

Regional Flood Frequency Analysis in the Xiangjiang Basin*

Hua Chen¹, Jiawei He¹, Fei Li², Jinxing Wang³

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²CAMCE WHU Design & Research Co., Ltd, Wuhan

³Hydrological Forecast Center, Ministry of Water Resources, Beijing

Email: chua@whu.edu.cn

Received: Nov. 21st, 2012; revised: Dec. 6th, 2012; accepted: Dec. 25th, 2012

Abstract: Regional frequency analysis (RFA) method is one of the main tools for estimating design floods in ungauged basins. The applicability of RFA was analysed in the Xiangjiang Basin by using annual maximum flood series of five hydrological stations from 1959 to 2005, including Xiangtan, Hengyang, Xiangxiang, Ganxi and Daxitan hydrological stations. The design flood values of Hengyang station were estimated by using RFA and hydrologic analogy method. The results were compared and discussed, which showed that RFA had relatively better precision than others in the estimation of design flood and is more suitable for ungauged basins.

Keywords: Regional Frequency Analysis; Ungauged Basins; Fuzzy Analogy; L-Moments

湘江流域区域洪水频率分析计算*

陈 华¹, 何加伟¹, 栗 飞², 王金星³

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

²中工武大设计研究有限公司, 武汉

³水利部水情报预报中心, 北京

Email: chua@whu.edu.cn

收稿日期: 2012年11月21日; 修回日期: 2012年12月6日; 录用日期: 2012年12月25日

摘 要: 区域洪水频率分析方法是无资料地区设计洪水计算的主要方法之一。在收集湘江流域湘潭、衡阳、湘乡、甘溪和大西滩5个水文站的1959~2005年径流系列资料的基础上, 研究和探讨区域洪水频率分析方法的适用性。通过假设衡阳站为短系列资料, 采用区域频率分析方法估算衡阳站的设计洪水值, 并同与水文比拟法估算得到的衡阳站设计洪水值进行比较。比较结果表明, 用区域频率分析法估算衡阳站设计洪水值的结果较好, 在无资料地区的设计洪水计算有较好的适用性, 可以进一步推广应用。

关键词: 区域频率分析; 无资料地区; 模糊相似选择; 线性矩法

1. 引言

全球许多流域上缺乏水文测站或者水文资料较

*基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973计划)(2010CB428405); 国家自然科学基金重大项目(51190094)。

作者简介: 陈华(1977-), 男, 福建建瓯人, 副教授, 从事水文水资源研究。

短^[1], 加上气候变化和人类活动对下垫面的影响, 使得无资料地区的水文预测将面临着更严峻的形势。目前, 国际水文科学学会(IAHS)、国际人文计划(IHDP)、世界气候研究计划(WCRP)和国际水文计划(IHP)等几个重要的国际研究组织和计划都开始重视无资料地

区的气象和水文研究工作。区域洪水频率分析方法是解决无资料地区设计洪水计算的一个重要途径。对于区域频率分析方法, 国内已展开深入研究工作。周芬等^[2]将区域回归法与基于指标洪水的区域频率分析法进行比较, 认为区域频率分析用于估算无资料地区的设计洪水是合适的。熊立华等^[3]对线性矩法在区域洪水频率分析中的应用进行了讨论, 提倡推广线性矩法在区域洪水频率分析中的应用。陈元芳等^[4]利用 Hosking 所建议的区域水文频率计算方法对长江中下游地区进行频率计算, 为长江中下游地区有关站点的洪水频率计算提供了较为可靠的设计成果。陈永勤等^[5]基于线性矩法对东江流域进行区域枯水频率分析, 指出对数正态分布为最适合东江流域的区域枯水分布。

在收集湘江具有长序列的水文站径流资料的基础上, 通过假定其中某个站为短系列样本资料, 对区域洪水频率分析方法进行研究实现, 并对结果的优劣性进行比较分析。

2. 研究流域与研究方案

2.1. 研究流域

湘江^[6]是长江中游南岸重要支流, 发源于广西东北部兴安、灵川、灌阳、全州等县境内的海洋山, 上游称海洋河, 在湖南省永州市区与潇水汇合, 开始称湘江, 向东流经永州、衡阳、株洲、湘潭、长沙, 至湘阴县入洞庭湖后归长江。干流全长 80 千米, 流域面积 9.32 万 km²。沿途接纳大小支流 1300 多条, 主要支流有潇水、舂陵水、耒水、洙水、蒸水、涟水等。本文以湘江流域为研究流域, 流域上衡阳、湘潭、湘乡、甘溪和大西滩水文站长系列水文资料基本情况见表 1。

