

Regional Flood Frequency Analysis in the Upstream Han River

Changjiang Xu^{1,2,3}, Shenglian Guo^{1,2}, Zhangjun Liu^{1,2}, Jiabo Yin^{1,2}

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

²Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resource Security, Wuhan Hubei

³Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

Email: xucj@cjh.com.cn

Received: May 15th, 2016; accepted: May 31st, 2016; published: Jun. 3rd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The index-flood method was discussed and applied to regional flood frequency analysis in the upstream Han River based on the annual maximum flood series from 16 hydrological stations. The fuzzy clustering method was used for identifying hydrological homogeneous region, which was further evaluated by the discordancy measure and homogeneity testing. Then the P-III distribution was selected as regional growth curve and the L-moment method was adopted to estimate associated parameters. The results show that regional flood frequency analysis is an effective way to estimate flood quantiles and can satisfy engineering design requirement in a data sparse region and ungauged basin. Therefore, it is suggested to be applied more widely in practice.

Keywords

Frequency Flood, Regional Analysis, Index-Flood Method, Fuzzy Clustering, Discordancy Measure, Homogeneity Testing

汉江上游流域洪水频率区域分析研究

徐长江^{1,2,3}, 郭生练^{1,2}, 刘章君^{1,2}, 尹家波^{1,2}

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

²水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉

³长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

作者简介: 徐长江(1978-), 女, 湖北荆门人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面的研究工作。

文章引用: 徐长江, 郭生练, 刘章君, 尹家波. 汉江上游流域洪水频率区域分析研究[J]. 水资源研究, 2016, 5(3): 191-199.
<http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.53025>

Email: xucj@cjh.com.cn

收稿日期: 2016年5月15日; 录用日期: 2016年5月31日; 发布日期: 2016年6月3日

摘要

本文采用洪水频率区域综合分析的指标洪水法,以汉江流域上游16个水文站点的年最大洪水系列为研究对象,通过模糊聚类法进行水文相似分析,并在不一致性检查和均匀性检验的基础上,选择P-III型分布为区域增长曲线型,利用线性矩法估计参数,开展了洪水频率区域分析案例研究。结果表明,对于基础资料短缺和无资料地区,洪水频率区域分析是提高设计洪水成果精度的有效途径,可以满足工程实践对稀遇设计洪水的现实需求,建议进一步推广应用。

关键词

洪水频率, 区域分析, 指标洪水法, 模糊聚类, 不一致性检查, 均匀性检验

1. 引言

在水利水电工程规划、设计、施工和运行管理中,设计洪水是具有普遍设计需求的关键性问题,在水文学科基础研究中,设计洪水也是持续关注的焦点问题。目前,很多国家系统的水文站网规划和建设历时都不长,积累的实测洪水资料非常有限,而随着国家经济社会的发展,各项基础工程建设的相继推进,水利水电、高速公路、桥梁、核电站等若干工程领域均对稀遇设计洪水提出了现实需求。根据现有短系列洪水资料来推求稀遇设计洪水,所得成果抽样误差相对较大。在几十年的工程设计实践和基础研究中,面对这一持续性的科学难题,相关学者和机构提出了各种办法,洪水频率区域分析是一条重要且有效途径。

洪水频率区域分析在水文领域中已研究和应用多年[1]-[6],在英国、美国等国家,早在二十世纪六十年代即已开展了洪水频率区域综合分析研究,英国于1975年即已将洪水频率区域综合分析写入了国家的洪水研究报告《Flood Study Report》[7],1999和2007年的《Flood Estimation Handbook》[8]也提出要开展洪水频率区域分析。美国于1981年发布的《Guidelines for Determining Flood Flow Frequency (Bulletin 17B)》[9]推荐洪水频率分布曲线的偏态系数 C_s 值要采用单站和区域偏态系数进行加权计算。中国于二十世纪七八十年代提出了各省或市的暴雨洪水查算图表或实用水文计算手册,以解决资料短缺或无资料条件下的小流域设计洪水计算问题。

洪水频率区域分析的基本思想,就是在单站洪水样本资料系列短缺、代表性不足的情况下,充分利用区域内其它相似测站的洪水资料信息,增加洪水频率分析计算的样本信息量,减少单站估计的误差[10]-[12],提高设计成果精度。

