

黄河宁夏段干支流洪水组成分析

张 妞¹, 廉铁辉², 冯 平¹, 苑希民¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津市引滦工程于桥水库管理处, 天津 301900)

摘 要: 黄河宁夏段干支流洪水特性差异,洪水来量及遭遇组合复杂,再加上汛期青铜峡水库防洪形势严峻,故需要对青铜峡水库入库洪水来源及洪水组成进行分析。基于 Copula 函数构建青铜峡水库上游干支流洪水变量的联合分布,并采用最可能地区组合法计算青铜峡水库上游最可能发生的干支流洪水要素组合。结果表明:青铜峡水库断面设计洪水主要来自上游干流,合理的洪水管理应当考虑支流对青铜峡水库断面影响。通过与同频率地区组合法和典型年实测洪水组成对比分析可知,基于 Frank Copula 函数的最可能组合法能得到更加合理的干支流洪水遭遇组成情况,从而为青铜峡水库断面提供了更加合理的上游洪水组成方案。

关键词: 设计洪水; Copula 函数; 最可能地区组合法; 干支流洪水; 水库安全

中图分类号: TV122

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0158-06

Analysis of flood composition at main stream and tributary in Ningxia section of Yellow river

ZHANG Niu¹, LIAN Tiehui², FENG Ping¹, YUAN Ximin¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Municipal Yuqiao Reservoir, Management Center of Luanhe River Diversion Project, Tianjin 301900, China)

Abstract: Because of the difference of flood characteristics in Mainstream and its tributaries of Ningxia section of the Yellow River, the flood volume and the complex combinations, and the severe flood control situation of Qingtongxia reservoir during flood season, so it is necessary to analyze the sources and combinations of Qingtongxia reservoir inflow floods. The paper built the joint distribution of flood variation in mainstream and its tributaries based on Copula function, and then calculated the composition of the flood elements which were most likely happen in mainstream and its tributaries by the method of the most likely composition. Results show that the design flood in Qingtongxia reservoir section is mostly from the mainstream in upstream section of the Yellow River. It is necessary to consider the influence of tributary on Qingtongxia reservoir section for reasonable flood management. Through comparing the method of the equivalent frequency composition and the measured flood, the result indicated that the situation of flood composition and flood hydrograph derived by method of the most likely composition is more reasonable. So we can gain the reasonable influence by the mainstream and its tributaries to Qingtongxia reservoir, The method can provide a more reasonable scheme of upstream flood composition for Qingtongxia reservoir section.

Key words: design flood; copula function; most likely regional composition; flood of mainstream and its tributaries; reservoir safety

在水文分析计算中,设计断面上游较大的水库或者分洪、滞洪等工程的调蓄作用,对洪水进行了调节,同时改变了天然洪水,此时必须根据调节作用的大小进行合理的分区,并进行各分区设计洪水的计

算,从而完成空间上各部分流域面积上的设计洪水组成情况分析^[1]。洪水地区组成分析方法包括地区组合法、随机模拟法和频率组合法,其中地区组成是常用的方法。根据谭维炎等^[2]的研究,地区组成

收稿日期:2015-09-28; 修回日期:2015-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51179117,51209157)

作者简介:张 妞(1989-),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事水文学及水资源方向研究。

法考虑了所有可能的地区组成及其出现的机遇,由于采用最不利的洪水组成,故出现超过下游断面频率的洪水时仍有可能是安全的,所以从某种程度上采用这种方法防洪断面达不到预定的防洪标准。最合理有效的方法是将各区要素量化并构建各区变量的联合分布,并求出下游设计断面下的最可能地区组成,这样便极大地减小了主观假定带来的误差^[3],从而得到更加合理的洪水组成。然而随着变量的增多、变量的相关性弱及分布的复杂性,构造多变量的联合函数已属不易,再加上要求解多维联合分布,问题变得更复杂。Copula 函数的出现为这些问题的解决提供了突破口^[4-5],使推求更加合理的地区组成成为可能。本文将结合黄河宁夏段干支流洪水的实际情况,采用基于 Copula 函数的最可能组成法进行干支流洪水遭遇下的设计洪水组成分析,为青铜峡水库安全管理和防洪减灾提供依据。