2.2. 研究方案

根据湘江流域的资料和测站空间分布情况, 确定区域频率分析方法的对比研究思路如下: 1) 假定衡阳站(即设计站)无实测资料或系列较短, 以湘潭、湘乡、大西滩和甘溪为参证站, 采用区域频率分析方法对衡阳站的设计洪水进行分析; 2) 对各站进行洪水频率分析, 采用传统的水文比拟法将各参证站的设计洪水成果移至衡阳站; 3) 采用衡阳站二十年的实测资料进行单站频率分析得到其设计洪水计算结果。衡阳站具有 1959~2008 年的日流量资料, 可认为实测系列足够长, 对其做单站频率分析的结果可靠, 可作为判断各个方法计算结果优劣的对比依据。

3. 湘江区域洪水频率分析

当设计流域缺乏洪水资料时, 可通过区域洪水频率分析^[7,8], 将相似流域组内的洪水信息移置于设计流域。在本文中采用指标洪水来估算区域洪水频率, 具体包括以下几个部分: 相似流域组划分、估算指标洪水、推求区域综合增长曲线和推求设计流域的洪水频率曲线。

3.1. 选择相似流域组

区域洪水频率分析得到的增长曲线是由相似流域组中所有站点的资料得到的, 而相似流域组则是由与设计流域具有相似水文特征的各参证站点控制的流域所组成。本文采用模糊优选法^[9-11]确定相似流域组, 具体步骤如下:

1) 选定有关流域气象和下垫面条件的 12 个指标反映设计流域和参证流域的相似与相异, 文中选定的 12 个指标如表 2 所示;

Table 1. General information of hydrological networks in Xiangjiang River
表 1. 水文站网基本情况表

站名	河名	流入何处	经度	纬度	集水面积(km ²)	资料年限(年)
衡阳	湘江	洞庭湖	112.65	26.95	52,150	1959~2008
湘潭	湘江	洞庭湖	112.9167	27.8667	81,638	1959~2008
湘乡(河道)	涟水	湘江	112.5167	27.7167	6053	1959~2008
大西滩(二)	渌水	湘江	113.45	27.6667	3132	1959~2008
甘溪(二)	洙水	湘江	113	27.0833	9972	1969~2008

Table 2. Results of variables in hydrological similar basins
表 2. 相似流域计算成果表

指标	单位	指标权重	湘江	湘江	涟水	渌水	洙水
			衡阳	湘潭	湘乡	大西滩	甘溪
经度		0.071	112.65	112.9167	112.5167	113.45	113
纬度		0.071	26.95	27.8667	27.7167	27.6667	27.0833
集水面积	km ²	0.056	52,150	81,638	6053	3132	9972
主河道长	km	0.071	501	767	232	108	271
河道纵坡	‰	0.071	0.203	0.143	0.69	0.46	1.01
6月平均雨量	mm	0.071	249.01	228.99	218.71	233.61	232.69
7月平均雨量	mm	0.079	160.89	154.67	157.78	147.59	154.06
8月平均雨量	mm	0.079	181.89	161.97	131.01	147.04	192.59
9月平均雨量	mm	0.071	76.8	78.03	61.15	75.84	97.08
年平均均雨量	mm	0.108	1628.6	1569.6	1471.6	1559.1	1665.5
年平均陆面蒸发量	mm	0.108	765.66	706.25	675.45	710.67	673.28
年径流系数		0.147	0.51	0.51	0.4	0.54	0.5
年平均径流深	mm		830.12	807.05	588.14	845.79	826.21
隶属度				0.991	0.946	0.963	0.969
贴近度				0.992	0.98	0.984	0.985
参证站权重	%			33.7	17.1	23.5	25.7
$\mu_{(g),c}$			9506	13,022	1695	982	3060
$\mu_{g,c}$				12,900	1790	1150	3020
$\mu_{g,o}$				9417	10,038	11,128	9383

2) 通过有序二元法^[11]确定指标的优越性排序和相对优属度, 将相对优属度向量归一化, 转化为各指标权向量;

