 m^3/s ,洪水量级由年最大日均洪水的多年平均值增至10年一遇洪水。

b. 1998年中珠联围年最大1d面暴雨发生在6月23日,暴雨量为132.1mm,年频率约60%。遭遇的西江马口站洪水日均流量为3.72万 m^3/s ,约大于5年一遇洪水。从6月23日洪水一路上涨至6月27日的年最大流量4.61万 m^3/s ,接近20年一遇洪水。

c. 2005年中珠联围年最大1d面暴雨发生在6月23日,暴雨量仅为86.3mm,小于年频率90%的暴雨,遭遇到的西江马口站洪水日均流量为4.64万 m^3/s ,接近20年一遇洪水,6月24日涨至5.27万 m^3/s ,为全年最大,超过30年一遇洪水。

3 中珠联围暴雨与西江洪水遭遇的风险分析

3.1 概率风险分析模型

3.1.1 联合分布函数确定

设 $F(h, q)$ 为中珠联围年最大1d面暴雨量 H 和西江马口站相应洪水流量 Q 的联合分布函数,其边缘分布函数为 $F_H(h)$ 和 $F_Q(q)$ ($F_H(h) = \int_0^h f_h(h) dh$, $F_Q(q) = \int_{-\infty}^q f_q(q) dq$),根据Sklar定理^[13],一定存在唯一的Copula函数 $C(u, v)$,使得:

$$\begin{cases} F(h, q) = C(F_H(h), F_Q(q)) \\ u = F_H(h) \\ v = F_Q(q) \end{cases} \quad (1)$$

联合分布函数的性质和与之对应的Copula函数密切相关。Copula函数中,采用阿基米德族Copula函数描述水文变量的研究越来越多,并已经具有理论和应用基础^[17-20]。每种Copula函数的参数 θ 都与用于度量水文变量相关性的指标Kendall秩相关系数 τ 存在着一定的关系,故可根据变量之间的相关程度合理选择阿基米德族中的Copula函数。

由前面分析可知,中珠联围暴雨与西江马口站洪水有一定的遭遇可能性,可根据中珠联围最大1d面暴雨量 H 和西江马口站相应洪水流量 Q 的秩相关系数值大致确定选用可能合适的Copula函数。采用两步法估计联合分布的参数,参数确定后,依据离差平方和(OLS)最小准则选取最适合的Copula函数^[21],从而构建中珠联围暴雨与西江马口站洪水的联合分布。

3.1.2 模型构建

从遭遇风险角度,通常会关注当某一变量发生某一非期望事件的前提下,另一变量也发生某一非期望事件的概率。暴雨和洪水都是变量值愈大愈不利的变量类型,因此关注的是条件概率 $P(Q \geq q | H \geq h)$ 。其含义为当中珠联围发生不低于某一标准的暴雨量 h 时,遭遇到的西江洪水也不低于某一标准的流量 q 的概率,这一概率为遭遇风险率。

从内涝防治角度,通常会关注当某一变量未发生非期望事件的前提下,另一变量却发生某一非期望事件的概率。因此,所关注的是条件概率 $P(Q \geq q | H \leq h)$,其涵义为即使中珠联围未发生超过某一标准的暴雨量 h ,而遭遇到的西江洪水也不低于某一标准的流量 q 的概率,这是以 (h, q) 为设计组合而存在的风险,故从设计组合角度而言,可将这一概率称为组合风险率。

可推求得到遭遇风险率 $P(Q \geq q | H \geq h)$ 和组合风险率 $P(Q \geq q | H \leq h)$ 的计算式^[10]分别为

$$P(Q \geq q | H \geq h) = \frac{P(Q \geq q, H \geq h)}{P(H \geq h)} = \frac{1 - F_H(h) - F_Q(q) + F(h, q)}{1 - F_H(h)} \quad (2)$$

$$P(Q \geq q | H \leq h) = \frac{P(Q \geq q, H \leq h)}{P(H \leq h)} = \frac{F_H(h) - F(h, q)}{F_H(h)} \quad (3)$$

对一确定的设计标准, $F_H(h)$ 为确定值,遭遇风险率 $P(Q \geq q | H \geq h)$ 和组合风险率 $P(Q \geq q | H \leq h)$ 均随相应洪水流量 q 的增大而减小;倘若中珠联围暴雨与西江马口站相应洪水流量 q 的相关性愈大,则遭遇风险率愈大,组合风险率愈小。