2. 研究方法

2.1. 指标洪水法

在洪水频率区域分析中,指标洪水法[13]是一种经典的常用分析方法。基于指标洪水法的洪水频率区域分析的基本思路是:首先,构建指标判别模型,将具有相似特征的水文站点归为“同一水文分区”;其次,通过综合这些站点的样本资料,推求相关参数,确定区域无因次化的洪水频率曲线(也称区域综合增长曲线);最后,利用区域综合增长曲线和单站指标洪水推求各个站点不同频率的设计洪水[14]。

指标洪水法的主要假设如下:① 同一个水文站点的洪水要素观测值服从同一种分布;② 同一个水文站点的洪水要素观测值之间是相互独立的;③ 不同水文站点的洪水要素观测值之间也是相互独立的;④ 不同水文

站点的洪水要素所服从的数学模型分布和参数是一样的，只是各站的洪水尺度系数不同。

采用区域频率曲线法估算设计洪水的计算方法如下：

1) 无因次系列生成。将每个水文站点的洪峰系列 Q_{ij} 无因次化，得到系列如下

$$q_{ij} = Q_{ij} / \bar{Q}_i \quad (i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, n_i) \quad (1)$$

式中： N 为水文站个数， n_i 为第 i 个站点年最大洪峰流量的资料系列长度。

2) 单站参数估计。对每个站点，分别估算该站点的无因次 q 系列的统计参数，估计值记为 $\hat{\theta}_k^{(i)}$ 。

3) 区域参数估计。将所有站点的参数估计值加权平均计算，得到区域频率曲线的区域参数值

$$\hat{\theta}_k^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \hat{\theta}_k^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (2)$$

4) 区域频率曲线推求。将区域参数值 $\hat{\theta}_k^R$ 代入区域频率曲线 $q(p)$ ，得到区域频率曲线如下

$$\hat{q}(p) = q(p | \hat{\theta}_1^R, \dots, \hat{\theta}_s^R) \quad (3)$$

5) 区域设计洪水推求。对任一站点，超过概率 p 的设计洪峰流量为

$$\hat{Q}_i(p) = \bar{Q}_i \cdot \hat{q}(p) \quad (4)$$

2.2. 洪水频率区域分析的关键问题

2.2.1. 水文相似性分析

对区域内的若干水文站点，识别哪些站点之间的洪水系列具有“水文相似性”，是洪水频率区域分析中的关键问题之一。水文分区识别的方法很多，本研究采用聚类分析。聚类法的基本思想是，选取代表站点特性的特征因子，构建每个站点的数据向量，计算各数据向量的相似度，来评判站点的相似性，实现相似站点的分类。聚类方法诸多[15]-[18]，本研究采用模糊聚类法[19]，简述如下。假设有 N 个研究对象，研究对象有 l -维共同属性，则每个研究对象可用 l -维属性构成的向量 x_i 来表示。用 C 表示聚类的类别，有 m 个。每一类的代表值可用该类别下所有研究对象的属性均值表示如下：

$$\theta_j = \frac{1}{n_j} \sum_{x \in C_j} x, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

任意两个对象之间的相似程度定义为

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^l (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (6)$$

记第 i 个对象隶属第 j 类的隶属度为 u_{ij} ，定义如下

$$u_{ij}(t) = \frac{1}{\sum_{k=1}^m \left(\frac{d(x_i, \theta_k)}{d(x_i, \theta_j)} \right)^{\frac{1}{g-1}}} \quad (7)$$

式中： g 为模糊聚类参数。通过反复迭代计算，可求得各类别的稳定代表值，比较每个研究对象与各类别代表值之间的相似程度，确定各对象的归类。

在水文实践应用中，可选用站点洪水系列的线性变差系数 t_2 和线性偏态系数 t_3 作为聚类分析的聚类因子。

2.2.2. 不一致性检查

对研究对象，首先要进行不一致性检查，分析各站点数据是否存在不一致，如发现与该组特征相差较大的离群点，应予以剔除。不一致性可以根据各水文站点的特征因子来评判分析。特征因子常取洪水样本系列的

统计参数，在无资料流域则常取影响洪峰形成的流域物理特征值。本研究选取线性变差系数 $L-C_v$ 、线性偏态系数 $L-C_s$ 和线型峰度系数 $L-C_k$ 作为特征因子，计算不一致性指标值 D_i 。

