

Variable Properties and Causes of Flood Frequency Distribution Parameters under Changing Environment*

Silong Cai^{1,2}, Xiaohong Chen^{1,2#}, Changqing Ye^{1,2}, Jiaming Zhang^{1,2}, Lijuan Zhang^{1,2}

¹Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou

²Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, Sun Yat-sen University, Guangzhou

Email: caisil@mail2.sysu.edu.cn, #eescxh@mail.sysu.edu.cn

Received: Dec. 1st, 2012; revised: Dec. 16th, 2012; accepted: Dec. 26th, 2012

Abstract: The environment consistence of flood series of many rivers is no longer existed. And the normal method that used to analyze stream flow need to be adjusted to adapt these phenomena. This paper analyzes flood frequency by Pearson-III distribution and estimate the parameters with the method of L-moments. The Changing properties, causes and impacts of parameters of the generalized extreme value distribution is analyzed by use of the 30-year moving average method. The result indicate that: 1) The inconsistent annual maximum daily flow series of stations in Dongjiang Basin shows a descend trend that caused by rainfall and construction of water conservancy projects, the latter is the major reason; 2) The flood series maintain inconsistency before and after environment change, the impacts on fitting curve of flood series showed an overall performance as upper tail from “gentle” to “steep”; 3) Because of the parameters is changing, so will the design flood magnitude, and its trend is descend; 4) The flood return period is no a constant property for describing a flood under the changing environment.

Keywords: Time-Varying Parameters; Frequency Analysis; Stream Flow Extremes; Inconsistent

变化环境下洪水频率分布参数演变规律及成因*

蔡斯龙^{1,2}, 陈晓宏^{1,2#}, 叶长青^{1,2}, 张家鸣^{1,2}, 张丽娟^{1,2}

¹中山大学水资源与环境研究中心, 广州

²华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州

Email: caisil@mail2.sysu.edu.cn, #eescxh@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2012年12月1日; 修回日期: 2012年12月16日; 录用日期: 2012年12月26日

摘要: 世界上众多江河洪水序列形成的环境背景“一致性”已不复存在, 传统极值流量分析的“极值理论”需要修正以适应这些现象。本文采用 Pearson-III型分布函数, 以 L-矩法估参。应用 30a 逐年滑动平均法分解变化环境下洪水分布参数演变规律, 并对其成因及影响作了有益探讨。结果表明: 1) 东江年最大日流量呈显著下降趋势, 产生非一致性。除了降雨外, 大中型水库调蓄影响是主要原因。2) 变化环境下, 非一致性洪水序列引起分布参数改变, 已导致高水尾端特征由“陡峭”变为“平缓”。3) 随分布参数的改变, 指定标准 P 下(百年一遇), 其相应设计流量值也时刻发生改变, 量级表现为由大减小。4) 在变化环境情况下, 洪水重现期往往不是描述一场洪水的一个固定不变的属性。

关键词: 时变统计参数; 频率分析; 极值流量; 非一致性

*基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作和重点项目(51210013, 50839005), 水利部公益性行业科研专项经费项目专题(200901043-3), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB428405), 广东省水利科技创新项目(2009-39), 广东省计划项目(2010B050300010)。

#通讯作者。

作者简介: 蔡斯龙(1989-), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。

1. 引言

全球气候变化和由此引起的水文要素变化和水环境变化, 以及人类活动对水文环境带来的剧烈影响, 使得众多江河的水文情势已经发生显著变化, 旱涝水文极值事件频频发生^[1]。以极端水灾害与气象灾害发生规律与机理为重大科学问题的全球变化研究已成为当今重大科学前沿^[2,3]。Milly 等(2008)在《Science》指出: 在变化环境下, 流域径流系列的一致性已经受到破坏, 采用现有的洪水频率分析方法进行流域水资源开发利用工程、防洪抗旱工程及水利工程梯级调度等, 有可能面临由于环境变化导致的洪水设计频率失真的风险^[3]。水利工程实践中经常应用的洪水重现期概念的有效性开始变得可疑。

水文频率分析计算需满足独立随机同分布假设, 其中同分布是指水文样本在过去、现在和未来均服从同一总体分布, 即样本具有一致性。由于气候变化及人类活动影响, 使得一致性的假设受到挑战。识别、检验并分离非一致性水文序列的暂态成分是正确评估极值水灾害的基础^[4]。很多学者对径流序列非一致性处理做了大量有意义的工作^[4], 较为常用的方法是基于还原/还现途径来考虑非一致性水文系列的频率计算。但非一致性径流序列的频率计算至今尚未形成被广泛接受的统一方法^[5]。随着全球变化对水文过程影响问题研究的深入, 变化环境导致非一致性条件下的水文频率研究近年来受到格外关注^[4,6-8]。针对水文序列非一致性, 可建立基于时变统计参数非一致性序列进行估计^[7]。更多非一致洪水频率分析详细方法见 Khaliq(2006)^[9]和 Singh 和 Wang(2005)等文章^[10]。由于非一致性洪水序列的统计参数(如平均值和标准差)和分布线型自身时刻发生改变, 相应设计流量的不确定性也将发生变化^[7]。传统极值流量分析的“极值理论”根据历史序列率定一套固定的分布参数, 推求得的分布曲线将局限于历史某一时期的流域物理条件, 不能反映变化环境下洪水频率分布曲线的变化。东江流域在气候变化和人类活动(如水利工程和土地利用)尤其是水库影响下, 洪水序列样本的产生条件和统计特性已经改变, 前后阶段序列显示出非一致性^[11]。本文根据洪水序列变化综合诊断结果, 应用 30a 逐年滑动平均法分解变化环境下东江洪水分布参数的演变规律及影响。以期解决以下问题: 1) 揭示变化环境下非一

