

布尔分布在辽宁省西部半干旱地区 水文频率分析中的应用

胡 辰¹, 夏 军^{1,2}, 余敦先¹, 余江游³, 王福东⁴, 孙玉华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. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京 100101;

3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051;

4. 辽宁省水文局, 辽宁 沈阳 110003)

摘 要:在我国洪水频率分析计算中,一般选取P-型分布曲线作为理论曲线,但P-型曲线并非在任何自然条件下均适用。据此,采用EB-分布,对辽宁省西部17个水文站点经一致性修正后的年最大日流量序列进行拟合,与包括P-型曲线在内的9种曲线的拟合效果进行对比,找寻拟合效果最优的频率分布。结果表明:EB-分布在整体以及频率小于50%、频率小于25%的上尾区间段的拟合效果均优于P-型分布及其他8种分布,具有拟合效果好且稳定的特点,此外,根据EB-分布曲线进行外延得到的设计值的大小比较适中。因此,推荐在辽宁省西部地区使用EB-分布作为P-型分布的替代曲线。

关键词:EB-分布;P-型分布;洪水频率分析;半干旱地区;设计洪峰值

中图分类号:TV122

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)01-0020-07

1 引言

水文频率曲线是一种用于表达频率分布统计规律的模型,是水文频率分析中用于外延或内插水文变量设计值的重要工具^[1]。对于某一研究区域,水文频率曲线选择的合适与否直接决定了该区域水文资料序列拟合效果的好坏。因此,选择合适的水文频率曲线对该区域水利工程规划、设计、管理以及水资源利用等工作具有重要意义^[1]。

在我国《水利水电工程设计洪水计算规范》中规定:水文总体线型一般可采用皮尔逊型(Pearson distribution, P-)分布曲线,特殊情况,经过分析论证也可采用其它线型^[2]。由此说明,在我国P-型曲线不是在任何自然条件下均适用。因此,根据各个地区洪水系列的不同特征,对比P-型曲线与其他曲

线应用效果的优劣,选用适宜的频率曲线线型是非常必要的^[3]。因此,国内许多专家、学者将P-型曲线与其他曲线在中国境内不同区域的适用结果进行了对比、分析,如张静怡等对比了P-型分布与广义极值分布在江西、福建两省88个水文站点洪水频率分析中的效果^[4];姚孝诚比较了P-型分布与对数P-型分布在四川省、江西省等地洪水频率分析中的应用效果^[5];李松仕就P-型分布、耿贝尔(Gumbel Distribution, GD)分布等6种频率分布在中国的应用效果进行了对比、分析^[6]。以上学者的研究均表明:P-型分布在我国湿润半湿润地区能与水文资料序列之间取得较好的拟合效果。但P-型分布也存在一定的局限性:在大部分干旱或半干旱地区的中小河流域应用效果并非十分理想,如田万荣等人新疆应用P-型分布进行频率计算时发现P-型分布在部分站

收稿日期:2017-11-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41571028)

作者简介:胡辰(1996-),男,江西吉安人,在读硕士生,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:785290576@qq.com

通讯作者:夏军(1954-),男,湖北孝感人,教授,博士生导师,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail:xiaj@ugsbrr.ac.cn

点的拟合效果不佳^[7]。

Burr 系列分布是 Burr I.W.于上世纪四十年代初提出的具有 12 种形式的分布函数,Burr 系列分布来源于如下微分方程的解^[8]:

$$F(x) = \left[\frac{-\int g(x)dx}{+1} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: $g(x)$ 为当 $-\infty < x < +\infty$ 时,使 $F(x)$ 从 0 到 1 逐渐递增的函数。

Burr I.W.根据式(1)给出了 $F(x)$ 的 12 种分布形式,其中 Burr-、Burr- 及 Burr- 型分布运用较为广泛,Burr- 在中国、澳大利亚枯水频率分析中具有较好的应用效果^[9, 10]。而 Burr- 型分布被广泛运用在环境科学、精算数学、医学、电子信息学、经济科学等诸多领域,已经列为精算领域的八大分布之一。邵全喜对三参数 Burr- 型分布进行了系统研究及扩展,提出 EB- 分布(Extend Three-Parameter Burr- Distribution, EB-)模型并运用到了洪水频率分析当中^[11]。经多人实践验证,EB- 分布在多地的暴雨、洪水频率分析中取得了较好的效果^[11-13]。