1 研究区域概述

黄河宁夏段自中卫市南长滩入境,至石嘴山市头道坎麻黄沟出境,长 397 km,占黄河全长的 7%。河段内有两个大型水库:青铜峡水库和长山头水库,分别位于黄河干流和支流清水河上,黄河宁夏段水系简图如图 1 所示。青铜峡水库为日调节综合利用水库,水库设计总库容 $6.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于泥沙的淤积,现存库容仅有 $0.56 \times 10^8 \text{ m}^3$,当汛期发生大洪水时,水库防洪安全遭受到巨大威胁,再加上上游干支流洪水特性差异,洪水来量及遭遇组合复杂,故需要对青铜峡水库入库洪水来源及洪水组合进行分析。黄河干流下河沿水文站为宁夏段入境站,集水面积为 $254\ 142 \text{ km}^2$ 。河段内较大的入黄支流有清水河、红柳沟、苦水河。清水河河段距黄河干流最近的水文站为泉眼山水文站,其集水面积为 $14\ 480 \text{ km}^2$;红柳沟河段距黄河干流最近的水文站为鸣沙洲水文站,其集水面积为 $1\ 064 \text{ km}^2$;苦水河集水面积为 $5\ 216 \text{ km}^2$ 。其中干流下河沿集水面积与支流清水河、红柳沟集水面积及苦水河集水面积之比分别为 238: 14: 1: 5,可见宁夏段洪水主要来自黄河上游,支流中对干流流量影响较大的是清水河,红柳沟和苦水河对宁夏段洪水贡献相对较小。因此,在进行宁夏段黄河干支流洪水组成分析时,将仅考虑干流下河沿断面和支流清水河的洪水组成。宁夏段黄河洪水入境水文站为下河沿站,洪水自下河沿至青铜峡演进过程中受到区间降雨、支流来水、灌区引水、气候条件及水库条件等因素的影响,洪峰、洪量

依据洪水量级的不同有了不同程度的衰减^[6]。

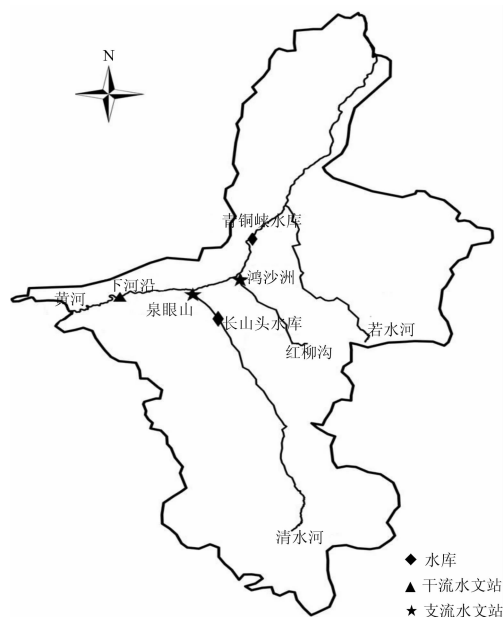


图1 黄河宁夏段水系简图

2012 年宁夏段洪水量级低于 5 年一遇,洪水具有历时长、大流量持续时间长等特点,下河沿至青铜峡河段洪水传播时间约为 22 h,受灌区引水和水库影响,洪峰衰减了 10% ~ 25%,洪量衰减 25%^[7]。1981 年大洪水接近 50 年一遇洪水标准,下河沿至青铜峡河段洪水演进过程中由于洪水峰高量大,灌区引水较少,水库有较大的泄流能力,为了防止水库蓄水造成人造高峰,水库调度基本采用“穿堂过”的原则,下河沿至青铜峡河段洪峰基本无衰减,又由于河道途经沙漠,气候干旱,蒸发渗漏损失大,故洪量有一定的衰减,约 5% 左右。本文在分析青铜峡水库洪水地区组成时,采用坝址断面进行变量分析,并结合洪水量级合理选定洪水组成方案。

