

湘江流域设计洪水地区组成方法研究

陈 华¹, 栗 飞^{1,2}, 王金星³, 肖 义⁴

(1.武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072;

2.中工武大设计研究有限公司,湖北 武汉 430072;

3.水利部水文情报预报中心,北京 100053; 4.湖南省水利厅,湖南 长沙 410007)

摘 要:采用传统的同频率地区组成方法、基于 copula 函数的条件期望地区组成方法和最可能地区组成方法,对湘江流域洪水地区组成拟定多种设计洪水地区组成方案进行研究,经过各方案成果对比分析,推荐采用条件期望地区组成方案,为湘江流域水利水电工程和防洪系统工程的建设提供设计依据。

关键词:湘江流域;设计洪水;地区组成;Copula 函数

中图分类号:TV211.2

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)02-0055-05

1 引言

洪水地区组成是大中型水利水电工程、防洪系统工程设计洪水计算的重要内容,它对流域梯级开发和工程规模的确定具有较大的影响。常用的洪水地区组成分析方法有地区组合法(典型年法和同频率法)、随机模拟法和频率组合法^[1-4]。随机模拟法难以保证模拟序列统计特征的一致性,频率组合法往往会受限于联合概率分布函数求解困难,另外数据离散过程中常会出现信息失真现象。同频率法目前应用最为广泛,但是同频率地区组成人为假定下游断面与上游来水或区间来水同频率,没有考虑洪水的空间相关性。

联合分布模拟技术的不断发展,尤其是近年来 Copula 函数已在水文频率分析计算、水文随机模拟和水文事件遭遇等水文领域成功应用^[2-4],展示出巨大的优势。Zhang 和 Singh^[5-6](2006,2007)先后构造了洪峰、洪量和历时两两之间及三者的联合分布,并推求相应的条件重现期。张涛等^[7](2008)应用 Copula 函数构造了洪峰和历时的联合分布,采用联合随机抽样的方法进行大样本洪水过程的随机模拟。熊立华等^[8](2005)应用 Copula 函数建立同一河流上相邻两个站点的年最大洪水联合分布,进行洪水遭遇组合分析。闫宝伟等^[9]应用 Copula 函数构造了上游断面与区间洪水的联合分布,推导出两种具有代表性的设计洪水地区组成,为

设计洪水地区组成分析计算提供了一条新途径。栗飞等^[10]在边缘分布中加入历史特大洪水信息推求频率曲线参数,推求考虑历史洪水资料信息的联合分布,得到改进的条件期望地区组合法和最可能地区组合法。

湘江是湖南省最大的河流,流域面积 $9.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,湖南境内流域面积 $8.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域内多年平均降雨量达 1 460mm,多年平均径流量 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。流域内水系发育,衡阳至湘潭站之间有洙水、渌水和涟水等支流,各支流上建有一些重要的大型水库。因此分析该地区的设计洪水地区组成,对于该地区的水资源综合利用有重要意义,本文通过拟定多个设计洪水的地区组成方案或方法,通过比较研究,给出推荐方案。湘江流域示意图见图 1。



图 1 湘江流域示意图

Fig.1 The Xiangjiang River basin

收稿日期:2013-03-24

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973 计划)(2010CB428405);国家自然科学基金项目(51079100)

作者简介:陈华(1977-),男,福建建瓯人,副教授,主要从事水文水资源研究。E-mail: chua@whu.edu.cn

2 方法原理

本文采用上游和区间的长系列连续洪水资料推求联合分布参数,边缘分布采用 P- 型分布,应用条件期望地区组合法和最可能地区组合法,建立研究区基于 Copula 函数上游洪水和区间洪水的联合分布。如图 1 所示上游控制站为衡阳站,下游控制站为湘潭站,区间主要考虑支流洙水、渌水和涟水以及区间面积。通过独立性假设检验,在显著性水平 $\alpha=0.05$ 上,上下游和区间支流洪水序列满足独立性同分布要求。

2.1 联合分布

Copula 函数可分为椭圆型、Archimedean 型和二次型三类,其中 Archimedean Copula 函数应用最为广泛。Gumbel-Hougaard (GH) Copula 函数是 Archimedean Copulas 函数的一种,比较适用于构造如洪峰和洪量、洪量与洪水历时等变量相互之间存在高度正相关性的联合分布^[5]。因此本文采用 GH Copula 函数构造上游洪水和区间洪水的联合分布。GH Copula 函数的表达式为如下:

$$C(u, v) = \exp\{-[(-\ln u)^\theta + (-\ln v)^\theta]^{1/\theta}\} \quad \theta \geq 1 \quad (1)$$