辽宁省西部地区为山地丘陵区,年平均降雨量在 450mm 左右,是典型的半干旱地区。基于 P- 型频率分布曲线在辽宁省西部地区水文频率拟合效果不理

想,本研究选用 EB- 分布,对辽宁省西部地区 17 个站点的年最大日流量序列进行适线分析,并与 P- 分布、GD 分布、正态(Normal Distribution, ND)分布、对数正态(Logarithmic Normal Distribution, LND)分布、广义正态(Generalized Normal Distribution, GND)分布、广义极值(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)分布、广义帕累托(Generalized Pareto Distribution, GPD)分布、广义逻辑(Generalized Logistic Distribution, GLD)分布、伽马(Gamma Distribution, Gamma)分布的拟合结果进行对比、分析,以此检验 EB- 分布曲线对辽宁省西部地区各水文站点年最大日流量序列的拟合效果。

2 资料选取及方法介绍

2.1 资料选取

本研究使用的数据是由辽宁省水文局提供的辽宁省西部地区 17 个水文测站的年最大日流量序列数据,序列长度均超过 30 年,各站点的基本概况如表 1 所示。

2.2 理论频率曲线介绍

Burr- 型分布存在两参数及三参数两种形式^[14],其中三参数 Burr- 型分布应用更为广泛,其分布函数的数学表达式如式(2)所示:

表1 各站点基本概况及Spearman秩次相关检验结果

Table1 The basic information and Spearman testing results at all hydrological gauging stations

站点名	水系	东经/°	北纬/°	实测期	调查期	考证期	T 检验值		
							修正前	临界值	修正后
白庙子	柳河	121.85	42.7	1956~2013	—	—	-5.309	1.673	1.03
雷神庙	青龙河	119.07	40.92	1958~1961、1963~1995	1938、1949、1962	230	-1.331	1.691	1.056
边沿口	小凌河	120.57	40.93	1972~2013	—	—	-0.852	1.683	0.989
德立吉	大凌河	120.12	41.49	1958~1961、1963~2013	1917、1949、1962	230	-2.031	1.674	0.212
东白城子	绕阳河	122.4	42.25	1939~1942、1951~2013	1930	230	-3.755	1.669	1.646
海州	辽河	123.38	42.93	1960~2013	1930、1959	208	-4.152	1.675	0.344
韩家杖子	绕阳河	122.12	42.43	1953~2013	1930	100	-3.565	1.671	0.428
六合成	牯牛河	121.07	42.12	1958~1992	1911、1949	128	-2.005	1.691	0.839
彭家堡	辽河	123.05	42.28	1951、1954~2013	—	—	-3.159	1.671	1.422
前白水	六股河	120.13	40.59	1959、1963~2013	1930、1949	165	-2.465	1.676	1.449
司屯	绕阳河	122.03	41.67	1970~2013	—	—	-1.709	1.682	0.24
团山子	小凌河	120.35	41.18	1922、1963、1978~2013	1872	214	-2.603	1.688	1.591
小荒地	辽河	122.92	42.1	1954~2013	—	—	-1.93	1.672	0.918
小五家	老哈河	119.7	41.97	1978~2010	—	—	0.864	1.696	-0.205
兴城	渤海岸	120.7	40.6	1956~2013	1930、1940、1949	84	-1.768	1.673	0.344
叶柏寿	大凌河	119.63	41.4	1930、1959~2013	1949	230	-6.234	1.674	1.155
赵家屯	绕阳河	121.85	41.42	1951~2008	1930	100	-2.388	1.674	0.699

注:调查期为实测期之前通过走访调查得到的历史洪水发生的时期,考证期为调查之前通过文献考证得到的历史洪水发生的时期,本文中所用到的不同站点考证期和调查期洪水资料来源于辽宁省水文局。

$$F_B(x) = 1 - \left\{ 1 + (x/b)^c \right\}^{-\beta} \quad (b, c, \beta > 0) \quad (2)$$