致性洪水序列频率分布参数响应规律; 2) 探讨非一致性洪水序列洪水设计值演变特征及成因影响。研究对于科学理解在当前气候变化与人类活动双重影响下, 东江流域的防洪安全、生态环境演变具有重要科学与现实意义。

2. 研究区与数据来源

东江流域干流长度 562 km, 流域总面积 27,040 km²。北回归线横贯其中, 属南亚热带季风气候区。东江流域水资源已经被高度开发利用, 如水力发电、农田灌溉等。水库控制全流域面积达 51%, 干流河道建设有 12 个梯级水电站, 导致流域径流发生显著变化^[12]。

分析数据为东江流域上游龙川、中游河源和下游博罗 3 个水文站的逐日流量数据, 源自广东省水文局。年最大日流量基于逐日流量资料提取。水文站控制面积和资料长度见表 1。目前, 东江流域已建成新丰江、枫树坝、白盆珠三大控制性水库, 总库容 170.6×10^8 m³。东江流域主要水库修建时间、水库库容及受水库影响的水文站等信息见表 2。

3. 研究方法

采用 Pearson-III 型分布(P3)拟合东江年最大日流量序列(郭生练, 2005)^[13]。分布函数的参数统一用线性矩法(L-矩法)来估计, 线性矩法是目前洪水频率分

Table 1. Detailed information of hydrology stations
表 1. 水文站点详细信息

站点	位置	控制面积(km ²)	资料范围
龙川	115°15'E 24°07'N	7699	1954.1.1~2009.12.31
河源	114°42'E 23°44'N	15,750	1950.1.1~2010.12.31
博罗	114°18'E 23°10'N	25,325	1950.1.1~2010.12.31

Table 2. Detailed information of major reservoirs in Dongjiang Basin
表 2. 东江流域主要水库详细信息

水库	河流	库容(10 ⁸ m ³)	建设时间	开始蓄水时间	影响站点
枫树坝	东江干流	19.4	1970~1974	1973.10	龙川, 河源, 博罗
新丰江	新丰江	139.0	1958~1962	1959.10	河源, 博罗
白盆珠	西枝江	12.2	1959~1985	1984.09	博罗

析参数估计的新方法也是最为稳健的方法之一^[13]。它最大的特点是对洪水序列中的极大值和极小值远没有常规矩那么敏感^[14]。

Pearson-III型曲线的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\alpha^k}{\Gamma(k)}(x-\xi)^{k-1} \exp(-k(x-\xi)) \quad (1)$$

式中 $\Gamma()$ 为伽玛函数, α 、 k 、 ξ 分别为 Pearson-III 型分布的尺度、形状和位置参数, 其中 $\alpha > 0$, $k > 0$ 。

线性矩法根据样本求出样本 L-矩、L-变差系数 t_2 、L-偏态系数 t_3 和 L-峰度系数 t_4 , 再根据 L-矩和分布函数参数的关系估算参数, 具体如下:

假设 X 为观测到的随机变量, 如流量 Q , 样本容量为 n 。这 n 个样本值按从小到大的顺序排列, 用 $x_{k:n}$ 表示样本容量为 n 的样本序列中第 k 小的值, 则有 $x_{1:n} \leq x_{2:n} \leq \dots \leq x_{n:n}$ 。前四阶样本 L-矩计算式如下:

$$l_0 = b_0 \quad (2)$$

$$l_2 = 2b_1 - b_0 \quad (3)$$

$$l_3 = 6b_2 - 6b_1 + b_0 \quad (4)$$

$$l_4 = 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 - b_0 \quad (5)$$

式(2)~(5)中:

$$b_0 = n^{-1} \sum_{j=1}^n x_{j:n} \quad (6)$$

$$b_1 = n^{-1} \sum_{j=2}^n \frac{j-1}{n-1} x_{j:n} \quad (7)$$

$$b_2 = n^{-1} \sum_{j=3}^n \frac{(j-1)(j-2)}{(n-1)(n-2)} x_{j:n} \quad (8)$$

$$b_3 = n^{-1} \sum_{j=4}^n \frac{(j-1)(j-2)(j-3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} x_{j:n} \quad (9)$$

样本系列的均值, L-变差系数 t_2 , L-偏态系数 t_3 , L-峰度系数 t_4 分别定义如下:

$$l_1 = b_0; t_2 = l_2/l_1; t_3 = l_3/l_2; t_4 = l_4/l_2 \quad (10)$$

由 L-矩计算 Pearson-III 型分布的形状参数 k 的计算式如下^[15]:

如果 $0 < |t_3| < 1/3$, 令 $z = 3\pi t_3^2$, 有

$$k \approx \frac{1+0.2906z}{z+0.1882z^2+0.0442z^3} \quad (11)$$

如果 $1/3 \leq |t_3| < 1$, 令 $z = 1 - |t_3|$, 有

$$k \approx \frac{0.36067z - 0.595867z^2 + 0.25361z^3}{1 - 2.78861z + 2.56096z^2 + 0.77045z^3} \quad (12)$$