对任一相应洪水流量,可在年最大洪水流量系

列频率曲线中对应一个频率,从而得到重现期,因此便可以借助联合分布来研究中珠联围暴雨与西江洪水遭遇组合的概率风险(表4)。

3.2 模型模拟结果

a. 确定边缘分布。中珠联围年最大1d面暴雨系列的频率分析成果见图2和表3,西江马口站相应洪水采用P-Ⅲ分布的拟合效果相对较优,统计参数为 $Q = 13\,835\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $C_v = 0.628$ 、 $C_s = 1.995$ 。

b. 选取中珠联围年最大1d面暴雨和马口站相应洪水构成联合观测值系列,并据此建立联合分布。计算得中珠联围年最大1d面暴雨和西江马口站相应洪水的Kendall秩相关系数 $\tau = 0.0282$,表明中珠联围面最大1d面暴雨和马口站相应洪水存在着较弱的正相关关系,故可以选用GH Copula函数、Clayton Copula函数、AMH Copula函数以及Frank Copula函数来进行探讨。求出经验分布与所采用的理论联合分布拟合最佳时的参数 θ 及其相应的OLS,选取最小的OLS值相应的Copula函数类型和参数。当采用AMH Copula函数时,与经验分布拟合最佳时的OLS最小(0.03413),其参数 $\theta = 0.134$,故选取AMH Copula来描述中珠联围年最大1d面暴雨与西江马口站洪水的相关性结构。于是得到中珠联围最大1d面暴雨 H 与西江马口站相应洪水流

表4 中珠联围暴雨与西江马口洪水遭遇组合的风险

Table 4 Risk of the combination of rainfalls in Zhong-Zhu union catchment and various frequency floods in Xijiang Makou Station

暴雨各种不同遭遇组合									
中珠联围年最大1d面暴雨			西江马口站相应洪水				联合分布概 率 $F(h,z)$	遭遇风 险率/%	组合风 险率/%
H/mm	超值概 率/%	重现期/a	$Q/$ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	超值概率 /%	相当于年最值系列				
					超值概率/%	重现期/a			
314	5	20	53 988	1.34	2.0	50	0.937	1.51	1.33
314	5	20	46 716	1.93	5.0	20	0.932	2.17	1.92
314	5	20	41 346	2.61	10.0	10	0.925	2.93	2.59
314	5	20	35 967	3.67	20.0	5	0.915	4.12	3.65
314	5	20	32 760	4.61	33.3	3	0.906	5.17	4.58
314	5	20	29 610	5.88	43.0	2.3	0.894	6.58	5.84
314	5	20	28 249	6.57	50.0	2	0.888	7.35	6.53
314	5	20	23 758	9.86	75.0	1.33	0.857	10.99	9.80
314	5	20	20 577	13.70	90.0	1.11	0.821	15.21	13.62
314	5	20	18 960	16.40	95.0	1.05	0.795	18.15	16.31
270	10	10	53 988	1.34	2.0	50	0.888	1.50	1.32
270	10	10	46 716	1.93	5.0	20	0.883	2.16	1.90
270	10	10	41 346	2.61	10.0	10	0.877	2.92	2.58
270	10	10	35 967	3.67	20.0	5	0.867	4.10	3.62
270	10	10	32 760	4.61	33.3	3	0.859	5.14	4.55
270	10	10	29 610	5.88	43.0	2.3	0.848	6.55	5.81
270	10	10	28 249	6.57	50.0	2	0.842	7.31	6.49
270	10	10	23 758	9.86	75.0	1.33	0.812	10.93	9.74
270	10	10	20 577	13.70	90.0	1.11	0.778	15.13	13.54
270	10	10	18 960	16.40	95.0	1.05	0.754	18.06	16.22

量 Q 的联合分布 $F(h, q)$ 为

$$F(h, q) = \frac{F_H(h)F_Q(q)}{1 - 0.134(1 - F_H(h))(1 - F_Q(q))} \quad (4)$$

对中珠联围年最大 1 d 面暴雨,取重现期为 20 a、10 a;对西江马口站洪水,取 50 年一遇、20 年一遇、10 年一遇、5 年一遇、3 年一遇、多年平均、2 年一遇以及频率分别为 75%、90%、95% 等各标准的年最大日均洪水。对以中珠联围年最大 1 d 面暴雨和西江马口站年最大日均洪水任一组合,先由马口站年最大日均流量求出对应于相应洪水流量系列频率曲线的频率,然后由联合分布函数(式(4))求得其联合分布概率,最后由式(2)和式(3)计算其遭遇风险率和组合风险率。计算成果见表 4。