EB-分布在 Burr-型分布的基础上进行了一定的改变:在式(2)中,令 $k = -1/\beta$, $\lambda = b/\beta^{1/c}$, 则 Burr-型分布函数可化为式(3)所示形式,即 EB-分布函数,其密度函数如式(4)所示:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \left\{ 1 - k \left(\frac{x}{\lambda} \right)^c \right\}^{\frac{1}{k}} & k \neq 0 \\ 1 - e^{-(x/\lambda)^c} & k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$f(x) = \begin{cases} c\lambda^{-1} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{c-1} \left\{ 1 - k \left(\frac{x}{\lambda} \right)^c \right\}^{\frac{1}{k}-1} & k \neq 0 \\ c\lambda^{-1} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{c-1} e^{-(x/\lambda)^c} & k = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: λ 、 c 、 k 分别为 EB-分布尺度参数、形状参数和不等式参数^[11]。当 $k \leq 0$ 时, $0 \leq x < \infty$; $k > 0$ 时, $0 \leq x \leq \lambda/k^{1/c}$ 。在洪水频率分析中,一般应满足上端无限。当把 EB-分布应用于洪水频率分析时,参数 k 应满足约束 $k \leq 0$ ^[11],其余 9 种频率分布的具体表达式详见 Tasker G, Hosking JRM 等人的研究^[15]。

本研究中,各分布函数中的各项参数均可采用极大似然法(MLE)估计得出^[16,17]。在拟定参数的过程中,始终保证 EB-分布的参数 k 大于 0, P-分布的 C_s/C_v 大于 2 以满足拟合频率曲线下限大于 0。本研究采用数学期望公式对连续水文系列计算经验频率,对于含有特大值的水文序列,本研究采用统一处理法计算经验频率。经验频率计算公式及统一处理法计算公式如式(5)、(6)所示。

$$P_m = \frac{m}{n+1} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_M = \frac{M}{N+1}, M=1, 2, \dots, a \\ P_m = \frac{a}{N+1} + \left(1 - \frac{a}{N+1} \right) \frac{m-l}{n-l+1}, m=l+1, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

式中: n 为水文序列长度; m 为连续系列中的序位; P_m 为第 m 项的经验频率。式(6)为 a 个特大值组成的系列经验频率的计算公式,其中 N 为历史考证期; a 为特大系列值总个数; M 为特大系列值序位; P_M 为第 M 项特大系列的经验频率,下式为 $n-l$ 个连续值组成的序列的经验频率计算公式,其中, l 为从 n 项连续系列中抽出的特大系列个数。

为描述不同频率分布曲线对各个站点的拟合优劣情况,本研究采用经验点据与频率分布曲线之间的拟

合度 R^2 、均方根误差 $RMSE$ 、相对误差 R_e 作为各水文频率分布曲线拟合评价指标,见公式(7)~(9)。在实际防洪工程设计中,除了考虑频率曲线与经验点据的整体拟合效果,还应该考虑高水部分^[18]的拟合效果,这与曲线外延是否合理直接相关^[19]。基于此,本研究考虑了各频率曲线在频率小于 50% 和小于 25% 两个上尾区间段与经验点据之间的拟合度情况,分别用 $R^2(<50\%)$ 和 $R^2(<25\%)$ 表示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [x_o(i) - x_p(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [x_o(i) - \bar{X}]^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_o(i) - x_p(i)]^2} \quad (8)$$

$$R_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_p(i) - x_o(i)}{x_o(i)} \right| \quad (9)$$

式中: $x_o(i)$ 为第 i 个经验序列值; \bar{X} 为所有经验序列值的平均值; $x_p(i)$ 为对应的理论值。

3 应用结果及讨论

在频率计算前,为保证各站点序列的一致性。本研究首先采用了 Spearman 秩次相关检验法,计算该地区 17 个站点的年最大日流量序列对应的检验统计量 T ^[20],其初始检验结果以及对应的临界值($\alpha=0.05$)列于表 1。其结果表明该区域大部分站点趋势变化显著,需要采取一致性修正措施。