则可求出 3 个统计参数的值:

$$\begin{aligned} \mu &= l_1; \sigma = l_2 \pi^{1/2} k^{1/2} \Gamma(k) / \Gamma(k+1/2); \\ C_v &= \sigma / \mu; C_s = 2k - 1/2 \operatorname{sign}(t_3) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中, μ 为样本均值, σ 样本均方差, C_v 为离差系数, C_s 为偏态系数。

继而推求尺度参数 α 和位置参数 ξ :

$$\alpha = \frac{2}{\sigma |C_s|}; \xi = \mu \left(1 - \frac{2C_v}{C_s} \right) \quad (14)$$

4. 结果分析

4.1. 年最大日流量非一致性识别

对东江流域年最大日流量序列采用 Mann-Kendall 检验^[16]进行非一致性和突变点识别(图 1)。流量序列存在明显下降趋势。

龙川站。年最大日流量通过了显著性水平 $\alpha = 0.01$ 的 M-K 检验, 呈现非一致性, 具有较强的变化趋势。如图 1 所示, 对位于序列中间的交点作突变分析, 突变点出现在 1974 年, 1974~2004 年洪峰流量有显著下降的趋势。

河源站。M-K 检验显示年最大日流量变化过程与龙川站相似, 也通过了显著性水平 $\alpha = 0.01$ 的 M-K 检验, 具有更强的变化趋势。突变点出现在 1976 年(图 1), 1976~2004 年流量显著下降。

博罗站。洪峰流量变化过程对比上游则较为复杂, 变化趋势没有上游剧烈, 但也通过了显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的 M-K 检验。1964 年左右显著下降后有所回升(图 1), 1987 年后洪峰流量又有显著下降。

4.2. P3 分布参数演变规律

通过 L-矩法计算推求 P3 分布线型的参数 k 、 α 、 ξ 。采用 30a 滑动平均法, 即将每 30 年作为一个样本序列, 逐年依次向后推算, 共估计到龙川 27 组, 河源和博罗共 31 组参数。随着时间序列向后推移, 3 个参数都发生了显著的变化(图 2)。

1) 尺度参数 α : 龙川、河源、博罗三站的变化过程均在起始序列时间 1964 年(序列 1964~1993 年)

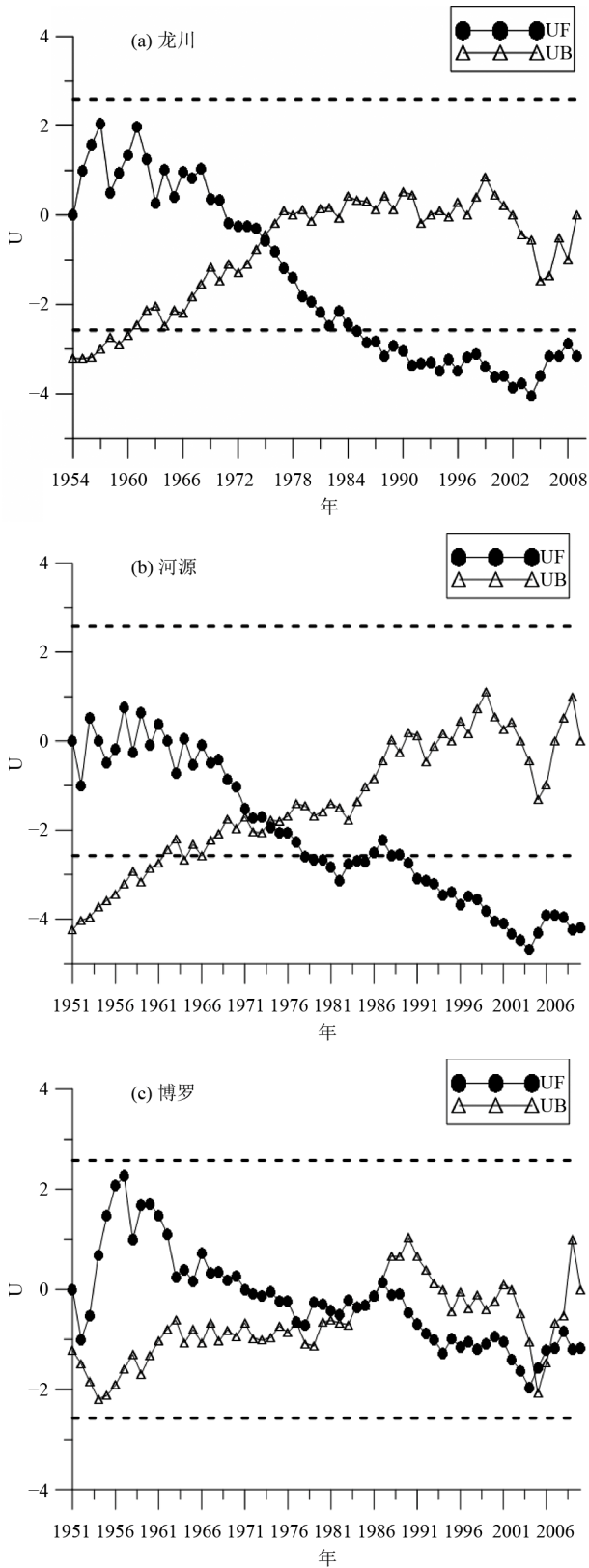


Figure 1. M-K test of annual maximum daily flow series of stations in Dongjiang Basin
图1. 东江流域各站年最大日流量 M-K 检验