每个站点的统计特征参数 $L-C_v$ 、 $L-C_s$ 和 $L-C_k$ 构成一个三维向量，记为 $u_i = [L-C_v^{(i)}, L-C_s^{(i)}, L-C_k^{(i)}]^T$ 。在三维空间， u_i 可视为一个点。如果有 N 个站点，则这 N 个三维向量就构成了一个三维空间中的点簇。记点簇的中心为 \bar{u} ，计算如下

$$\bar{u} = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i \quad (8)$$

对每个站点来说，不一致性指标值 D_i 的计算公式如下

$$D_i = \frac{1}{3} N (u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (9)$$

$$A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (10)$$

如果 D_i 大于相应站点个数对应的临界值，则可判别这个站点与该组特征相差较大，是离群点[20]。

2.2.3. 均匀性检验

均匀性是指每个水文站点的洪水频率分布曲线基本上一样，只是各站点的指标洪水有差别。均匀性检验方法比较多，常选取能反映频率分布特征的指标 θ 进行检验[21] [22]。本文主要介绍 H 值检验方法。 H 值检验的基本思想是：采用随机模拟模型模拟水文分区若干次，模拟资料长度和实测资料长度相同，计算每次模拟的 θ 值的离散程度及离散程度的均值和均方差。检验参数 H 可定义如下：

$$H = \frac{(\theta \text{值离散程度的观测值}) - (\theta \text{值离散程度的模拟均值})}{(\theta \text{值离散程度的模拟均方差})} \quad (11)$$

若 H 值为较大或很大的正值，表明这个水文分区是非均匀的。

因为 $L-C_v$ 对设计洪水成果精度的影响较大，选其作为均匀性检验指标 θ 。假定水文分区内有 N 个测站，第 i 个水文站点的样本长度记为 n_i ，其样本 $L-C_v$ 记为 $t_2^{(i)}$ ，区域 $L-C_v$ 为区域内各站点 $L-C_v$ 的加权平均值，记为 t_2^R 。则水文分区内各站点 $L-C_v$ 的离散程度计算式如下：

$$V = \left\{ \sum_{i=1}^N n_i (t_2^{(i)} - t_2^R)^2 / \sum_{i=1}^N n_i \right\}^{1/2} \quad (12)$$

确定合适的区域频率曲线线型，采用随机模型模拟水文分区 N_{sim} 次，计算每一次模拟分区各站点 $L-C_v$ 的离散程度 V ，可得 N_{sim} 个离散程度 V 值，据此计算 N_{sim} 个 V 值的均值 μ_v 和均方差 σ_v ，则非均匀性指标 H 可计算如下：

$$H = \frac{(V - \mu_v)}{\sigma_v} \quad (13)$$

如果 $H > 2$ ，可以肯定水文分区是非均匀的；如果 $1 < H < 2$ ，则水文分区可能是非均匀的；如果 $H < 1$ ，水文分区可评判为均匀分区。

3. 汉江上游流域洪水频率区域分析研究

3.1. 研究流域概况

汉江是长江流域中游左岸的重要支流，发源于秦岭南麓，流向大致自西向东，于武汉汇入长江。汉江流域在丹江口以上为上游。汉江上游河段水系发育，河网密度大。左岸自上而下有沮河、褒河、湑水河、子午河、池河、月河、旬河、夹河、天河和丹江等主要支流；右岸自上而下有玉带河、漾家河、牧马河、任河、岚河、堵河等主

要支流。本次选择汉江流域上游 16 个水文站点的年最大洪峰系列资料作为洪水频率区域分析的研究对象,表 1 给出了各水文站点的基本信息情况。各站点的洪水资料系列长度不一,最长的为升仙村站,41 年;最短的为两河口站,14 年。

3.2. 单站样本参数值初估

对本次研究范围内 16 个水文站点,逐一计算洪峰系列的期望值作为指标洪水 \bar{Q}_i 。然后,将各站点的洪峰系列无因次化,对每个站点分别估计出该站无因次化 q 系列的前三阶样本线性矩,即 l_1 、 l_2 和 l_3 ,并计算出每个站点的样本线性矩变差系数 t_2 和线性矩偏态系数 t_3 ,如表 2 所示。