目前,国内外常采用两类方法对单变量非一致性水文序列进行频率计算,分别为还原/还现方法和时变矩法^[21]。还原/还现方法主要包括三种方法,分别为变异点前后系列与某一参数的关系分析法、时间系列的分解合成法以及水文模型法^[22]。其中,选取降雨作为参数的关系分析法是通过建立变异点前后序列的降雨径流关系,根据所需年份的降雨量估计对应的径流量,实现水文序列的还原或者还现修正^[23]。而时间系列的分解合成法的基本原理为将任一非一致性序列分解为随机部分和确定性部分^[24],通过建立确定性成分与时间之间的函数关系,以实现原序列的还原修正^[24,25]。水文模型法则是建立下垫面条件与水文模型参数之间的相关关系^[26],通过水文模型计算实现对原始序列的还原或者还现。

本研究采用的是由胡义明等人^[27]提出的基于趋

势分析的一致性修正方法,参照梁忠民、胡义明等人的定义^[22,27],该方法是一种对原始序列进行还原修正的方法。其基本假设为“发生趋势性变异的实测序列存在着理想化的平稳性状态,且该状态下的均值为序列某分割点前后两实测样本系列均值的线性组合”^[27]。基于该假定合理分割原始序列,以前后两段序列均值的线性组合值作为一致性状态下的均值以修正原始序列中的确定性成分,进而对原始序列进行一致性修正^[27]。对修正后的结果再进行趋势检验,其结果如表1中最后一列所示。可见,所有站点均通过了趋势检验。

在趋势检验后,本研究选用EB-分布及其他9种频率分布曲线线型,对辽宁省西部地区17个水文站点年最大日流量序列进行适线研究及结果对比。首先,本研究对比了EB-分布与其余9种分布的拟合效果,统计了17组年最大日流量序列各自拟合度最高、均方根误差及相对误差最低分布的频次,结果如图1所示。从图1中可以看出,对于频率曲线与经验点据的整体拟合度,EB-分布在13组序列中拟合度最高,该数量明显高于P-型分布,远远高于其他8种分布;对于频率小于50%这个上尾区间,EB-分布在12组序列中的拟合度最佳,略高于P-型分布,远远高于其他8种分布;对于频率小于25%这个上尾区间,EB-分布在10组序列中拟合度最优,远远高于包括P-型分布在内的9种分布;对于整体的相对误差,EB-分布在7个站点中误差最低;对于整体的均方根误差,EB-分布在12个站点中误差最低。由此可以看出,不论是整体的拟合度 R^2 ,频率小于50%及25%两个上尾区间段的拟合度 $R^2(<50\%)$ 和 $R^2(<25\%)$ 以及整体的均方根误差、整体的相对误差,EB-分布为最优分布的频次均高于其余9种分布。

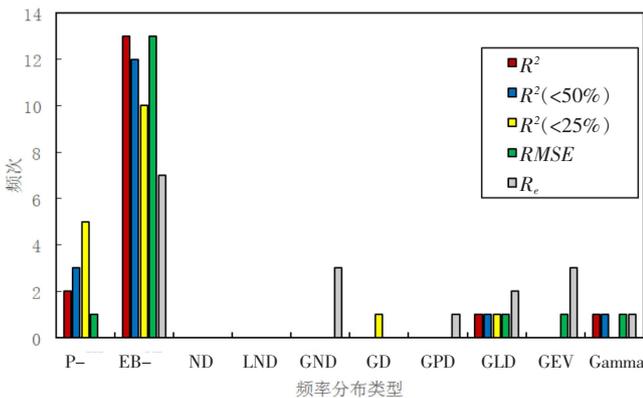


图1 最优拟合曲线频次统计图

Fig.1 The statistical histogram of the optimal fitting distribution

此后,本研究进一步对比了EB-分布与P-型分布的拟合效果,表2为EB-分布与P-型分布与17组经验点据拟合度 R^2 的特征统计值。从表2中可以看出,对全部点据,EB-分布拟合度的最大值为0.995,最低值为0.940,平均值为0.977;而P-型分布拟合结果的最大值、最低值和平均值分别为0.988、0.845、0.954,可以看出EB-分布拟合结果的各项指标均优于P-型分布,尤其是最小值、平均值这两项指标。而对于频率小于50%区间段以及频率小于25%区间段的经验点据,EB-分布拟合结果的最大值、最小值、平均值均大于P-型分布,尤其是最小值和平均值。据此说明,不论是对全部点据的拟合效果,还是对两个上尾区间的拟合效果,EB-分布均优于P-型分布而且拟合结果更加稳定。由此说明,EB-分布的拟合效果在各方面均要优于P-型分布。