2 基于 Copula 函数的干支流洪水组成分析

2.1 Copula 函数及多维联合分布

Copula 是定义域为 $[0,1]$ 均匀分布的多维联合分布函数,它可以将多个随机变量的边缘分布连接来得到他们的联合分布,Joe 和 Nelsen 分别对该方法做了详尽的描述^[8-9],在国内,肖义等对 Copula 函数在多变量水文分析中进行了系统的研究^[10-11]。Sklar 定理使 Copula 函数独立于随机变量的边缘分布,并将联合分布分为边缘分布和相关性结构两个部分来处理^[12]。Copula 联合概率密度分布函数如式(1):

$F(x,y) = C_{\theta}(F_X(x),F_Y(y)) = C_{\theta}(u,v)$ (1)
式中： θ 为 Copula 参数， $u = F_X(x)$ ， $v = F_Y(y)$ ，其中 $F_X(x)$ 、 $F_Y(y)$ 分别为变量 x 和 y 的边缘分布； C_{θ} 为参数 θ 的 Copula 函数，即变量 x 及 y 的联合分布函数 $F(x,y)$ 。

2.2 边缘分布及联合分布参数推求

干流下河沿断面上游天然来水量记为 X ，支流清水河泉眼山断面上游天然来水量记为 Y ，青铜峡断面天然来水量记为 Z ，则可近似处理为 $Z = X + Y$ 。本文选择干支流断面连续洪水资料来推求联合分布的参数和边缘分布的参数。其中边缘分布采用 P - III 分布，由于干流洪水过程线属于矮胖型，洪水持续时间较长，而支流则属于尖瘦型，洪水过程持续时间短，综合干支流洪水水情，故选择干支流断面年最大 1 日洪量序列进行 P - III 曲线的拟合，参数估计结果如表 1 所示。同时利用干支流断面年最大 1 日洪量序列对两者变量相关性进行分析计算，得到干流下河沿断面和支流清水河泉眼山年最大 1 日洪量的 Pearson 相关系数为 0.147，Kendall 相关系数检验值为 0.047，可见，干支流洪水变量的相关性较弱。由于干支流洪水变量的空间相关性是客观存在的，此时若将两变量判定为相互独立是欠妥的。而 Copula 函数能很好地解决变量相关性较弱情况下的联合问题^[13]，这也是本文采用 Copula 构造干支流洪水变量的联合分布的主要原因。Copula 函数随机变量的相关性可以使用 Pearson 线性相关系数和 Kendall 秩相关系数来度量^[10]，即 Kendall 秩相关系数可以由 Copula 联合函数唯一的表示，Copula 函数的参数与 Kendall 秩相关系数的关系表详见表 2。根据两者的关系，则可以估算当干支流洪水变量 Kendall 秩相关系数为 0.047 时不同 Copula 函数类型的参数值 θ ，不同类型 Copula 函数参数值如表 3 所示。

表 1 参数估计结果			
变量	C_V	C_S	C_S/C_V
下河沿(X)	0.48	1.44	3.00
清水河(Y)	1.41	3.52	2.50
青铜峡(Z)	0.49	1.25	2.50

2.3 Copula 模型优选及拟合检验

不同的 Copula 函数在描述相关模式方面有显著差异，考虑选取阿基米德型 Copula 联结函数中的 Frank Copula、Clayton Copula、Gumbel - Hougaard