其密度函数为:

$$c(u, v) = C(u, v) \frac{(\ln u \ln v)^{\theta-1}}{uv} \{(\theta-1)[- \ln C(u, v)]^{1-2\theta} + [- \ln C(u, v)]^{2-2\theta}\} \quad (2)$$

式中: $u=F_X(x)$, $v=F_Y(y)$ 分别为随机变量 X 和 Y 的边缘分布。参数 θ 与 Kendall 秩相关系数 τ 的关系为 $\theta=1/(1-\tau)$ 。

2.2 边缘分布

我国设计洪水采用 P- 型分布,其概率密度函数为^[11]:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (3)$$

式中: α 、 β 、 a_0 分别为 P- 型分布的形状、尺度和位置参数。这三个参数与总体样本的三个统计参数 \bar{x} 、 C_v 和 C_s 可以相互推求。通过目估适线对 C_s 值进行调整确定最佳的拟合曲线。

2.3 条件期望和最可能地区组成

当上游断面(或区间)出现设计洪量 x_p 时,区间(或上游断面)所对应的洪量 y 的取值符合一个条件概率分布函数 $F_{Y|X(y)}$,引入上述 Copula 函数对其进行推求,即得到一种条件期望地区组成^[9]。条件期望地区组成代表着一种平均状况,它考虑了上游断面与区间洪

水的空间相关性,具有一定的统计基础。

当下游断面发生设计洪水 z_p 时,求解上游断面洪水 x 和区间洪水 y 在满足 $x+y=z_p$ 条件下概率密度函数 $f(x, y)$ 的最大值,即为上游断面洪水和区间洪水的最可能地区组成^[9]。最可能地区组成更是严格按照数学概念推导而来,代表一种最可能出现的地区组成情况。

3 设计洪水地区组成方案拟定

以下分别为本文根据上述几种设计洪水地区组成方法拟定的五种洪水地区组成方案:

(1) 根据条件期望地区组成方法

拟定了以下两种洪水地区组成方案: ①条件期望地区组成方案,以衡阳站断面为主,区间相应的洪水组成,即衡阳站断面为设计值,区间为相应的期望值; ②条件期望地区组成方案,以区间为主,上游衡阳站断面相应的洪水组成,即区间为设计值,衡阳站断面为相应的期望值。

(2) 根据最可能洪水地区组成方法

拟定了一种衡阳站断面洪水和区间洪水的最可能洪水地区组成方案。

(3) 根据规范推荐的同频率地区组合法

拟定了两种洪水地区组成方案: ①同频率地区组成方案,当下游湘潭站断面发生设计频率的洪水时,上游衡阳站断面也发生同频率洪水,而区间发生相应的洪水; ②同频率地区组成方案,当下游湘潭站断面发生设计频率的洪水时,区间也发生同频率洪水,而上游衡阳站断面发生相应的洪水。

4 湘潭站分期设计洪水地区组成计算结果

应用以上五种洪水地区组成方案,分别计算湘潭站 1 日洪量的设计洪水地区组成。区间洪水的计算,采用以下两种方式: ①湘潭站长系列流量过程减去衡阳站长系列流量过程得到; ②上下游区间的湘乡、大西滩和甘溪三站流量之和乘以三站控制流域面积与衡阳-湘潭区间面积比得到。

4.1 参数估计及其检验结果

4.1.1 联合分布参数估计及拟合优度检验成果

采用上述方式①推求区间洪水,得到区间 1959~2008 年的 1 日洪量系列,建立衡阳站和区间洪量的 GH Copula 联合分布,参数估计和拟合优度检验成果见表 1, K_c-K_e 关系见图 2。采用上述方式②推求区间洪水,得到区间 1969~2008 年的 1 日洪量系列,建立

衡阳站和区间洪量的 GH Copula 联合分布, 参数估计和拟合度检验成果见表 1, K_c-K_e 关系图见图 3。本文采用离差平方和准则法 (OLS) 和 AIC 信息准则法对 GH Copula 函数的参数估计结果进行拟合优度检验, 由图 2 和图 3 可以比较直观地看出, GH Copula 函数参数估计的拟合情况良好。