3) 利用模糊优选法算出各个参证流域相对设计站衡阳站的最优相对隶属度和贴近度, 结果如表 2 所示。

由于参证站与设计站均属于湘江流域, 水文气象特征都十分接近, 因此计算得到的隶属度和贴近度值均达到 0.9 以上, 将 4 个参证站全部选入相似流域组。

3.2. 估算指标洪水

对区域洪水频率分析, 估算指标洪水^[7] μ 主要有两种方法: 一种为直接由有资料站点的洪水资料估算, 它是最好的估计方法; 另一方法是对无资料流域用流域特征值方法, 流域特征值方程只能给出 μ 的一个近似估值, 还需用邻近相似站点作数据移置以改善该估值。

本文首先假定衡阳站(即设计站)无实测资料或系列较短, 以湘潭、湘乡、大西滩和甘溪为参证站, 采用区域频率分析方法对衡阳站的设计洪水进行分析, 因此采用流域特征值来估算指标洪水 μ 。

3.2.1. 建立回归方程

影响指标洪水的因素是多方面的, 在建立回归方程时, 一般采用分区的办法加以处理。初选 8 个流域特征值, 包括: 流域面积(F), 主河道长(L), 河道纵坡(J), 7 月平均降雨量(\bar{P}_7), 8 月平均降雨量(\bar{P}_8)和年平均降雨量(\bar{P}), 年平均径流量(R), 年平均蒸发量(\bar{E})。由于并不是所有初选的流域特征值都能反映流域指标洪水的特性, 采用逐步多元回归分析逐个剔除回归效果不显著的特征值, 直到剩下特征值的回归效果均显著为止。

将相似水文区内所有站点用于回归分析, 以推求最能反映流域指标洪水的回归方程。经逐步多元回归分析, 确定流域面积、河道纵坡和年平均径流量对指

标洪水的影响显著, 故最后建立的回归方程如下:

$$y = 0.942 + 0.596x_1 + 0.183x_2 + 0.266x_3 \quad (1)$$

转换为指标洪水与流域特征值的经验关系式为:

$$\mu = 2.564F^{0.596} J^{0.183} R^{0.266} \quad (2)$$

3.2.2. 由相似流域站点资料估算指标洪水

无资料点的 μ 估值可通过移置水文相似流域站点处的数据作修正。较好的方法是从与设计流域相近且高度相关的流域移置 μ 估值, 其次是从一个比较远的水文相似流域移置 μ 估值。

移置数据计算一般有 6 步: 1) 选一个或多个参证流域; 2) 由参证流域站点的洪水资料计算参证流域的 $\mu_{g,o}$; 3) 由参证流域的流域特征值计算其综合的 $\mu_{g,c}$ 估值; 4) 由设计流域的流域特征值计算其 $\mu_{s,c}$; 5) 比较参证流域的两个 μ 值, 判断设计流域的 $\mu_{s,c}$ 估值是偏大或偏小; 6) 用反映参证流域的偏大或偏小情况因子来修正设计流域的综合 $\mu_{s,c}$ 估值。移置方程为:

$$\mu_{s,a} = \mu_{s,c} \left(\frac{\mu_{g,o}}{\mu_{g,c}} \right) \quad (3)$$

式中: 下标 s 和 g 分别指设计流域与参证流域, c 与 o 分别指由流域特征值和流域实测洪水资料得到的估值, a 为设计流域的 μ 修正值。

如有多个参证流域, 最简单的处理方法为: 分别计算由 M 个参证流域得到的点 $\mu_{s,a}$ 估值, 然后通过几何加权平均, 得到最终的 μ 估值, 计算结果见表 2。取对数后, 有如下形式:

$$\ln \mu_{s,a} = \sum_{i=1}^M w_i \ln \mu_{s,ai} \quad (4)$$

加权因子 w_i 的选择, 由隶属度值和贴适度值确定, 尽可能反映参证流域与设计流域的相似性以及流域 μ 估值的准确性, 其各个值的和应等于 1。考虑各参证流域的权重, 得到设计流域的指标洪水为 $9920 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.3. 推求区域综合增长曲线