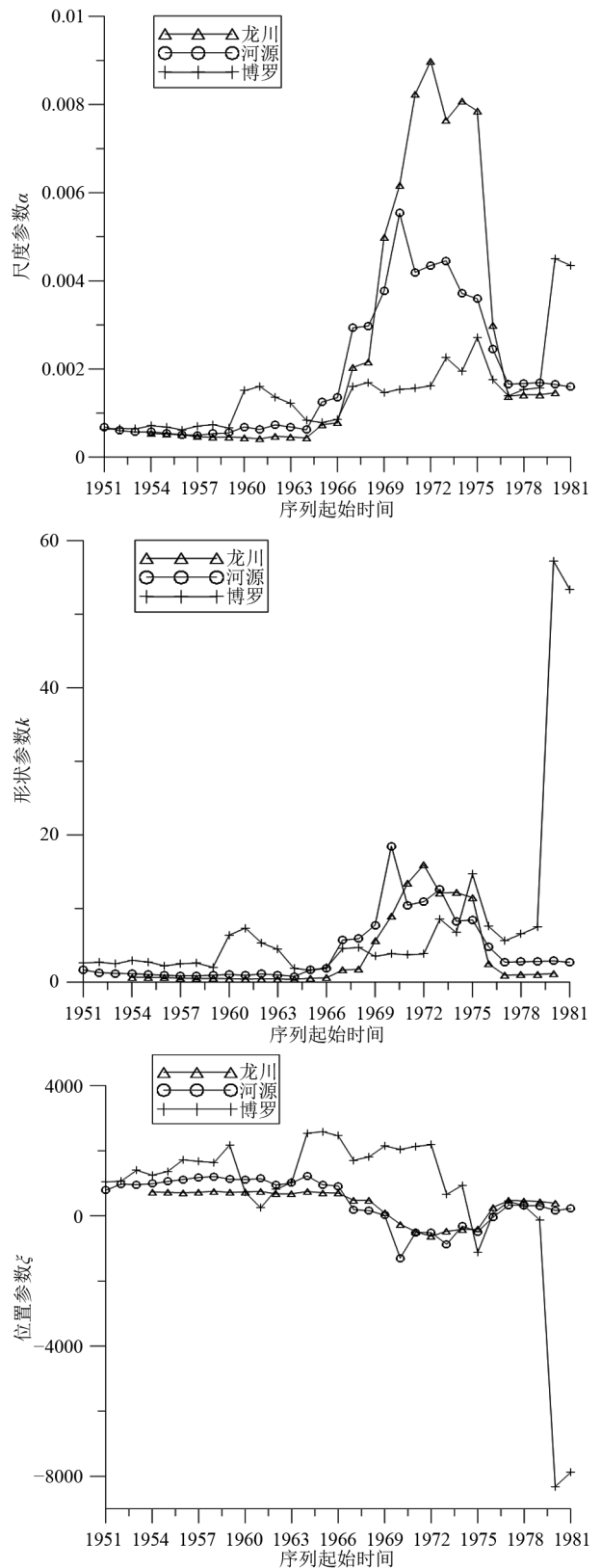


Figure 2. Change process of parameters (α , k , ζ) of P3 distribution of stations in Dongjiang Basin
图2. 东江流域各站 P3 分布参数 α , k , ζ 的变化过程

和 1975 年(序列 1975~2004 年)为两个明显分界点。在 1964 年之前尺度参数保持着较为平稳的减小趋势, 在 1964 年之后, 尺度参数出现显著的波动, 先迅速增大而后在 1975 年后又有所回落。

2) 形状参数 k : 形状参数的变化规律与尺度参数类似, 龙川、河源、博罗三站均以起始序列时间 1965 年(1965~1994 年)为分界点, 在该点之前, P3 分布的形状参数保持稳定, 在该点之后, 形状参数发生了较大的波动, 同样存在先增大后减小的变化趋势。

3) 位置参数 ξ : 龙川、河源站的位置参数发生较大波动的时间点与尺度参数和形状参数一致, 在 1964 年之后, P3 分布的位置参数有明显波动, 先急剧减小, 1975 年后显著增大。博罗站的位置参数波动性较大, 自 1962 年开始波动上升, 在 1973 年开始显著减小。

因此, 年最大日流量序列变化后, 频率分布参数会随着时间的时刻发生改变, 变化率大小不等, 从参数趋势可以看出变化环境对分布曲线参数的影响比较明显, 而参数的趋势即反应了设计洪水的波动, 间接说明了变化环境对设计洪水有较大影响。

4.3. P3 分布曲线演变规律^[17]

为了更明显地体现分布参数变化对频率分布曲线的变化过程影响, 这里选取时间基点作为序列起始时间点推求对比频率曲线的变化过程。时间基点通过 M-K 法诊断年最大日流量变化过程并结合水利工程竣工时间点选取。龙川站均选取工程影响前时间点(1954 和 1963 年)和工程影响后(1975 和 2009 年); 河源和博罗站选取工程影响前(1951 和 1963 年)、工程影响后(1975 和 2010 年)时间点作为序列起始时间点。根据 K-S 统计量^[18](表 3)检验各站 4 组流量序列的频率分布曲线均通过检验(图 3)。