Copula 等函数构造干支流洪水变量的联合分布，为了进行 Copula 模型的选择及检验选定的 Copula 函数在多变量频率分析中的拟合精度，需要计算观测点对 (x_i, y_i) 的经验累积频率。设 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{58}, y_{58})$ 为干支流洪量的联合观测值组合，分别将两变量观测值按升序排列，构造干支流年最大 1 日洪量的二维表，则表中第 i 行和第 j 列对应的元素为样本联合观测值 (x_i, y_j) 发生的次数 n_{ij} ，式 (2) 为 (x_i, y_j) 的联合经验累积频率公式^[14]，故可得到干支流年最大 1 日洪量序列的联合经验累积频率。

$$P_{ei}(x_i,y_i) = P(X \leq x_i,Y \leq y_j)$$
$$= \frac{\sum_{m=1}^i \sum_{k=1}^j n_{mk} - 0.44}{N + 0.12}$$

(2)

式中： P_{ei} 为联合经验累积频率； N 为样本长度； i, j 分别为联合观测值组合行列数。

表 2 Copula 函数的参数(θ)和 Kendall 秩相关系数(τ)关系	
Copula 函数类型	τ 和 θ 的关系
Gumbel-Hougaard Copula	$\tau = 1 - \frac{1}{\theta} \quad (\theta \geq 1)$
Clayton Copula	$\tau = \frac{\theta}{\theta + 2} \quad (\theta > 0)$
Frank Copula	$\tau = 1 + \frac{4}{\theta} \left[\frac{1}{\theta} \int_0^{\theta} \frac{t}{e^t - 1} dt - 1 \right] \quad (\theta \in R)$

表 3 不同类型 Copula 函数的参数值(θ)	
Copula 函数类型	θ 值
Gumbel - Hougaard Copula	1.05
Clayton Copula	0.1
Frank Copula	0.42

可以通过绘制干流下河沿和支流清水河洪水变量的联合经验累积频率和理论累积频率的 Q - Q 图进行优选及检验，若点距在 45° 直线附近分布均匀，则拟合良好，图 2 为经验联合分布与理论联合分布的 Q - Q 图，如图中可见，均拟合较好。

另外，还可以采用 AIC 法进行 Copula 模型的优选，其中式 (3) 为残差平方和 (RSS) 公式，式 (4) 为离差平方和 (OLS) 公式，式 (5) 为赤池信息准则 (AIC) 的计算公式，可选取残差平方和 (RSS)、离差平方和 (OLS) 及赤池信息准则 (AIC) 最小值对应的 Copula 函数类型作为最优的 Copula 函数^[15]。不

同 Copula 函数类型的拟合检验指标值如表 4 所示,可以看出 Frank Copula 函数的 RSS、OLS 及 AIC 值最小,且 Frank Copula 函数理论频率拟合经验点据

的效果如图 3,可见拟合良好,故选择 Frank Copula 函数作为最优 Copula 函数进行洪水地区组成计算。

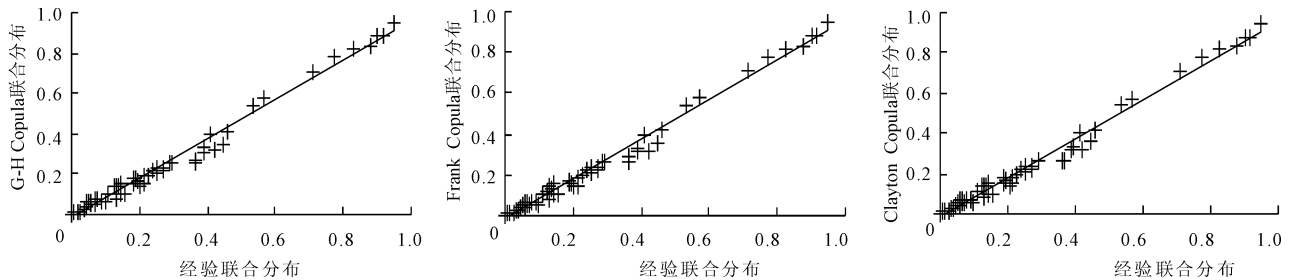


图 2 经验联合分布与理论联合分布的 Q-Q 图

$$RSS = \sum_{i=1}^N (P_{ei} - P_i)^2 \tag{3}$$

$$OLS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{ei} - P_i)^2} \tag{4}$$