3.3. 水文相似性分析

本研究采用模糊聚类法开展水文相似性分析,选用各站点洪水系列的线性矩变差系数 t_2 和线性矩偏态系数 t_3 作为相似性分组聚类分析的聚类因子。经计算,汉江流域上游 16 个水文站点共分为 3 组,水文相似分组结果如表 3 所示。

Table 1. Basic information of hydrological stations

表 1. 水文站基本信息表

站名	茶店子	铁锁关	元墩	三华石	南沙河	江西营	升仙村	长滩村
集水面积(km ²)	1683	433	449	578	243	84.3	2143	237
资料长度(年)	25	31	33	43	28	18	41	32
站名	白龙塘	两河口	柴坪	向家坪	青泥湾	桂花园	南宽坪	长沙坝
集水面积(km ²)	2381	2816	2364	6448	1369	1275	3936	5578
资料长度(年)	15	14	22	35	32	28	32	26

Table 2. Initial parameter values for flood frequency curve at each hydrological station

表 2. 水文站洪水频率曲线参数值初估

站点	\bar{Q}_i (m ³ /s)	t_2	t_3
茶店子	898.72	0.3996	0.4886
铁锁关	748.81	0.3170	0.2509
元墩	658.82	0.2385	0.0661
三华石	707.53	0.2192	0.1824
南沙河	223.9	0.2673	0.0169
江西营	155.64	0.1882	0.1446
升仙村	1243.44	0.3091	0.2825
长滩村	196.58	0.3121	0.1545
白龙塘	1739.93	0.2690	0.0195
两河口	1418.93	0.2906	0.0813
柴坪	1036.23	0.3989	0.3268
向家坪	1924.54	0.3466	0.1554
青泥湾	474.28	0.4116	0.4376
桂花园	689.54	0.2294	0.0808
南宽坪	931.59	0.3290	0.3256
长沙坝	1189.65	0.3046	0.1714

3.4. 不一致性检查

对每一分组的每一个水文站点，分别计算其不一致性指标值 D_i ，再与临界值比较，开展不一致性检查。不一致性指标计算结果如表 4 所示。经检查分析，各组数据均没有发现离群点。

3.5. 均匀性检验

本研究采用 H 值检验法来开展水文分区均匀性检验，采用线性矩变差系数 t_2 作为反映频率分布曲线特征的指标 θ ，针对 θ 开展检验。以 P-III 分布作为区域频率曲线线型，对三个水文分区，分别重复随机模拟 500 次。对每一水文分区的每一次随机模拟，分别计算该分区内线性矩变差系数系列的离散程度，计算各分区的非均匀性指标 H ，成果如表 5 所示。各水文分区的非均匀性指标 H 值均小于 1，故检验分析表明，这三个水文分区都是均匀的。

3.6. 区域增长曲线

对每一水文分区，将各站点的样本资料长度作为权重，由该分区内所有站点的线性矩变差系数、线性矩偏态系数分别加权平均，可得区域线性矩变差系数和偏态系数。

对汉江流域上游三个水文分区，区域线性矩参数计算成果如表 6 所示。

根据区域线性矩参数，可以计算得 P-III 型分布参数 $\hat{\mu}^R$ 、 $\hat{\sigma}^R$ 、 \hat{C}_s^R 的区域估计值，确定区域频率曲线 $\hat{q}(P) = \hat{q}(P | \hat{\mu}^R, \hat{\sigma}^R, \hat{C}_s^R)$ 。经计算，各水文分区基于 P-III 型频率分布曲线的区域增长曲线成果如表 7 和图 1 所示。

3.7. 区域设计洪水

对任一站点，推求概率 P 所对应的设计洪峰流量采用公式(4)计算，区域增长曲线 $\hat{q}(p)$ 已经得出，指标洪

Table 3. Identification result of hydrological homogeneous regions

表 3. 水文相似分组成果表

站名	茶店子	铁锁关	元墩	三华石	南沙河	江西营	升仙村	长滩村
组别	III	I	II	II	II	II	I	I
站名	白龙塘	两河口	柴坪	向家坪	青泥湾	桂花园	南宽坪	长沙坝
组别	II	II	III	I	III	II	III	I