龙川站、河源站根据起始时间在 1975 年之前的流量序列推求的 P3 分布曲线, 线型较为陡峭, 尾部

Table 3. Goodness-of-fit value of K-S test
表 3. K-S 检验的统计量检验值

时间	龙川	河源	博罗
1954~1983	0.1281	0.0915	0.1144
1963~1992	0.2011	0.1436	0.1444
1975~2004	0.0747	0.0707	0.1777
1980~2009	0.1224	0.0858	0.1671

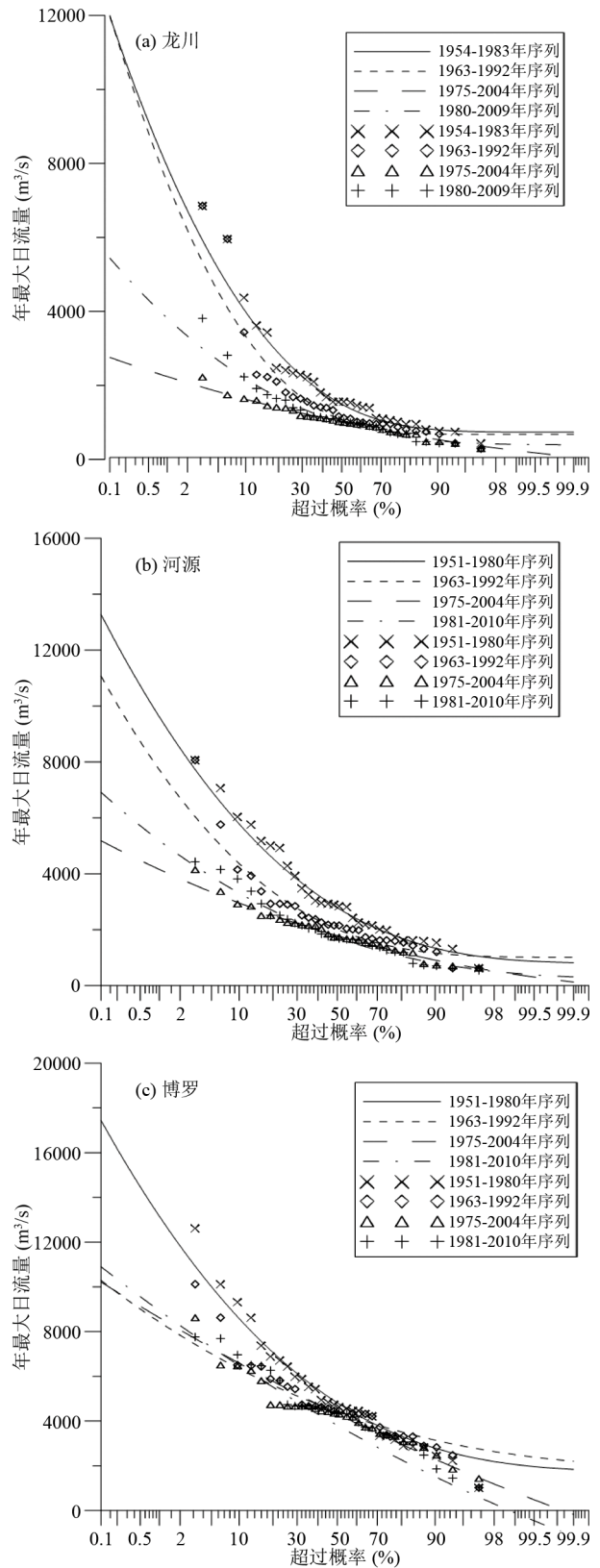


Figure 3. The flood frequency distribution curve of annual maximum daily flow of different series
图 3. 不同序列起始点的 P3 分布线型频率曲线

较高, 而根据起始时间在 1975 年之后的流量序列推求的分布曲线, 线型则变得较为平缓, 尾部显著降低(图 3)。虽然博罗站的线型变化幅度没有龙川站、河源站显著, 但根据起始时间在 1975 年之前的流量序列推求的分布曲线, 其线型的尾部仍是高于根据起始时间在 1975 年之前的流量序列推求的分布曲线(图 3)。

整体而言, 随着流量序列的逐年向后推移, P3 线型存在着由“陡峭”变为“平缓”的趋势。分布曲线的变化与流量序列的偏态系数 C_s 、变差系数 C_v 有

关^[19], 一般而言, C_s 值和 C_v 值越大, 分布曲线的尾部会越陡峭(表 4)。当 C_s 值较大时, 分布曲线尾部较陡; 当 C_s 值较小时, 分布曲线尾部较为平缓。而随着流量序列的逐年滑动, C_s 值存在着明显的下降趋势, 尤其是从“1973 年~2002 年”流量序列开始, 由于流量序列中包含三大水库兴建后的流量样本越来越多, 龙川站、河源站的 C_s 值出现了较为显著的减小, 博罗站的 C_s 值也有了一定程度的减小, 因此 1973 年之后, P3 分布曲线尾部变得较为平缓。

Table 4. Parameters of P3 distribution and Designed maximum daily flow of different series
表 4. 不同序列起始点的 P3 分布相关参数及设计流量