$$AIC = N \ln\left(\frac{RSS}{N}\right) + 2k \tag{5}$$

式中: P_i 和 P_{ei} 分别为联合分布的累积理论和经验频率; N 为样本长度; k 为待估参数的个数。

表 4 不同 Copula 函数类型的拟合检验指标值

Copula 类型	残差平方和 (RSS)	离差平方和 (OLS)	赤池信息准则 (AIC)
Gumbel Houghaard Copula	0.0875	0.0388	-161.64
Clayton Copula	0.0864	0.0386	-161.95
Frank Copula	0.0798	0.0371	-163.94

也是有差异的。选择青铜峡坝址作为设计断面,对不同洪水量级下河沿至青铜峡河段洪量损失进行合理的还原,从而满足水量平衡。当青铜峡坝址断面发生设计洪水时,考虑河段损失并对设计值进行还原得到 z_p ,并根据建立的联合概率密度函数推求概率最大时干支流洪量组成,从而可以得到满足下游设计断面防洪标准的干支流最可能发生的洪水要素组合,即求解在满足 $x + y = z_p$ 的条件下使概率密度函数 $f(x, y)$ 达到最大时的 x 和 y 值。将 $y = z_p - x$ 代入干支流变量联合概率密度函数 $f(x, y)$ 中,可得到仅含变量 x 的函数 $f(x, z_p - x)$ (如式 6 所示)^[16]。使用 R 软件求解一维变量函数(式 6)的极大值点 x ,则计算得到的 x 和 $z_p - x$ 即为干支流断面最可能洪水要素组合。

$$f(x, z_p - x) = c(F_X(x), F_Y(y))f_X(x)f_Y(z_p - x) \tag{6}$$

由于青铜峡水库采用百年一遇设计洪水、千年一遇校核洪水标准,故青铜峡水库坝址断面设计洪水的频率可选择 0.1%,1%,2%,5% 及 20%,并根据最可能地区组成法计算出在不同设计频率下干支流设计断面的年最大 1 日洪量组成情况,基于 Frank Copula 函数的洪水地区组成结果如表 5 所示。从表 5 可以看出:

- (1)在青铜峡断面 5 年一遇以上设计洪水中,干流下河沿断面占了 91.54% ~ 92.46% 的比例,而支流清水河仅占了 7.54% ~ 8.46%,说明上游干流来水是青铜峡断面发生设计洪水的主要来源。
- (2)对青铜峡 1000 年一遇以下设计洪水,随着设计洪水量级的增大,干支流洪量组成增大,而干流来水量占洪水总量的比例逐渐降低,支流来水量占总量的比例相应逐渐增大,规律性十分明显,也符合黄河宁夏段干流和清水河支流洪水的实际情况。清

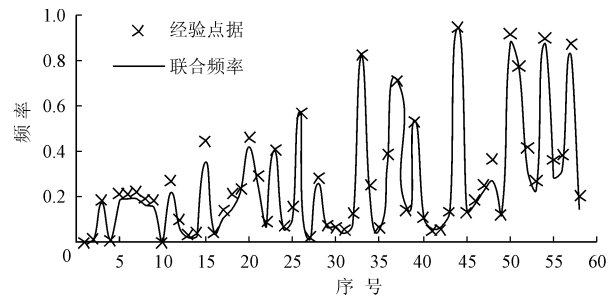


图 3 Frank Copula 函数理论频率拟合经验点据的效果

2.4 最可能地区组成法进行干支流洪水组成计算
黄河宁夏河段的洪水主要来自兰州以上,由降雨形成,大洪水多发生在 7 月或 9 月,尤以 9 月份居多,洪量大,峰型较胖,洪水涨落平缓,历时长。洪水演进过程受灌区引排水、河滩地、水利工程及区间汇流等因素影响,不同河段呈现出不同的洪水过程,又由于不同洪水量级下影响因子的比重也不同,故即使是在同一河段,不同的洪水量级下河段洪水过程