表2 P-型分布与EB-分布对17组年最大日流量序列拟合结果的特征统计值

Table2 The statistic eigenvalues of P- and EB- distributions frequency analysis results

R^2	整体		频率小于50%区间段		频率小于25%区间段	
	P-分布	EB-分布	P-分布	EXB-分布	P-分布	EXB-分布
最大值	0.988	0.995	0.986	0.993	0.980	0.989
最小值	0.845	0.940	0.812	0.916	0.764	0.890
平均值	0.954	0.977	0.948	0.969	0.931	0.960

为满足实际工程需求,需进一步比较各曲线的外延部分,据此,本研究比较了各频率曲线分布在各个站点的100、1000年一遇下设计值,在各个站点均得到了类似的结论。在此,本研究选取了边沿口站、德立吉站作为研究区域内的两个代表站。图2分别为10种频率分布在边沿口站和德立吉站的最优拟合效果图,图中黑色的粗线为P-型分布的拟合曲线,黑色的虚线为EB-分布的拟合曲线,从图2中可以看出,EB-分布与经验点据的拟合效果均明显优于其余9种分布,而且EB-分布100、1000年一遇的设计值相对比较适中。

为进一步说明各理论频率分布在边沿口、德立吉两个站的设计值差异,表3中统计了不同理论频率分布在边沿口、德立吉两个站点100、1000年一遇下设计值。

通过比较表3中各个频率分布在不同重现期下的设计值可以得出,随着重现期的增大,不同分布设

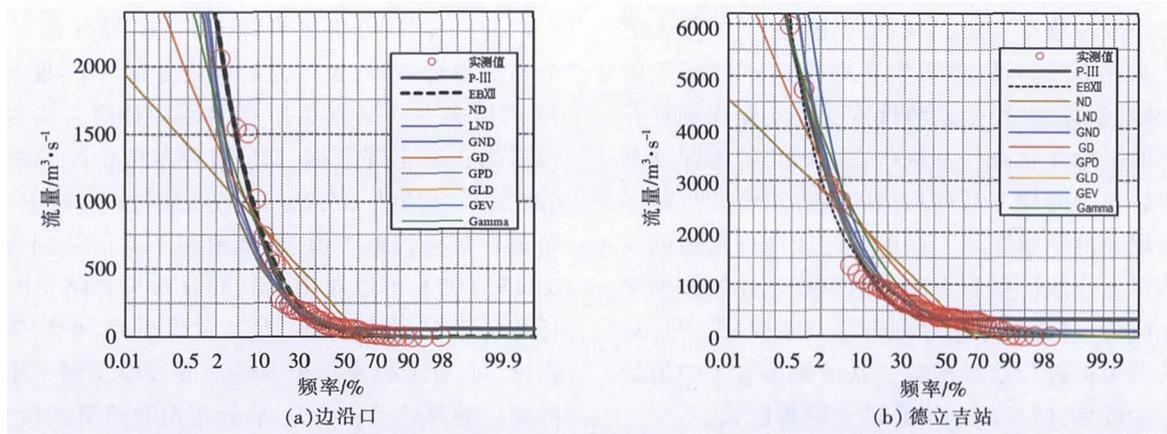


图2 10种频率分布边沿口站(a)和德立吉站(b)的拟合效果

Fig.2 The fitting results of 10 frequency distributions at (a) Bianyankou station and (b) Deliji station

表3 不同理论分布在边沿口站、德立吉站不同重现期下的设计值

Table3 T-year design flood peak values of different distributions at Bianyankou station and Deliji station ($m^3 \cdot s^{-1}$)