时间序列	龙川				河源				博罗			
	C_v	C_s	C_s/C_v	Q100	C_v	C_s	C_s/C_v	Q100	C_v	C_s	C_s/C_v	Q100
1951~1980	-	-	-	-	0.58	1.43	2.48	9612	0.45	1.25	2.79	13,159
1952~1981	-	-	-	-	0.60	1.62	2.73	9726	0.43	1.18	2.78	12,384
1953~1982	-	-	-	-	0.62	1.69	2.72	9890	0.42	1.16	2.76	12,164
1954~1983	0.75	2.20	2.92	7916	0.61	1.70	2.77	9767	0.41	1.31	3.22	12,289
1955~1984	0.77	2.23	2.90	8000	0.62	1.79	2.88	9846	0.34	0.74	2.22	9826
1956~1985	0.79	2.27	2.90	8100	0.63	1.89	2.99	9974	0.35	0.69	2.00	9647
1957~1986	0.82	2.42	2.96	8289	0.63	1.97	3.11	9896	0.36	0.81	2.28	9735
1958~1987	0.82	2.58	3.13	8127	0.61	1.97	3.24	9322	0.37	0.89	2.43	9872
1959~1988	0.83	2.53	3.03	8099	0.61	1.90	3.10	9266	0.34	1.36	4.01	10,222
1960~1989	0.84	2.61	3.10	8107	0.56	1.78	3.20	8103	0.35	1.45	4.21	10,178
1961~1990	0.87	2.78	3.20	8210	0.58	1.90	3.30	8266	0.34	1.32	3.88	10,169
1962~1991	0.85	2.67	3.13	7416	0.58	1.74	3.03	7656	0.29	0.88	3.02	8534
1963~1992	0.87	2.74	3.16	7495	0.58	1.85	3.18	7718	0.28	0.86	3.12	8431
1964~1993	0.85	2.87	3.37	7590	0.56	2.07	3.66	7854	0.28	1.00	3.58	8486
1965~1994	0.68	2.46	3.63	5413	0.45	1.45	3.24	5742	0.28	0.95	3.42	8445
1966~1995	0.67	2.35	3.53	5337	0.44	1.36	3.13	5655	0.27	0.97	3.58	8297
1967~1996	0.48	1.44	2.99	3424	0.38	0.78	2.08	4529	0.26	0.96	3.63	8230
1968~1997	0.47	1.41	2.98	3332	0.38	0.77	2.05	4531	0.29	0.64	2.22	8123
1969~1998	0.39	0.79	2.04	2595	0.35	0.67	1.91	4177	0.30	0.72	2.40	8259
1970~1999	0.40	0.63	1.56	2562	0.38	0.44	1.16	4117	0.33	0.49	1.50	8097
1971~2000	0.39	0.51	1.33	2360	0.39	0.58	1.51	4131	0.35	0.68	1.93	8866
1972~2001	0.38	0.47	1.23	2346	0.38	0.57	1.51	4105	0.38	0.79	2.10	9487
1973~2002	0.41	0.54	1.33	2363	0.40	0.53	1.31	4143	0.36	0.73	2.03	9343
1974~2003	0.39	0.54	1.37	2276	0.40	0.65	1.63	4103	0.37	0.69	1.84	9596
1975~2004	0.41	0.56	1.36	2239	0.43	0.65	1.51	4156	0.38	0.25	0.66	8621
1976~2005	0.48	1.18	2.48	2785	0.46	0.86	1.85	4586	0.38	0.26	0.68	8629
1977~2006	0.60	1.87	3.13	3760	0.50	1.13	2.26	5136	0.38	0.25	0.66	8620
1978~2007	0.59	1.84	3.09	3738	0.50	1.12	2.25	5130	0.41	0.24	0.59	8730
1979~2008	0.60	1.78	2.95	3831	0.50	1.11	2.23	5117	0.43	0.29	0.67	8655
1980~2009	0.61	1.71	2.78	3819	0.53	1.10	2.07	5176	0.47	0.18	0.38	8694
1981~2010	-	-	-	-	0.53	1.14	2.13	5186	0.49	0.32	0.66	8936

4.4. 指定标准下设计流量变化过程

变化环境背景下, 对同一设计标准 P (百年一遇), 东江非一致性洪水序列洪水设计值随时间由大变小(图4, 表4)。

1) 龙川站的设计最大日流量值先是较为平稳, 然后逐渐减小至趋于稳定, 最后再略有回升。设计流量的最大值出现在根据1957~1986年的流量序列推算的分布曲线上, 为 $8289 \text{ m}^3/\text{s}$, 之后设计流量逐渐减小并趋于稳定, 在1975~2004年的流量序列的分布曲线中达到最小值, 为 $2239 \text{ m}^3/\text{s}$, 而后设计流量又逐渐增加, 最终在1980~2009年的流量序列的分布曲线中为 $3819 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2) 河源站的设计最大日流量值变化规律同龙川站类似, 其设计流量最大值出现在1956~1985年的流量序列的分布曲线中, 为 $9974 \text{ m}^3/\text{s}$, 之后设计流量逐渐减小, 在1974~2003年的流量序列的分布曲线中达到最小值, 为 $4103 \text{ m}^3/\text{s}$, 而后设计流量有所回升, 在1981~2010年的流量序列中达到 $5186 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3) 博罗站的设计最大日流量值先是逐渐减小至趋于稳定, 最后有所增加。设计流量最大值出现在起始流量序列, 即1951~1980年的流量序列的分布曲线中, 为 $13,159 \text{ m}^3/\text{s}$, 之后设计流量逐渐减小, 在1970~1999年的流量序列的分布曲线中达到最小值, 为 $8097 \text{ m}^3/\text{s}$, 而后设计流量又在波动中增加, 在1981~2010年的流量序列中达到 $8936 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4.5. 频率分布参数与线型变化成因分析