表 1 GH Copula 函数的参数估计及拟合优度检验指标

Table 1 The estimated parameters and fit goodness of GH Copula function

区间洪水计算方法	参数估计值	OLS	AIC
方式①	$\theta=1.1321$	0.0319	-273.57
方式②	$\theta=1.5930$	0.0382	-324.40

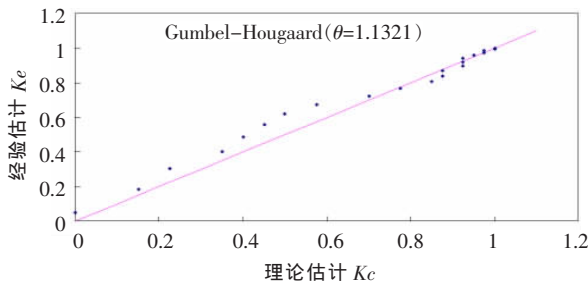


图 2 K_c-K_e 关系图(方式①)

Fig.2 Q-Q plot of K_c-K_e (Scheme ①)

4.1.2 边缘分布参数估计结果及拟合度检验成果

采用线性矩法估算衡阳站和区间的 P- 型分布

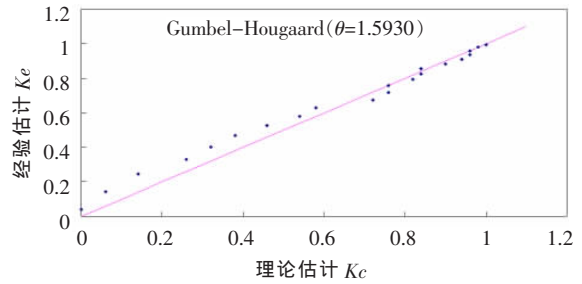


图 3 K_c-K_e 关系图(方式②)

Fig.3 Q-Q plot of K_c-K_e (Scheme ②)

参数, 采用最小二乘法检验参数估计的拟合程度, 参数估计结果及相应的拟合度值见表 2。

表 2 边缘分布参数估计成果表

Table 2 The estimated parameters of the margin distribution

区间洪水计算方法	控制站	α	β	γ	拟合度值
方式①	衡阳站	8.65	0.45	0	0.9798
	区间	8.16	0.63	0	0.9825
方式②	衡阳站	8.16	0.45	0	0.9770
	区间	11.1	0.72	0	0.9719

4.2 设计洪水计算结果分析

采用方式①和方式②推求区间洪水, 采用 GH Copula 函数建立衡阳站和区间 1 日洪量的联合分布, 得到设计洪水地区组成的计算结果分别见表 3 和表 4。

由表 3 和表 4 的计算结果可见, 按照同频率地区

表 3 1 日洪水地区组成结果表(方式①)

单位: 10^8m^3

Table 3 The results of local flood composition (Scheme ①) (10^8m^3)

	设计频率	0.1%	0.2%	1%	2%	5%	10%	20%
湘潭站	设计值	23.47	22.48	20.00	18.82	17.11	15.65	13.95
条件期望	衡阳站	15.60	14.92	13.18	12.32	11.05	9.94	8.61
地区组成	区间	7.87	7.56	6.82	6.50	6.06	5.71	5.34
	衡阳站比例/%	66.5	66.4	65.9	65.5	64.6	63.5	61.7
条件期望	衡阳站	14.09	13.45	11.90	11.19	10.21	9.42	8.56
地区组成	区间	9.39	9.03	8.10	7.63	6.90	6.22	5.39
	衡阳站比例/%	60.0	59.8	59.5	59.5	59.7	60.2	61.4
最可能	衡阳站	15.06	14.61	13.28	12.50	11.18	10.00	8.65
地区组成	区间	8.41	7.87	6.72	6.32	5.92	5.64	5.30
	衡阳站比例/%	64.2	65.0	66.4	66.4	65.3	63.9	62.0
同频率	衡阳站	21.87	20.70	17.85	16.54	14.70	13.17	11.46
地区组成	区间	1.60	1.78	2.15	2.28	2.41	2.48	2.49
	衡阳站比例/%	93.2	92.1	89.3	87.9	85.9	84.2	82.2
同频率	衡阳站	11.31	10.90	9.84	9.32	8.55	7.87	7.06
地区组成	区间	12.16	11.58	10.16	9.50	8.56	7.78	6.89
	衡阳站比例/%	48.2	48.5	49.2	49.5	50.0	50.3	50.6