Table 4. Results of discordancy measure for each station

表 4. 各站不一致性指标计算成果表

站名	铁锁关	升仙村	长滩村	向家坪	长沙坝	元墩	三华石	南沙河
组别	I	I	I	I	I	II	II	II
D_i	0.79	0.94	0.93	1.33	1.02	0.07	1.01	0.63
站名	江西营	白龙塘	两河口	桂花园	茶店子	柴坪	青泥湾	南宽坪
组别	II	II	II	II	III	III	III	III
D_i	1.13	1.50	1.43	1.24	1.00	1.00	1.00	1.00

Table 5. Results of non-homogeneity measures for three regions

表 5. 三个分区的非均匀性指标计算成果表

水文分区	I	II	III
测度 H	-1.48	-0.09	-0.73

Table 6. Results of estimated regional L-moments for each homogeneous region
表 6. 各水文分区区域线性矩计算成果表

分区	t_2^R	t_3^R
分区 I	0.3184	0.2073
分区 II	0.2385	0.0906
分区 III	0.3826	0.3948

Table 7. Regional growth curve for each homogeneous region (unit: m^3/s)
表 7. 各水文分区区域增长曲线成果表(单位: m^3/s)

频率 P	分区 I	分区 II	分区 III
$P = 1\%$	2.89	2.16	4.03
$P = 2\%$	2.57	2.00	3.42
$P = 4\%$	2.24	1.82	2.81
$P = 5\%$	2.14	1.76	2.61
$P = 10\%$	1.79	1.57	2.01
$P = 50\%$	0.88	0.96	0.72
$P = 75\%$	0.56	0.69	0.45
$P = 85\%$	0.44	0.57	0.39

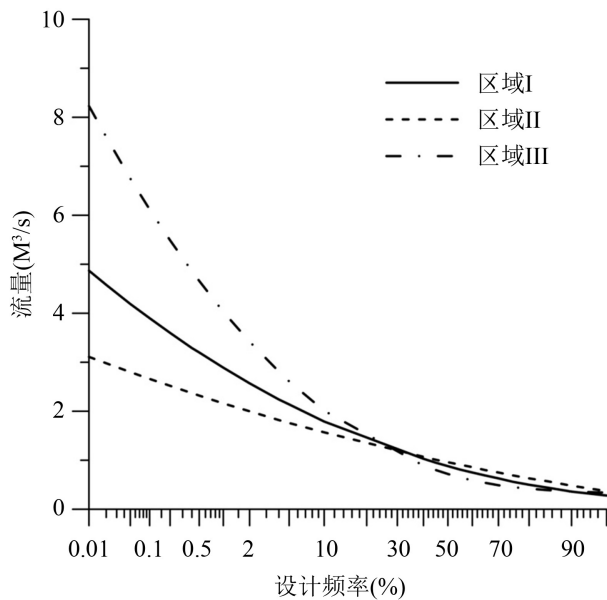


Figure 1. Regional growth curve at each homogeneous region
图 1. 各水文分区区域增长曲线

水 \bar{Q}_i 采用相应站点期望值。例如，长滩村属于水文分区 I，其百年一遇的设计洪峰流量为

$$\hat{Q}_{\text{长滩村},1\%} = \bar{Q}_{\text{长滩村}} \cdot \hat{q}_2(P=1\%) = 196.58 \times 2.89 = 568 \text{ m}^3/\text{s}$$

4. 结论

本文介绍了洪水频率区域综合分析的指标洪水法，对水文相似性分析、不一致性检查和非均匀性检验等关

键问题做了阐述,以汉江流域上游 16 个水文站点为研究对象,选择 P-III 型分布增长曲线和线性矩法,开展了洪水频率区域分析的案例研究。对于资料条件较差的流域和工程对稀遇设计洪水的现实需求,洪水频率区域分析将是解决这一问题的有效途径之一。更进一步,当设计流域缺乏洪水资料时,还可以选用流域气象和下垫面条件等若干指标,通过模糊分析等方法确定相似流域,并基于回归分析等方法,由流域特征值估算指标洪水,从而通过洪水频率区域分析,开展无资料地区的设计洪水分析计算。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51539009)。

参考文献 (References)