水文环境发生变异的原因可以归结为气候变化

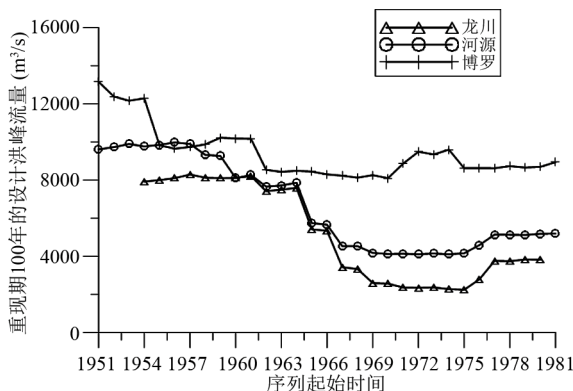


Figure 4. Change process of designed maximum daily flow with 100-year return period

图4. 重现期100年的设计洪峰流量变化趋势

(主要是降雨)和人类活动影响。

4.5.1. 降雨变化影响

洪水频率分布参数和线型随着年最大日流量序列的变化而改变, 而年最大日流量变化往往与该区域降雨的变化密切相关, 为研究东江流域各站年最大日流量与降雨量的关系, 结合研究区洪水历时, 取年最大日流量前7天内(包括发生日期)的降雨量之和进行趋势分析(图5)。

龙川和河源站年最大降雨序列与洪峰流量序列的变化趋势一致(图5, 表5), 但年最大日流量 Kendall 变化趋势均达到 0.01 的显著性水平, 而对应降雨下降趋势不显著。博罗流量对应年最大降雨序列更是轻微上升, 与年最大日流量变化趋势相反。说明东江流域变化环境后洪水频率分布线型的改变除了降雨影响外, 还有其他因素影响, 降雨不是主要影响因素。

4.5.2. 人类活动影响

人类活动的影响主要来自兴建大中小型水利枢纽, 对流域水文情势造成影响。水利枢纽设施的建设对洪峰流量的影响作用是不可忽视的, 而随着年最大日流量的变化, 洪水频率分布参数也将发生变化。上文对洪水频率分布参数变化规律的分析中, 发现分布参数主要集中在起始时间为1964年左右和起始时间为1973年左右的流量序列中发生突变。可以发现洪水频率分布参数发生变化的时间与水库建设的时间非常吻合。

新丰江水库和枫树坝水库建成后, 削减东江中、下游洪峰流量的效果显著。如新丰江水库建成前后(至1979年)的6次大洪水分析, 河源站削减洪峰流量, 1570~6560 秒立米。博罗站削减洪峰流量 2450~4090 秒立米; 且洪水愈大, 削峰效果越显著^[20]。大中型水库对洪峰有较大的削减作用, 因此年最大日流量在1974年之后波动幅度减小, 洪水频率分布曲线由陡峭变为较为平缓。