表4 1日洪水地区组成结果表(方式②)
Table 4 The results of local flood composition (Scheme ②) (10^8m^3)

单位: 10^8m^3

湘潭站	设计频率	0.10%	0.20%	1%	2%	5%	10%	20%
	设计值	23.47	22.48	20.00	18.82	17.11	15.65	13.95
条件期望 地区组成	衡阳站	15.90	15.14	13.13	12.14	10.66	9.37	7.83
	区间	7.57	7.34	6.87	6.68	6.45	6.28	6.11
	衡阳站比例/%	67.8	67.3	65.7	64.5	62.3	59.8	56.2
条件期望 地区组成	衡阳站	11.25	10.88	10.06	9.72	9.29	8.97	8.65
	区间	12.22	11.60	9.94	9.10	7.82	6.68	5.29
	衡阳站比例/%	47.9	48.4	50.3	51.6	54.3	57.3	62.0
最可能 地区组成	衡阳站	13.26	12.78	11.8	11.32	10.41	9.48	8.34
	区间	10.21	9.7	8.2	7.5	6.7	6.16	5.61
	衡阳站比例/%	56.5	56.9	59.0	60.1	60.8	60.6	59.8
同频率 地区组成	衡阳站	21.87	20.70	17.85	16.54	14.70	13.17	11.46
	区间	1.60	1.78	2.15	2.28	2.41	2.48	2.49
	衡阳站比例/%	93.2	92.1	89.3	87.9	85.9	84.2	82.2
同频率 地区组成	衡阳站	8.08	7.91	7.43	7.18	6.77	6.38	5.88
	区间	15.39	14.57	12.57	11.64	10.34	9.27	8.07
	衡阳站比例/%	34.4	35.2	37.1	38.1	39.6	40.7	42.1

组成法拟定的两种洪水地区组成方案结果差别十分明显。这是由于同频率地区组成法人为的假定下游断面设计洪水与上游或是区间之一的洪水同频率,而未考虑洪水的空间相关程度。事实上,当下游断面发生高频率洪水时,上游断面和区间的洪水频率往往较低,两处洪水过程,特别是洪峰出现时间的遭遇,是下游断面洪水频率过高的主要原因。同频率地区组成法进行主观假定,很容易造成一方偏大,另一方偏小的现象。

表4中同频率地区组成法的计算结果表明:假定区间与湘潭站发生同频率洪水时,衡阳站1日洪量占湘潭站的比例仅为34.4%;假定衡阳站与湘潭站发生同频率洪水时,衡阳站1日洪量占湘潭站的比例达到93.2%。而衡阳站控制的流域面积占湘潭站以上流域面积的比例为64%,两种假设的计算结果相差甚远,具有明显的不合理性。因此,同频率洪水地区组成方法虽然原理简单,且目前在工程设计中被较为广泛地使用,但该方法未考虑各区域洪水的相关性,在一些流域的应用效果并不理想。

对比条件期望地区组成方法和最可能地区组成方法在表3和表4的计算成果,结果表明:当采用不同的方式计算区间洪水时,条件期望地区组成方案的计算成果最为接近,且随着洪水量级的增大,衡阳站洪量所占的比例均有上升的趋势,规律性十分明显。因此,

条件期望地区组成方案受区间洪水计算方式的影响最小,就湘潭站洪水地区组成分析而言,方案应用的稳定性最强。

表4中五种方案计算结果的差异性较表3更为明显。这是由于表4在计算区间洪水时采用了湘乡、大西滩和甘溪三站的流量资料,但上述三站控制的流域面积占衡阳-湘潭区间流域面积的比例不到65%,河道外取水、水库调蓄和地形差异等诸多因素均未被考虑,仅以面积比得到的区间流量过程与实际情况存在一定的偏差,且与上游衡阳站的相关关系不强。因此,区间流量过程推荐采用湘潭站径流过程减去衡阳站得到。