站点	设计值										
	重现期	P-	EB	ND	LND	GND	GD	GPD	GLD	GEV	Gamma
边沿口	100 a	3130.2	3279.77	1310.84	2874.64	2678.2	1675.51	2532.15	2437.85	2471.88	2152.25
	1000 a	6015.73	7324.17	1654.61	9243.48	7877.5	2485.05	9146.24	10294.12	10076.59	3693.71
德立吉	100 a	4479.25	4177.81	3121.89	6558.79	5178.16	3950.41	5073.16	5060.77	5107.17	4785.13
	1000 a	8357.19	12357.96	3902.93	17681.68	12622.72	5789.65	13787.83	17366.9	16569.51	7753.47

计值之间差别逐渐增大。在重现期较小情况下,如100年一遇,边沿口站、德立吉站各分布设计值相差不大;而在重现期较大时,如1000年一遇情况下,各分布设计值之间的差异则较大。比较边沿口站、德立吉站各频率分布的1000年一遇的设计值,可以发现,当重现期为1000年时,P-型分布、正态分布、耿贝尔分布等频率分布的设计值相对偏小,对数正态分布、广义逻辑分布、广义极值分布等分布的设计值相对偏大,而EB-分布的设计值则比较适中。在实际水利工程设计的实际过程中,更多关注的是频率曲线的上尾部分,即重现期较大的情况。如果设计值选择过小,将会严重影响工程安全,过大又会增大工程投资,影响工程的经济性。因此,需要根据需求选取适当的设计值,而EB-分布在较大重现期下设计值比较适中这一特点在很多情况下能够满足工程的需求。

4 结论

本研究以辽宁省西部地区17个水文站点为研究对象,首先对17个站点的年最大日流量序列进行了一致性检验,其结果为大多数站点均不满足一致性条件。据此,本研究采用了基于趋势分析的一致性修正方法,对各个站点的年最大日流量序列进行一致性还原修

正。随后,本研究分别采用EB-分布及包括P-型在内其他9种频率分布线型对一致性修正后的序列进行水文频率分析研究,并将EB-分布与其余9种分布的拟合结果进行了对比、分析。

本研究表明,我国规范中推荐使用的P-型频率曲线在辽宁省西部半干旱地区或部分站点的适用效果并不佳,与之相比,EB-频率曲线在辽宁省西部半干旱地区的拟合结果更佳而且更稳定。此外,通过EB-频率曲线外延得到的洪水设计值与P-型频率曲线的设计值相比更加适中。但由于本研究选取的水文站点有限,本研究采用的基于趋势分析的一致性修正方法无法解释导致水文序列非一致性的原因且存在一定的不确定性,尤其是在对未来的趋势变化预测方面^[20]。因此,EB-频率曲线在辽宁省其他地区的应用效果还有待进一步研究、验证。

参考文献:

[1] 詹道江,叶守泽.工程水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2000. (ZHAN Daojiang, YE Shouze. Engineering Hydrology [M]. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese))

[2] SL44—2006 水利水电工程设计洪水计算规范[S]. (SL44—2006, Regulation for Calculating Design Flood of Water Resources and Hydropower[S]. (in Chinese))