水河距青铜峡水库很近,且清水河水少沙多,来水量年际变化大,年内分配不均,又加上长山头水库的淤积,洪水暴涨,来自黄土高原的清水河含沙量高,其汇入更容易导致青铜峡断面洪水暴涨,故随着洪水

量级的增大,支流占总量比例逐渐增大。由此可以看出,在进行青铜峡水库入库设计洪水计算时,忽略干支流洪水遭遇是不合理的,必须考虑支流对青铜峡入库洪水的影响。

表 5 基于 Frank Copula 的洪水地区组成结果 10⁴ m³, %

设计频率	青铜峡坝址实测值	下游断面设计还原值	干流组成	支流组成	干流组成比例	支流组成比例
0.1	73010.25	76852.89	70353.75	6499.14	91.54	8.46
1	55155.43	58058.35	53212	4846.35	91.65	8.35
2	49556.40	52164.63	47833	4331.63	91.70	8.30
5	41898.62	44103.81	40459	3644.81	91.74	8.26
20	29349.30	34528.59	31924	2604.59	92.46	7.54

2.5 合理性分析

选取典型实测洪水(2012 年和 1981 年),并对比同频率组成分析和基于 Copula 函数的最可能组成分析得到的组成成果进行合理性分析。由于研究区域支流控制面积相对较小,干流上下游断面相关

性较高,下游径流主要是由上游断面径流形成,因此选定上游干流断面与下游设计断面同频率,支流断面发生相应洪水的同频率地区组成法方案进行洪水组成分析。干支流年最大 1 日洪量组成成果对比如表 6 所示。

表 6 年最大 1 日洪量洪水组成成果对比 10⁴ m³

洪水组成	2012 年洪水		1981 年洪水	
	青铜峡坝址实测值	下游设计断面还原值	青铜峡坝址实测值	下游设计断面还原值 1
洪量分配	22445	28955	47866	48891
组成	干流组成	支流组成	干流组成	支流组成
实测值	28685	270	48557	334
最可能地区组成分析	27355	1600	43979	4912
同频率组成分析	23485	5470	48372	519

对小量级的洪水(2012 年洪水为例),由于河段上下游洪量损失较大,故对青铜峡断面进行设计值还原后,使用干流和设计断面同频率组成方案计算得到的支流洪水组成偏大,而基于 Frank Copula 函数计算得到的组成则相对稳定,较合理。1981 年洪水量级接近 50 年一遇,属于大量级洪水,可以看出 Copula 函数计算得到的支流组成较实测洪水和同频率组成法得到结果要大一些,这是由于 Copula 考虑了干支流的空间相关性,在一定程度上提高了支流对下游断面的风险。支流时段汛期入黄量变化如表 7 所示,可以看出支流汛期及年入黄水量有所增加^[6]。黄河宁夏段上游干支流洪水发生时间不同步,且相互交错,这也是导致洪水历时长、大流量持续时间长的主要原因,再加上近年来河道过流能力减弱,洪水行进不畅,出现高水位、大流量、历时长等情况的概率增大,以 2012 年黄河宁夏段洪水水情为

例,虽然洪水量级较小(未超过 5 年一遇),然而卫宁段最高水位与 1981 年大洪水最高水位已相当接近,申滩水文站实测最高水位高于 1981 年大洪水最高水位 0.18m^[7]。可见,适当提高支流设计洪水标准并不是资源的浪费,而是对防洪安全的未雨绸缪,是对水库安全和下游城市安全的一种保障。综合分析可以看出,基于 Frank Copula 函数的洪水组成法得到的干支流遭遇组成情况更加符合宁夏段洪水实际,且合理的洪水管理必须考虑支流对青铜峡水库断面影响。