5 结语

本文根据条件期望地区组成方法、最可能地区组成方法和同频率地区组成方法,拟定五种设计洪水地区组成方案,研究了湘江流域湘潭站的设计洪水地区组成问题,结果表明:同频率地区组成方法未考虑洪水的空间相关性,实际应用效果并不理想;条件期望地区组成方法和最可能地区方法采用Copula函数建立上游洪水和区间洪水的联合分布,具有较为严格的数学统计基础,条件期望地区组成方案在湘江流域应用的稳定性最强,将其作为推荐方案;区间流量系列以湘潭站径流过程减去衡阳站得到。

参考文献:

- [1] SL 44-2006, 水利水电工程设计洪水计算规范 [S]. (SL 44-2006, Regulation for Calculating Design Flood for Water Resources and Hydropower Projects [S]. (in Chinese))
- [2] 谢小平, 黄灵芝, 席秋义, 等. 基于 JC 法的设计洪水地区组成研究 [J]. 水力发电学报, 2006,(12):125-129. (XIE Xiaoping, HUANG Lingzhi, XI Qiuyi, et al. Study of flood region composition by JC method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006,(12):125-129. (in Chinese))
- [3] 王占海, 陈元芳, 黄琴, 等. M-Copula 函数在洪水遭遇中的应用研究 [J]. 水电能源科学, 2009,(2):69-73. (WANG Zhanhai, CHEN Yuanfang, HUANG Qin, et al. Application study on M-Copula function in flood encounter [J]. Water Resources and Power, 2009, (2):69-73. (in Chinese))
- [4] 付湘, 王丽萍, 纪昌明. 洪水遭遇组合下防洪区的洪灾风险率估算 [J]. 水电能源科学, 1999,(12):23-26. (FU Xiang, WANG Liping, JI Changming. Estimating flood hazard risk rate of flood control region under flood encountering combination [J]. Hydroelectric Energy, 1999,(12):23-26. (in Chinese))
- [5] Zhang L, Singh V P. Trivariate flood frequency analysis using the Gumbel - Hougaard Copula [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2007, 12(4): 431-439.
- [6] Zhang L, Singh V P. Bivariate flood frequency analysis using the copula method [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(2): 150-164.
- [7] 张涛, 赵春伟, 雒文生. 基于 Copula 函数的洪水过程随机模拟 [J]. 武汉大学学报, 2008, 41 (4):1-4. (ZHANG Tao, ZHAO Chunwei, LUO wensheng. Random simulation of flood hydrographs based on Copula function [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008,41(4):1-4. (in Chinese))
- [8] 熊立华, 郭生练, 肖义, 等. Copula 联结函数在多变量水文频率分析中的应用 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6):16-19. (XIONG Lihua, GUO Shenglian, XIAO Yi, et al. Application of copulas to multivariate hydrological frequency analysis [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005,38(6):16-19. (in Chinese))
- [9] 闫宝伟, 郭生练, 郭靖, 等. 基于 Copula 函数的设计洪水地区组成研究 [J]. 水力发电学报, 2010,(6):125-129. (YAN Baowei, GUO Shenglian, GUO Jing, et al. Regional design flood composition based on Copula function [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010,(6):125-129. (in Chinese))
- [10] 栗飞, 郭生练, 李天元, 等. 不连续序列的设计洪水地区组成方法研究 [J]. 水电能源科学, 2011,29 (5):47-49. (LI Fei, GUO Shenglian, LI Tianyuan, et al. Design flood regional composition methods by considering historical information [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(5):47-49. (in Chinese))
- [11] 郭生练. 设计洪水研究进展与评价 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (GUO Shenglian. Advancement and Assessment of Design Flood [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005. (in Chinese))

Methods for Design Flood Regional Composition for Xiangjiang River Basin

CHEN Hua¹, LI Fei^{1,2}, WANG Jinxing³, XIAO Yi⁴

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. CAMCE WHU Desigh & Research CO.,LTD, Wuhan 430072,China;

3. Hydrological Forecast Center, MWR, Beijing 100053,China;

4. Water Resources Department of Hunan Province, Changsha 410007,China)

Abstract: The research on the flood regional composition of the Xiangjiang River Basin was carried out with different methods, such as the equivalent frequency composition method, conditional expectation regional composition and most likely regional composition methods based on Copula function. Five flood regional composition schemes were worked out. After comparing the results, the conditional expectation regional composition scheme was recommended. The research contributed the basic for water conservancy and hydropower engineering and flood control system construction of the Xiangjiang River Basin.

Key words: Xiangjiang River Basin; design flood; regional composition; Copula function