[3] 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(03): 302-314. (GUO Shenglian, LIU Zhangjun, XIONG Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(03): 302-314. (in Chinese))
- [4] 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(06): 36-38. (ZHANG Jingyi, XU Xiaoming. Test on L-moment estimation method for GEV and P-III distribution in regional flood frequency analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2002, 22(06): 36-38. (in Chinese))
- [5] 姚孝诚. 对数 P-III 型分布曲线在年最大流量频率分析中的应用[J]. 四川水利, 1998, 19(03): 7-12. (YAO Xiaocheng. The application of logarithmic Pearson distribution in annual maximum flow frequency analysis[J]. Sichuan Water Conservancy, 1998, 19(03): 7-12. (in Chinese))
- [6] 李松仕. 对数皮尔逊 III 型频率分布统计特性分析[J]. 水利学报, 1985(09): 43-48. (LI Songshi. Statistical characteristic analysis of logarithmic Pearson frequency distribution [J]. Journal of Hydraulic Engineering. 1985(09): 43-48. (in Chinese))
- [7] 田万荣, 朱健. 几种频率分布线型对新疆天山北坡洪水适应性研究[J]. 干旱区地理, 2000, 23(04): 353-357. (TIAN Wanrong, ZHU Jian. Study on suitability of some curve type on frequency distribution in analyzing floods occurring on the northern slope of the Tianshan mountains, Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2000, 23(04): 353-357. (in Chinese))
- [8] Shao Q. Notes on maximum likelihood estimation for the three-parameter Burr XII distribution [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2004, 45(3): 675-687.
- [9] 李诚, 郭文娟, 杜新忠. EB3 分布在枯水频率分析中的应用[J]. 交通科学与工程, 2011, 27(01): 64-68. (LI Cheng, GUO Wenjuan, DU Xinzong. Application of three-parameter Burr III distribution for low-flow frequency analysis[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(01): 64-68. (in Chinese))
- [10] Shao Q, Chen Y D, Zhang L. An Extension of Three-parameter Burr III Distribution for Low-flow Frequency Analysis[M]. Elsevier Science Publishers B. V. 2008.
- [11] Quanxi Shao, Heung Wong, Jun Xia, et al. Models for extremes using the extended three-parameter Burr XII system with application to flood frequency analysis [J]. Hydrological Sciences Journal, 2004, 49(4): 685-702.
- [12] 陈璐, 何典灿, 周建中, 等. 基于广义第二类 beta 分布的洪水频率分析[J]. 水文, 2016, 36(06): 1-6. (CHEN Lu, HE Diancan, ZHOU Jianzhong, et al. Application of generalized Beta distribution of second kind for flood frequency analysis [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(06): 1-6. (in Chinese))
- [13] 胡乃发, 金昌杰, 关德新, 等. 浑太流域降水极值的统计分布特征[J]. 高原气象, 2012, 31(04): 1166-1172. (HU Naifa, JIN Changjie, GUAN Dexin, et al. Characteristic of statistical distribution of extreme precipitation in Hunhe-Taizihe Basins [J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(04): 1166-1172. (in Chinese))
- [14] 王炳兴. Burr Type III 分布的统计推断[J]. 数学物理学报, 2008, 28(6): 1103-1108. (WANG Bingxing. Statistical inference for the Burr Type III distribution [J]. Acta Mathematica Scientia, 2008, 28(6): 1103-1108. (in Chinese))
- [15] Tasker G, Hosking J R M, Wallis J R. Regional frequency analysis: an approach based on L-Moments[J]. Journal of the American Statistical Association, 1998, 93(443): 1233.
- [16] Watkins A J. An algorithm for maximum likelihood estimation in the three parameter Burr XII distribution[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 1999, 32(1): 19-27.
- [17] Quanxi Shao. Notes on maximum likelihood estimation for the three-parameter Burr XII distribution [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 45(3): 675-687.
- [18] 叶长青, 陈晓宏, 邵全喜, 张家鸣. 考虑高水影响的洪水频率分布线型对比研究[J]. 水利学报, 2013, 44(06): 694-702. (YE Changqing, CHEN Xiaohong, SHAO Quanxi, et al. A comparison study on distribution for flood frequency analysis focus on the observed flow data in the high flow part [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(06): 694-702. (in Chinese))
- [19] 金光炎. 水文分析中的经验频率[J]. 水文, 1994(1): 1-9. (JIN Guangyan. Empirical frequency in hydrological analysis[J]. Journal of China Hydrology, 1994(1): 1-9. (in Chinese))
- [20] 成静清. 非一致性年径流序列频率分析计算[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2010. (CHENG Jingqing. Hydrological Frequency Analysis for Inconsistent Annual Runoff Series [D]. Shanxi: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese))
- [21] 熊立华, 江聪, 杜涛等. 变化环境下非一致性水文频率分析研究综述[J]. 水资源研究, 2015, 04(4): 310-319. (XIONG Lihua, JIANG Cong, DU Tao, et al. Review on nonstationary hydrological frequency analysis under changing environments[J]. Journal of Water Resources Research, 2015, 04(4): 310-319. (in Chinese))
- [22] 梁忠民, 胡义明, 王军. 非一致性水文频率分析的研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 864-871. (LIANG Zhongmin, HU Yiming, WANG Jun. Advances in hydrological frequency analysis of non-stationary time series[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 864-871. (in Chinese))
- [23] 沈宏. 天然径流还原计算方法初步探讨[J]. 水利规划与设计, 2003(3): 15-18. (SHEN Hong. Study in the calculation method of natural runoff restore [J]. Water Resources Planning and Design, 2003(3): 15-18. (in Chinese))
- [24] 谢平, 陈广才, 夏军. 变化环境下非一致性年径流系列的水文频率计算原理[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2005, 38(6): 6-9. (XIE Ping, CHEN Guangcai, XIA Jun. Hydrological frequency calculation principle of inconsistent annual runoff series under changing environments [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(6): 6-9. (in Chinese))
- [25] 胡义明, 梁忠民. 基于跳跃分析的非一致性洪量系列的频率计算[J]. 东北水利水电, 2011(7): 38-40. (HU Yiming, LIANG Zhongmin. Frequency analysis of non-stationary flood series based on jump