一旦确定了流域组, 即可由流域组资料拟合出区域综合增长曲线, 该曲线的参数值是由多个站点相应参数的估计值进行加权平均得到的。*FEH* 推荐使用 *GL* 分布^[7]作为水文相似流域组增长曲线的线型。在我国, 还是建议采用 *P-III* 型增长曲线^[12]。一般分三步来

完成增长曲线计算: 1) 计算流域组 L -矩比值; 2) 选择合适的分布形式; 3) 估算增长曲线参数值, 并计算 T 年一遇洪水的增长因子 q_T 。

3.3.1. 水文相似流域组 L -矩比值计算

增长曲线的计算要用到流域组中 M 个站点的样本 L -矩比值^[3,8]。将各个点的 L -矩比值进行加权, 可得流域组的 L -矩比值如下:

$$t_2^{(R)} = \frac{\sum_{i=1}^M w_i t_2^{(i)}}{\sum_{i=1}^M w_i}, \quad t_3^{(R)} = \frac{\sum_{i=1}^M w_i t_3^{(i)}}{\sum_{i=1}^M w_i} \quad (5)$$

式中: M 为相似流域组中站点数目; 加权值 w_i 为第 i 个站点的有效记录长度; $t_2^{(i)}$ 和 $t_3^{(i)}$ 为第 i 个相似站点处的 L -变差系数和 L -偏态系数; $t_2^{(R)}$ 和 $t_3^{(R)}$ 为该相似水文区的 L -变差系数和 L -偏态系数。

这里推荐的加权方案考虑了资料长度和站点相似性两方面的情况。考虑相似性, 就是对与设计流域非常相似的流域站点赋予较大的权重。相似排序因子 s_i 被用以定量相似性。为此, 流域组中的各站点按照相似程度由大到小排序, 相似程度由前面介绍的最优相对隶属度或贴适度来判定。 s_i 赋予最相似的站点以权重 1, 后面的相似站点权重值依次减少。

$$s_i = \frac{\sum_{j=i}^M n_j}{\sum_{j=1}^M n_j} \quad (6)$$

式中: n_j 为第 j 个相似点处的资料长度。分母为流域组中所有站点总的资料年数, 分子为流域组中部分站点的资料年数, 这些站点的相似性不强于第 i 个站点。

资料长度与相似排序因子的乘积给出了有效记录长度, $e_i = n_i s_i$ 。 e_i 即被用作式(5)中的加权项, 有

$$w_i = e_i = n_i s_i \quad (7)$$

计算区域 L -矩比值分以下四步走: 1) 按最优相对隶属度将相似的参证站点排序; 2) 计算相似排序因子 s_i ; 3) 计算加权因子 w_i ; 4) 计算区域的 L -矩比值, 以上结果列于表 3。将表 3 结果带入公式(5)计算相似水文区的矩比值, 得:

$$t_2^{(R)} = 0.2172, \quad t_3^{(R)} = 0.1381$$

3.3.2. 推求区域综合增长曲线

P-III 型频率曲线的三个参数 α , β 和 α_0 分别为

Table 3. Results of regional L-moments
表 3. 推求区域 L-矩比值的结果

站名	湘潭	甘溪(二)	大西滩(二)	湘乡(河道)
n_i	50	40	50	50
s_i	1	0.74	0.53	0.26
ω_i	50	29.5	26.3	13.2
$t_2^{(i)}$	0.175	0.2537	0.2238	0.283
$t_3^{(i)}$	0.055	0.2361	0.2165	0.0776

形状、尺度和位置参数, 它们与常用的 3 个统计参数 \bar{x} , Cv , Cs 可以相互转换。因为 $t_2 = l_2/l_1$, 所以有:

$$Cv = t_2 \pi^{\frac{1}{2}} \alpha^{\frac{1}{2}} \Gamma(\alpha) / \Gamma(\alpha + 0.5) \quad (8)$$

虽然 P-III型分布有三个待估参数, 但事实上, 综合区域无因次化的洪水频率曲线(即区域洪水增长曲线)时, 由于指标洪水 μ 就是我们通常所说的年最大洪水系列的均值, 因此只需要用到 Cv , Cs 两个统计参数。由流域指标洪水值和区域综合增长曲线, 可以很容易求得设计流域的洪水频率曲线。得到设计流域的洪水频率如表 4 所示。