- [1] YIN, Y., CHEN, H., XU, C.-Y., et al. Spatio-temporal characteristics of the extreme precipitation by L-moment-based index-flood method in the Yangtze River Delta region, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 124(3): 1005-1022.
- [2] DAWDY, D. R., GRIFFIS, V. W. and GUPTA, V. K. Regional flood-frequency analysis: How we got here and where we are going. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(9): 953-959.
- [3] 卢韦伟, 陈璐, 周建中, 陈华. 基于多元分布函数的区域洪水频率分析[J]. *水文*, 2015, 35(5): 6-10.
LU Weiwei, CHEN Lu, ZHOU Jianzhong and CHEN Hua. Regional flood frequency analysis based on multivariate distribution function. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(5): 6-10. (in Chinese)
- [4] 陈华, 何加伟, 栗飞, 王金星. 湘江流域区域洪水频率分析计算[J]. *水资源研究*, 2013, 2(1): 20-26.
CHEN Hua, HE Jiawei, LI Fei and WANG Jinxing. Regional flood frequency analysis in the Xiangjiangbasin. *Journal of Water Resources Research*, 2013, 2(1): 20-26. (in Chinese)
- [5] 杨涛, 陈喜, 杨红卫, 谢海文. 基于线性矩法的珠江三角洲区域洪水频率分析[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(6): 615-619.
YANG Tao, CHEN Xi, YANG Hongwei and XIE Haiwen. Regional flood frequency analysis in Pearl River delta region based on L-moments approach. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, 37(6): 615-619. (in Chinese)
- [6] 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, 22(6): 36-38.
ZHANG Jingyi, XU Xiaoming. Test on L-moment estimation method for GEV and P-III distribution in regional flood frequency analysis. *Journal of China Hydrology*, 2002, 22(6): 36-38. (in Chinese)
- [7] NERC (Natural Environment Research Council). Flood studies report. Vols. 1-5, London: Department of the Environment, 1975.
- [8] ROBSON, A., REED, D. Flood estimation handbook. Wallingford: Institute of Hydrology, 1999.
- [9] US Water Resources Council. Guidelines for determining flood flow frequency, Bulletin 17B. Washington DC, 1981.
- [10] CUNNANE, C. Methods and merits of regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 1988, 100(1): 269-290.
- [11] 郭生练. 洪水频率区域综合分析[J]. *武汉水利电力学院学报*, 1990(6): 69-76.
GUO Shenglian. Regional flood frequency analysis. *Journal of Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering*, 1990(6): 69-76. (in Chinese)
- [12] 郭生练, 刘章君, 熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 302-314.
GUO Shenglian, LIU Zhangjun and XIONG Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 302-314. (in Chinese)
- [13] DALRYMPLE, T. Flood frequency analysis methods. Washington: US Geol. Survey, Water Supply Paper 1543 A, 1960.
- [14] 熊立华, 郭生练, 王才君. 国外区域洪水频率分析方法研究进展[J]. *水科学进展*, 2004, 15(2): 261-267.
XIONG Lihua, GUO Shenglian and WANG Caijun. Advance in regional flood frequency analysis from abroad. *Advance in Water Science*, 2004, 15(2): 261-267. (in Chinese)
- [15] NATHAN, R. J., MCMAHON, T. A. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalization. *Journal of Hydrology*, 1990, 121(1): 217-238.
- [16] FOVELL, R. G., FOVELL, M. Y. C. Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis. *Journal of Climate*, 1993, 6(11): 2103-2135. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<2103:CZOTCU>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<2103:CZOTCU>2.0.CO;2)
- [17] BASU, B., SRINIVAS, V. V. Regional flood frequency analysis using kernel-based fuzzy clustering approach. *Water Resources Research*, 2014, 50(4): 3295-3316. <http://dx.doi.org/10.1002/2012WR012828>
- [18] GOYAL, M. K., GUPTA, V. Identification of homogeneous rainfall regimes in Northeast Region of India using fuzzy cluster

-
- analysis. *Water Resources Management*, 2014, 28(13): 4491-4511. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0699-7>
- [19] 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, 29(3): 6-8.
XIONG Lihua, GUO Shenglian. Application of L-moments in the regional flood frequency analysis. *Water Power*, 2003, 29(3): 6-8. (in Chinese)
- [20] HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [21] HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resources Research*, 1993, 29(2): 271-281. <http://dx.doi.org/10.1029/92WR01980>
- [22] CHOWDHURY, J. U., STEDINGER, J. R. and LU, L. H. Goodness-of-fit tests for regional generalized extreme value flood distributions. *Water Resources Research*, 1991, 27(7): 1765-1776. <http://dx.doi.org/10.1029/91WR00077>