4 结 语

本文提出的涝区暴雨与承泄区上游洪水遭遇规律分析方法适用于所有感潮地区。上游洪水会抬高承泄区潮位,但洪水对高潮位的影响从上游到河口逐渐减弱,而对低潮位的影响始终比较显著,这对利用闸门抢排涝水非常不利,此正是感潮地区治涝规划设计需要分析涝区暴雨与承泄区上游洪水遭遇情况的原因。本研究中,涝区暴雨是基于年最大值选样,相应地,联合观测系列是基于年最大暴雨和相应上游洪水流量,这种选样方法会遗漏掉一些暴雨及暴雨与洪水的遭遇信息,有待进一步与基于超阈值选样的雨洪遭遇情况进行对比分析。

参考文献:

- [1] 刘曾美,吴俊校,肖素芬.感潮地区排涝分析计算方法和思路研究[J].人民珠江,2009,30(5):8-11. (LIU Zengmei, WU Junxiao, XIAO Sufen. Study on drainage from waterlogged land in tide-intrusion area[J]. Pearl River, 2009, (5): 8-11. (in Chinese))
- [2] 童汉毅,赵明登,槐文信,等.洪潮遭遇情况的水动力学计算[J].武汉水利电力大学学报,2000,33(5):11-15. (TONG Hanyi, ZAO Mingdeng, HUAI Wenxin, et al. Hydrodynamic calculation for flood meeting with tide[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, 2000, 33(5): 11-15. (in Chinese))
- [3] 刘曾美.中山市坦洲镇水利规划[R].广州:华南理工大学,2014.
- [4] 陈立华,滕翔,潘子豪,等.西江流域梧州站干支流洪水组成及遭遇规律分析[J].水文,2019,39(6):80-84. (CHEN Lihua, TENG Xiang, PAN Zihao, et al. Composition and encountering law of floods at Wuzhou Station from main Stream and tributaries in Xijiang River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(6): 80-84. (in Chinese))
- [5] 高慧琴,代健,沈艳,等.西江流域洪水组成与遭遇分析[J].人民珠江,2017,38(7):18-21. (GAO Huiqin, DAI Jian, SHEN Yan, et al. Analysis of the flood composition and flood occurrence in Xijiang River[J]. Pearl River, 2017, 38(7): 18-21. (in Chinese))
- [6] 朱龙腾,刘友春,闫芳阶,等.南四湖流域洪水遭遇分析研究[J].海洋湖沼通报,2015(1):149-154. (ZHU Longteng, LIU Youcun, YAN Fangjie, et al. Flood coincidence probability analysis for Nansi Lake valley[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(1): 149-154. (in Chinese))
- [7] 刘曾美,陈子燊.区间暴雨和外江洪水位遭遇组合的风险[J].水科学进展,2009,20(5):619-625. (LIU Zengmei, CHEN Zishen. Risk study of the bivariate encounter of interzone rainstorm and flood level of the outer river[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 619-625. (in Chinese))
- [8] 曾明,张雨凤,李琼芳,等.上海市不同历时暴雨组合概率研究[J].水资源保护,2015,31(4):82-86. (ZENG Ming, ZHANG Yufeng, LI Qiongfang, et al. Study on probability for rainstorm combinations during different durations in Shanghai City[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(4): 82-86. (in Chinese))
- [9] 谢华,罗强,黄介生.基于三维 copula 函数的多水文区丰枯遭遇分析[J].水科学进展,2012,23(2):186-193. (XIE Hua, LUO Qiang, HUANG Jiesheng. Synchronous asynchronous encounter analysis of multiple hydrologic regions based on 3 D copula function[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 186-193. (in Chinese))
- [10] 吕振豫,穆建新.基于 Copula 函数的流域内降雨丰枯遭遇研究[J].水资源保护,2016,32(6):62-69. (LYU Zhenyu, MU Jianxin. Study on wetness-dryness encountering probability of basin precipitation based on Copula function[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 62-69. (in Chinese))
- [11] 刘曾美,覃光华,陈子燊,等.感潮河段水位与上游洪水和河口潮位的关联性研究[J].水利学报,2013,44(11):1278-1285. (LIU Zengmei, QIN Guanghua, CHEN Zishen, et al. Study on the correlation of the water level of the tidal river with upstream flood and estuary tide level[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(11): 1278-1285. (in Chinese))
- [12] 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))

(下转第 107 页)