- analysis [J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2011 (7):38-40. (in Chinese))
- [26] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. *中国水利*, 2008 (2):55-58. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff [J]. *China Water Resources*, 2008(2):55-58. (in Chinese))
- [27] 胡义明, 梁忠民, 杨好周, 等. 基于趋势分析的非一致性水文频率分析研究方法研究[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(5):21-25. (HU Yiming, LIANG Zhongmin, YANG Haozhou, et al. Study on frequency analysis method of non-stationary observation series based on trend analysis [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(5):21-25. (in Chinese))

The Application of Burr Distribution for Hydrological Frequency Analysis in Western Semi-arid Region of Liaoning Province

HU Chen¹, XIA Jun^{1,2}, SHE Dunxian¹, YU Jiangyou³, WANG Fudong⁴, SUN Yuhua⁴

- (1. *State Key Lab of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*
2. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
3. *Kunming Engineering Corporation Limited of Power China, Kunming 650051, China;*
4. *Hydrology Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)*

Abstract: In China, P- distribution is widely used in flood frequency analysis, but it is not suitable to be used under any natural conditions. After the consistency modification of annual maximum daily discharge series, the EB- distribution is applied to fit it at 17 hydrological gauging stations in the western Liaoning Province. and then be compared with nine distributions including P- distribution to find the best fitting frequency distribution. The results indicate that the EB- distribution performs better than the other 9 distributions in validity and stability, and the T-year designed flood peaks of EB- distribution are moderate as the peaks of the other frequency distributions may be higher or lower. Therefore, the EB- distribution is recommended to substitute P- distribution for frequency analysis in the western Liaoning Province.

Key words: EB- distribution; P- distribution; flood frequency analysis; semi-arid region; design flood peak

(上接第 37 页)

Study on the Change-point of Water Level at Xingzi Station in Poyang Lake

HE Jin^{1,2,3}, XIA Ziqiang^{1,2,3}, LIU Ke⁴, HUANG Feng^{1,2,3}, WU Yao^{1,5}, GUO Lidan^{1,2,3}

- (1. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
3. *Institute of International Rivers Research Academy, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
4. *Liuyang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-Electric Power, Liuyang 410300, China;*
5. *Poyang Lake Hydro Project Construction Office of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China)*

Abstract: In order to find out the change point of water level in Poyang Lake, the annual mean water level and monthly mean water level of Xingzi station were diagnosed by comprehensive mutation diagnosis system. Sliding T test, Yamamoto method, Pettitt method and other seven kinds of classical diagnostic methods were applied to water level sequence, and a variety of test results confirmed each other to avoid the wrong conclusion. The results show that the change-points of the tested water level were concentrated in 1999-2004, among which the most significant change-point was in 2003. The annual average water level was decreased by 1.12 m. The results can provide guidance for the analysis of hydrological situation and water resources utilization in Poyang Lake basin.

Key words: Poyang Lake; change-point; water level; mean value