5. 结论

运用 Pearson-III型分布函数对东江流域龙川、河源和博罗水文站年最大日流量进行系统分析。

1) 东江流域年最大日流量均呈显著下降趋势, 并产生非一致性。流量拐点集中发生在1974年和1976

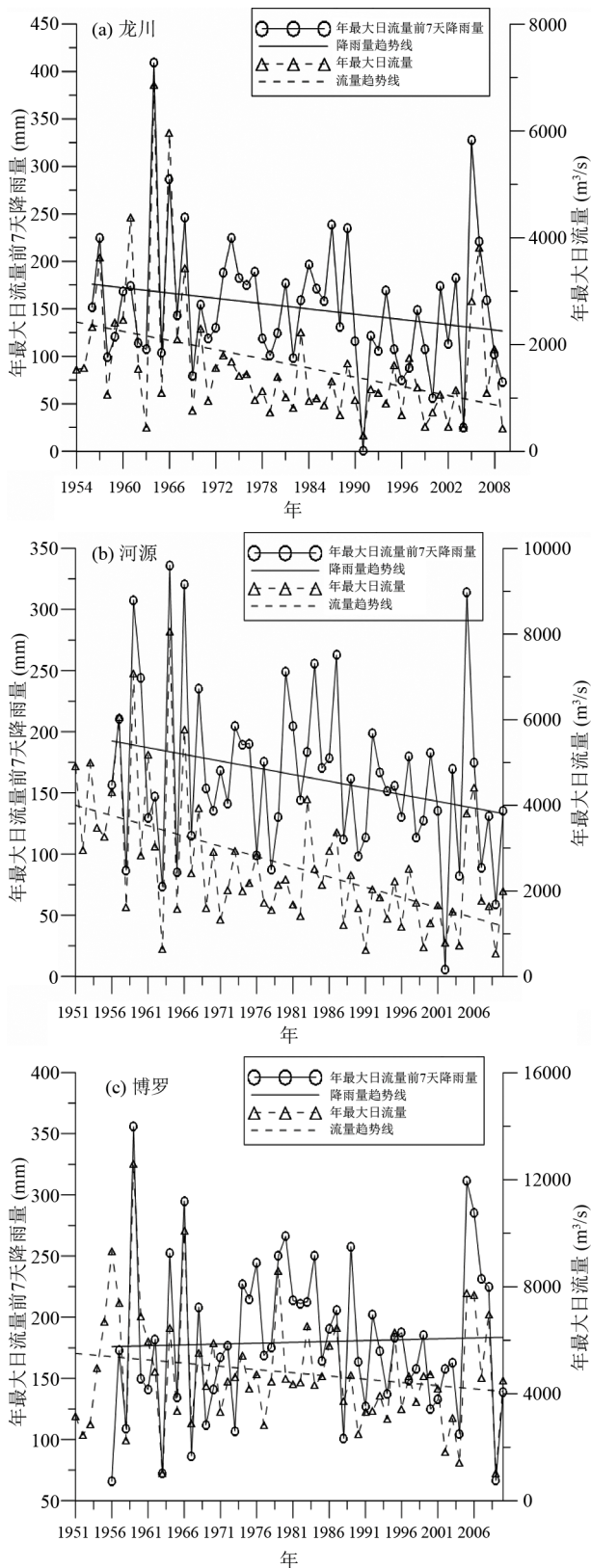


Figure 5. Change process of the sum of seven-days rainfall value before the annual maximum daily flow
图 5. 东江流域各站年最大日流量前 7 天降雨量的变化趋势

Table 5. Goodness-of-fit value of M-K trend test about hydrology factors of Dongjiang Basin
表 5. 东江流域水文要素 kendall 趋势检验统计量

水文要素	龙川	河源	博罗
降雨	-1.51	-1.66	0.13
年最大日流量	-3.18	-4.20	-1.19

年。年最大日流量下降的主要原因除了降雨外, 大中型水库调蓄影响不可忽视。

2) 变化环境下, 非一致性洪水序列引起分布参数改变, 已导致 P3 分布曲线高水尾端特征由“陡峭”变为“平缓”。

3) 随着分布参数的演变, 指定标准 P(百年一遇)下, 其相应设计流量值也时刻发生改变, 量级表现为由大逐渐减小。

4) 在变化环境情况下, 洪水重现期往往不是描述一场洪水的一个固定不变的属性。需进一步采用非一致性水文序列频率计算。

参考文献 (References)

- [1] SCHIERMEIER, Q. Increased flood risk linked to global warming. *Nature*, 2011, 470(7334): 378-381.
- [2] EASTERLING, D. E., MEEH, A. G., PARMESAN, C., et al. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289: 2068-2074.
- [3] MILLY, P. C. D., WETHERALD, P. T. Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, 2002, 415(6871): 514-517.
- [4] 谢平, 陈广才, 夏军. 变化环境下非一致性年径流序列的水文频率计算原理[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2005, 38(6): 6-15.
- [5] XIE Ping, CHEN Guangcai and XIA Jun. Hydrological frequency calculation principle of inconsistent annual runoff series under changing environments. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 2005, 38(6): 6-15. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] LIANG Zhongmin, HU Yiming and WANG Jun. Advances in hydrological frequency analysis of non-stationary time series. *Advances in Water Science*, 2011, 22(6): 864-871. (in Chinese)
- [8] 汪丽娜. 变化环境下的洪水特性研究及特征量重构的探讨以武汉为例[D]. 广州: 中山大学, 2010: 14-15.
- [9] WANG Li'na. Study on flood characteristic and discussion on restructured characteristic quantity under the change environment in the Wujiang Basin. *Guangzhou: Sun Yat-sen University*, 2010: 14-15. (in Chinese)
- [7] STRUPCZEWSKI, W. G., SINGH, V. P. and FELUCH, W. Non-stationary approach to at-site flood frequency modeling I. Maximum likelihood estimation. *Journal of Hydrology*, 2001, 248(1-4): 123-142.
- [8] CUNDERLIK, J. M., BURN, D. H. Non-stationary pooled flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 2003, 276(1-4): 210-223.
- [9] KHALIQ, M. N., OUARDA, T. B. M. J., et al. Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3-4): 534-552.

- [10] SINGH, V. P., WANG, S. X. and ZHANG, L. Frequency analysis of nonidentically distributed hydrologic flood data. *Journal of Hydrology*, 2005, 307(1-4): 175-195.
- [11] ZHANG, Q., XU, C. Y., YU, Z., et al. Multifractal analysis of streamflow records of the East River Basin (Pearl River), China. *Physica A*, 2009, 388: 927-934.
- [12] 王兆礼. 气候与土地利用变化的流域水文系统响应——以东江流域为例[D]. 广州: 中山大学, 2007.
WANG Zhaoli. Effects of climatic change and LUCC on hydrological system in the East River Basin, South China. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2007. (in Chinese)
- [13] 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. Advance and assessment of design flood methods. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese)
- [14] HOSKING, J. R. M. L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society (Series B)*, 1990, 52: 105-124.
- [15] 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)
- [16] WAYLEN, P., WOO, M. K. Prediction of annual floods generated by mixed processes. *Water Resources Research*, 1982, 18(4): 1283-1286.
- [17] EL ADLOUNI, S., BOBEE, B. and OUARDA, T. B. M. J. On the tails of extreme event distributions in hydrology. *Journal of Hydrology*, 2008, 355: 16-33.
- [18] YEVJEVICH, V. Probability and statistics in hydrology. Fort Collins: Water Resources Publications, 1972: 214-232.
- [19] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
ZHAN Daojiang, YE Shouze. Engineering hydrology. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese)
- [20] 陈德雅, 林振勋. 东江流域水资源综合利用规划回顾[J]. 水利规划, 1997, 1: 24-29.
CHEN Deya, LIN Zhenxun. Review of water resources synthetic plan of Dongjiang Basin. *Water Resources Planning*, 1997, 1: 24-29. (in Chinese).