- [18] 张焕昭,韩军利,唐依伟,等. 门限自回归模型在水稻需水量预测中的应用[J]. 黑龙江水专学报,2003(2):15-17. (ZHANG Huanzhao, HAN Junli, TANG Yiwei, et al. Application on self-exciting threshold auto-regressive model to forecast quantity of water irrigation requirement for rice[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College,2003(2):15-17. (in Chinese))
- [19] 李晓英,苏志伟,周华,等. 基于主成分分析的 GA-BP 模型在城市需水预测中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(6):39-44. (LI Xiaoying, SU Zhiwei, ZHOU Hua, et al. Application of GA-BP model based on principal component analysis to urban water demand prediction[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(6):39-44. (in Chinese))
- [20] 臧冬伟,陆宝宏,朱从飞,等. 基于灰色关联分析的 GA-BP 网络需水预测模型研究[J]. 水电能源科学,2015,33(7):39-42. (ZANG Dongwei, LU Baohong, ZHU Congfei, et al. Study of GA-BP neural network for water requirement prediction based on gray correlation analysis [J]. Water Resources and Power,2015,33(7):39-42. (in Chinese))
- [21] 蒋白懿,牟天蔚,王玲萍. 灰色遗传神经网络模型对居民年需水量预测[J]. 给水排水,2018,54(1):137-142. (JIANG Baiyi, MOU Tianwei, WANG Lingping. Annual water demand forecast based on the model of grey neural network[J]. Water & Wastewater Engineering,2018,54(1):137-142. (in Chinese))
- [22] 向宇,吴琴. 改进的灰色预测模型在全国用水量预测中的应用[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版),2015,33(1):25-30. (XIANG Yu, WU Qin. Application of the improved gray prediction model to predicting the national water consumption [J]. Journal of Hubei University for Nationalities(Natural Science Edition),2015,33(1):25-30. (in Chinese))
- [23] 杜迎欣,曹小兵,李琛,等. 基于遗传算法的城市用水量灰色预测模型研究:以秦皇岛市引青济秦工程为例[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(3):129-132. (DU Yingxin, CAO Xiaobing, LI Chen, et al. Research on model of gray prediction of urban water demand based on genetic algorithm: taking project of water diversion from Qinglong River to Qinhuangdao for example [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2014,25(3):129-132. (in Chinese))
- [24] 王勤勤,刘俊国,赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究[J]. 水资源保护,2018,34(2):22-27. (WANG Qinqin, LIU Junguo, ZHAO Dandan. Study on water footprint of main crop production in Jing-Jin-Ji Region[J]. Water Resources Protection,2018,34(2):22-27. (in Chinese))
- [25] 郝光玲,王烜,罗阳,等. 基于改进的综合评价模型的北京市水资源短缺风险评价[J]. 水资源保护,2017,33(6):27-31. (HAO Guangling, WANG Xuan, LUO Yang, et al. Assessment of water shortage risk in Beijing based on improved comprehensive evaluation model [J]. Water Resources Protection,2017,33(6):27-31. (in Chinese))
- (收稿日期:2019-10-19 编辑:王 芳)

(上接第 94 页)

- [13] 刘曾美,冯斯安,蓝福鹏,等. 基于流域洪水危险分析的 社工坑整治方案[J]. 水资源保护,2018,34(6):38-43. (LIU Zengmei, FENG Sian, LAN Fupeng, et al. Regulation scheme of Shengong River based on watershed flood hazard analysis [J]. Water Resources Protection,2018,34(6):38-43. (in Chinese))
- [14] PINYA M A S, MADSEN H, ROSBJERG D. Assessment of the risk of inland flooding in a tidal sluice regulated catchment using multivariate statistical techniques [J]. Physics and Chemistry of the Earth,2009,34:662-669.
- [15] 刘曾美,郑志勤,陈斯达,等. 南方感潮地区水库的挖潜改造[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):122-127. (LIU Zengmei, ZHENG Zhiqin, CHEN Sida, et al. Study on unearthing and developing the potentialities of a reservoir for the flood detention and storage in the southern tidal area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(2):122-127. (in Chinese))
- [16] 金光炎. 广义极值分布及其在水文中的应用[J]. 水文,1998(2):9-15. (JIN Guangyan. General extreme value distribution and its application to hydrology [J]. Journal of China Hydrology,1998(2):9-15. (in Chinese))
- [17] NELSEN R B. An introduction to copulas [M]. New York: Springer-Verlag,1999.
- [18] SALVADORI G, De MICHELE C. Frequency analysis via copulas: theoretical aspects and applications to hydrological events [J]. Water Resource Research,2004,40:1-17.
- [19] SALVADORI G, DE MICHELE C. Multivariate multiparameter extreme value models and return periods: a copula approach [J]. Water Resource Research,2010,46:1-11.
- [20] 栗晓玲,梁笋. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护,2019,35(4):17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area [J]. Water Resources Protection,2019,35(4):17-23. (in Chinese))
- [21] SALVADORI G, DURANTE F, De MICHELE C. A multivariate copula-based framework for dealing with hazard scenarios and failure probabilities [J]. Water Resource Research,2016,52(5):3701-3721.
- (收稿日期:2020-04-01 编辑:彭桃英)