4. 计算成果分析

4.1. 单站洪水频率分析计算

设计站衡阳站有 1959~2008 年 50 年的实测流量资料, 参证站湘潭、湘乡和大西滩有 1959~2008 年 50 年的实测流量资料, 甘溪站有 1969~2008 年 40 年的实测流量资料。现对其洪峰流量进行洪水频率分析计算, 采用年最大值取样的方法, 理论频率曲线采用 P-III型曲线, 根据线性矩法对频率曲线参数进行估计, 通过目估适线法确定参数。得到各水文站的设计洪峰流量计算成果见表 5。

Table 5. Results of flood frequency analysis at each site
表 5. 各站水文频率分析计算成果表

水文站	统计参数			设计值					
	均值	Cv	Cs/Cv	0.10%	1%	2%	5%	10%	20%
衡阳	10,400	0.35	1.5	24,400	20,200	18,900	16,900	15,200	13,300
湘潭	12,900	0.31	1.5	27,900	23,500	22,100	20,000	18,200	16,100
湘乡	1790	0.51	1.5	5620	4410	4010	3460	3010	2510
大西滩	1150	0.42	3	3520	2690	2430	2080	2000	1500
甘溪	3020	0.48	3	10,500	7800	6960	5840	4960	4030

Table 4. Growth curve and flood frequency distribution
表 4. 区域无因次化的洪水频率曲线和设计流域的洪水频率曲线

P	0.10%	1%	2%	5%	10%	20%
q_r	2.64	2.12	1.96	1.71	1.52	1.3
Q_r	26,200	21,000	19,400	17,000	15,100	12,900

4.2. 水文比拟法洪水频率估算

鉴于衡阳站水文频率分析采用的资料系列有 50 年, 认为实测系列足够长, 对其做单站频率分析的结果可靠, 可作为判断各个方法计算结果优劣的对比依据。对四个参证站进行单站水文频率分析, 推求其设计洪水, 采用水文比拟法^[2]将参证站的设计洪水成果移至衡阳站。水文比拟法计算公式如下:

$$Q_s = K \left(\frac{F_s}{F_o} \right)^n Q_o \quad (9)$$

式中, Q_s 、 Q_o 分别为设计站与参证站的洪峰流量; F_s 、 F_o 分别为设计站与参证站的集水面积; n 为洪峰流量指数, 取为 2/3。 K 为暴雨修正系数, 水文比拟法洪水频率计算成果如表 6 所示。

4.3. 区域洪水频率计算结果综合比较

通过假设衡阳站只有 20 年(1959~1978)的径流系列资料, 并对其进行单站洪水频率分析计算, 同时与区域频率分析法和水文比拟法的计算成果进行对比, 结果见表 7, 其中设计洪水值偏差是指设计频率为 0.1%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20% 的设计洪水值偏差的平均值。

结果表明, 区域频率分析估计的衡阳站设计洪水均值与基准设计洪水均值偏差为-4.6%, 平均设计洪水偏差为 3%, 而通过水文比拟法和实测短序列流量

Table 6. Design floods at Hengyang station by using hydrologic analogy method
表 6. 水文比拟法得到衡阳站设计洪水成果表

设计站	参证站	统计参数			设计值					
		均值	Cv	Cs/Cv	0.10%	1%	2%	5%	10%	20%
衡阳	湘潭	9570	0.31	1.5	20,700	17,500	16,400	14,800	13,500	12,000
	湘乡	9100	0.48	3	31,600	23,500	21,000	17,600	14,900	12,200
	大西滩	7520	0.51	1.5	23,600	18,500	16,900	14,500	12,600	10,500
	甘溪	7500	0.42	3	22,900	17,500	15,900	13,500	11,700	9780

Table 7. Results of design floods using regional frequency analysis, hydrologic analogy method and observed flow series
表 7. 衡阳站设计洪水成果表

方法	参证站	资料年限(年)	统计参数			均值偏差	设计洪水值偏差%
			均值	Cv	Cs/Cv	%	
水文比拟法	湘潭	1959~2008	9570	0.31	1.5	-8	12.5
	湘乡	1959~2008	9100	0.48	3	-12.5	11.9
	大西滩	1959~2008	7520	0.51	1.5	-27.7	12.4
	甘溪	1959~2008	7500	0.42	3	-27.9	17.5
短系列频率分析	衡阳	1959~1978	11,000	0.39	1	5.8	9.5
区域频率分析	多站	-	9920	0.39	2	-4.6	3
对比基准	衡阳	1959~2008	10,400	0.35	1.5	-	-