表 7 支流时段汛期入黄量变化 10⁸ m³

时段	汛期水量	年水量
1961 - 1968	0.930	1.390
1969 - 1986	0.530	0.790
1987 - 2003	0.970	1.280

3 结 论

本文基于 Copula 函数构造干支流洪水变量的联合分布,采用最可能组成方法求得青铜峡断面发生设计洪水时上游干支流洪水遭遇下的洪量组成情况,并对比同频率组成法和实测洪水进行成果合理分析,得到如下结论:

(1)青铜峡断面设计洪水主要来自上游干流,上游支流来水所占比例不大。

(2)随着青铜峡断面设计洪水量级的增大,支流占总量比例逐渐增大,清水河距青铜峡水库很近,又加上长山头水库的淤积,其汇入更容易导致青铜峡断面洪水暴涨,再加上支流汛期入黄量呈增大趋势,故在进行青铜峡入库洪水分析时不能忽略支流对青铜峡断面洪水的影响。

(3)与同频率地区组成法和实际发生的洪水进行比较分析可得,结果基本一致,而 Copula 函数由于考虑了干支流及下游断面的空间相关性,在一定程度上提高了支流对青铜峡断面设计洪水的贡献,故基于 Copula 函数的干支流洪水遭遇组成更加符合宁夏洪水的实际情况。

上游干流来水是青铜峡断面发生设计洪水的主要来源,然而合理的洪水管理必须考虑支流对青铜峡水库断面影响,基于 Copula 函数的洪水组成为青铜峡水库断面提供了更加合理的上游洪水组成方案,从而为水库调度和安全管理提供更加合理有效的依据。

参考文献:

- [1] 刘画眉. 设计洪水地区组成计算方法研究及应用[D]. 武汉:武汉大学,2005.
- [2] 谭维炎,黄守信. 水库下游城市防洪风险的估算[J]. 水利学报,1983,(7):37-40.

- [3] 陈 华,栗 飞,王金星,等. 湘江流域设计洪水地区组成方法研究[J]. 水文,2014,34(2):55-59.
- [4] Favre A C, Adlouni S E, Perreault L, et al. Multivariate hydrological frequency analysis using Copulas [J]. Water Resources Research, 2004, 40(1):290-294.
- [5] Klein B, Pahlow M, Hundedcha Y, et al. Probability Analysis of Hydrological Loads for the design of Flood Control Systems Using Copulas [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014,15(5):360-369.
- [6] 范小黎,师长兴,周园园,等. 黄河宁蒙段洪水过程变化特点[J]. 资源科学,2012,34(1):65-73.
- [7] 王新军,凌虹霞,王永强,等. 黄河宁夏段 2012 年洪水分析[J]. 人民黄河,2014(8):31-33.
- [8] Joe H. Multivariate Models and Dependence Concepts [M]. London:Chapman & Hall, 1997.
- [9] Nelson RB. An introduction to Copulas [M]. New York: Springer, 1999.
- [10] 肖义. 基于 Copula 函数的多变量水文分析计算研究 [D]. 武汉:武汉大学,2007.
- [11] 郭生练,闫宝伟,肖 义,等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. 水文,2008,28(3):1-7.
- [12] Yan J. Enjoy the Joy of Copulas: With a Package copula [J]. Journal of Statistical Software,2007(10):1-21.
- [13] 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.
- [14] Yue S, OuardaT, BobeeB, et al. The Gumbel mixed model for flood frequency analysis [J]. Journal of Hydrology, 1999,226(1-2):88-100.
- [15] Singh V P, Zhang L. Bivariate Flood Frequency Analysis Using the Copula Method [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006,11(2):150-164.
- [16] 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,2010,29(6):60-65.