资料估计衡阳站的洪水均值偏差, 平均设计洪水偏差均较大。因此, 本文中区域频率分析方法对衡阳站的设计洪水估计的结果要优于传统的水文比拟法, 同时也优于由短系列资料计算的设计洪水值。

5. 结语

区域洪水频率分析方法对于研究无资料地区的设计洪水计算具有重要意义。本文基于湘江流域五个水文站的多年实测水文资料, 运用区域洪水频率分析方法, 对衡阳站进行洪水频率计算, 并将计算结果与水文比拟法以及短系列资料洪水频率的结果比较, 结果发现, 文中所介绍的区域频率分析计算结果具有较准确的设计洪水估值。因此, 文中所介绍区域频率分析法能够较好地解决无资料地区或资料短缺地区的设计洪水估算问题, 可以进一步推广应用。文中选取的流域站点由于资料完整性和代表性均比较好, 而且站点间相邻比较近, 导致相似流域分组的参考站的隶属度均比较高。在后续研究中需要选择更大的区域来验证和应用区域洪水频率计算方法。

参考文献 (References)

[1] SIVAPALAN, J. M., TAKEUCHI, K., FRANKS, S. W., et al.

- IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 2003, 48(6): 857-880.
- [2] 周芬, 郭生练, 肖义. 无资料地区设计洪水的区域频率分析[J]. *人民长江*, 2004, 50(5): 29-31.
- ZHOU Fen, GUO Shenglian and XIAO Yi. Regional flood frequency analysis in ungauged basins. *Yangtze River*, 2004, 50(5): 29-31. (in Chinese)
- [3] 熊立华, 郭生练. L-矩在区域洪水频率分析中的应用[J]. *水力发电*, 2003, 50(3): 6-8.
- XIONG Lihua, GUO Shenglian. Application of L-moments in the regional flood frequency analysis. *Water Power*, 2003, 50(3): 6-8. (in Chinese)
- [4] 陈元芳, 王庆荣, 沙志贵, 陈剑池. 线性矩法在长江中下游区域水文频率计算中的应用[J]. *河海大学学报*, 2003, 47(2): 207-211.
- CHEN Yuanfang, WANG Qingrong, SHA Zhigui and CHEN Jianchi. Application of L-moment based regional flood frequency analysis method to middle and lower Yangtze River. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2003, 47(2): 207-211. (in Chinese)
- [5] 陈永勤, 黄国如. 基于线性矩法的东江流域区域枯水频率分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2005, 13(4): 409-416.
- CHEN Yongqin, HUANG Guoru. Regional low flow frequency calculation with L-moments method at Dongjiang Basin. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2005, 13(4): 409-416. (in Chinese)
- [6] 杨纫章. 湘江流域水文地理[J]. *地理学报*, 1957, 24(2): 161-182.
- YANG Renzhang. Hydrography of the Hsiangkiang Basin, Hunan Province. *Acta Geographica Sinica*, 1957, 24(2): 161-182. (in Chinese)
- [7] Institute of Hydrology. *Flood estimation handbook*. Wallingford: Institute of Hydrology, 1999: 1-5.
- [8] HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. *An approach based on L-moment of regional frequency analysis*. Cambridge: Cambridge University, 1997.

- [9] 丁晶. 模糊相似选择在水文计算中的应用[J]. 四川大学学报, 1988, 32(6): 31-36.
DING Jing. The application of the selection based on fuzzy analogy to hydrological computation. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 1988, 32(6): 31-36. (in Chinese)
- [10] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
WANG Peizhuang. Fuzzy set theory and its applications. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983. (in Chinese)
- [11] 陈守煜. 工程水文水资源系统模糊集分析理论与实践[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1998.
CHEN Shouyu. Fuzzy set theory and its application on hydrology and water resources system. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1998. (in Chinese)
- [12] 张静怡, 徐小明. 极值分布和 P-III 型分布线性矩法在区域洪水频率分析中的检验[J]. 水文, 2002, 47(6): 36-38.
ZHANG Jingyi, XU Xiaoming. Test on L-moment estimation method for gev and p-iii distribution in regional flood frequency analysis. Hydrology, 2002, 47(6): 36-38. (in Chinese)