

变化环境下珠江流域洪水频率变化特征、成因及影响(1951—2010年)^{*}

顾西辉^{1,2}, 张强^{1,2**}, 刘剑宇^{1,2}, 张正浩^{1,2}

(1: 中山大学水资源与环境系, 广州 510275)

(2: 中山大学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 510275)

摘要: 气候变化和人类活动导致珠江流域水文变化, 变化前后洪水频率分布显著不同。运用滑动秩和(Mann-Whitney U test)结合Brown-Forsythe、滑动T、有序聚类和Mann-Kendall检验法, 并用累积距平曲线法获取年最大流量序列详细信息, 综合确定样本最佳变化节点, 并对水文变化成因做了系统分析。在此基础上, 对整体序列、变化前后序列用线性矩法推求广义极值分布参数以及不同重现期设计流量。结果表明:(1) 西江大部以及北江流域最佳变化节点在1991年左右; 东江流域最佳变化节点与该流域内3大控制性水库建成时间基本吻合;(2) 变化后, 西江、北江年最大流量持续增加, 洪峰强度增大, 尤其是西江干流年最大流量显著增加; 东江流域年最大流量显著减小, 洪峰强度降低;(3) 变化后, 西江与北江洪水风险增加, 尤其是下游珠三角地区本身受人类活动显著影响, 加之西江与北江持续增加的洪水强度, 珠三角地区发生洪水的强度及频次加剧, 而东江洪水风险减小。此研究对于珠江流域在变化环境下的洪水风险评估与防洪抗灾具有重要意义。

关键词: 水文变化; 洪水频率; 滑动秩和检验; 累积距平曲线法; 珠江流域

Characteristics, causes and impacts of the changes of the flood frequency in the Pearl River drainage basin from 1951 to 2010

GU Xihui^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, LIU Jianyu^{1,2} & ZHANG Zhenghao^{1,2}

(1: Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, P. R. China)

(2: Guangdong University Key Laboratory of Water Cycle and Security in South China, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, P. R. China)

Abstract: Climate changes and human activities have led to significant variations in the hydrological conditions in Pearl River drainage basin. Distributions of flood frequencies before and after the hydrological change are significantly different. We used moving rank sum test (Mann-Whitney U test) and Brown-Forsythe, Sliding T, Ordered Cluster, and Mann-Kendall (MK), with cumulative departure curve method (CSDMC) for annual maximum discharge (AMD) details, to analysis hydrological changes and their causes. Then, L-moment was used to evaluate the parameters of generalized extreme value distributions of the whole, before and after the hydrological changes of annual maximum discharge series. The design flow values of different return periods were calculated. Results show that: (1) Hydrological changes at the stations in Beijiang River and most of Xijiang River occurred in 1991, and hydrological regulation of the three big reservoirs was the main factor in Dongjiang River. (2) After hydrological change, annual maximum discharge and flow peak intensity were increased in Xijiang River and Beijiang River, especially in the main stream of Xijiang River while opposite situation occurred in Dongjiang River. (3) After hydrological change, flood risk had been increased in Xijiang River and Beijiang River. In particular, because the Pearl River Delta region itself has been strongly affected by human activities, persistently increased flood intensity had occurred in the Xijiang River and Beijiang River. The Pearl River Delta floods and flood frequency had been increased significantly, while flood risk had been decreased in Dongjiang River. This study is very important for assessing the flood risks and flood disasters in the Pearl River drainage basin.

Keywords: Hydrological changes; flood frequency; Mann-Whitney U test; CSDMC; Pearl River drainage basin

* 国家自然科学基金项目(41071020)和新世纪优秀人才支持计划项目联合资助. 2013-09-02 收稿; 2014-01-14

收修改稿. 顾西辉(1990~), 男, 硕士研究生; E-mail: guxihui421@163.com.

** 通信作者; E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn.

在气候变化和人类活动共同影响下,流域径流形成环境背景“一致性”已不复存在^[1],流域径流序列发生显著变异。忽略水文序列的变异性,会导致洪水概率分布计算偏差^[2],继而导致流域开发的防洪、抗旱等水利工程面临潜在风险^[1]。研究变化环境下洪旱水文极值发生规律及影响,能合理、有效地提高区域应对极端水文事件水平,尤其对人口集中、经济发达及对环境变化敏感区域具有重要意义^[3]。国内水文学者已意识到水文特征变化及相应水资源问题的重要性并取得不少成果,这些研究主要集中在我国长江流域以北地区^[4-6]。张强等通过研究发现,长江流域^[7]和珠江流域^[8]降水强度均在增加,意味着将会增加潜在的洪水风险和相应的洪水灾害。在珠江流域,流域水文过程已经受到人类活动的强烈影响,比如兴建控制性水库、大规模挖沙、围堰筑坝、束水归槽等^[9-10]。陈晓宏等研究发现,华南地区的一些河流几乎年年出现超 20 年一遇甚至 50 年一遇洪水,水文过程及其特征重现期明显出现异变^[4]。目前的研究多集中于检验径流序列周期、趋势和突变^[11-12]或者珠江流域局部区域极端洪水事件变化趋势^[13],缺乏对整个珠江流域洪水事件强度、频率的变化研究。珠三角地区是中国经济最发达的地区之一,珠江流域的洪水演变对于珠三角经济发展,对于珠三角及其周边地区城市供水具有重要意义,因此,系统研究在气候变化和人类活动双重影响下,珠江流域洪水变化、发生频率和风险,对于珠江流域水资源管理、洪水管理等具有重要理论与现实意义。

本研究针对整个珠江流域水文极值变化特征。珠江流域是华南大河流域,主要分为 4 个子流域——西江、北江、东江和珠江三角洲河网区。珠江三角洲河网区涵盖广东省、香港、澳门等地区,其地势低,水位及洪峰流量受到上游西江、北江的巨大影响,同时由于珠江三角洲地区内城市社会、经济高度发展,导致其对洪水、干旱以及台风引发的闪洪灾害有强烈的敏感性。因此有必要研究在快速的环境变化下洪水频率的变化特征及潜在的原因,为有效预防洪水灾害提供科学和实际的帮助。

1 研究区域和数据

珠江流域面积为 $45.37 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中中国境内部分流域面积 $44.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1);从流量上看,珠江流域为中国第二大河,多年平均净流量为 $3360 \times 10^8 \text{ m}^3$;多年平均降水量为 1200~2200 mm,总的的趋势是由东向西递减。珠江流域的水系,由西江、北江、东江、珠江三角洲河网区组成。西江为珠江的主干流,全长 2214 km,北江干流全长 468 km,东江干流全长 520 km,三角洲河网区纵横交错,相互贯通。珠江洪水主要由暴雨组成,由于流域面积广、暴雨强度大,上中游高山丘陵地区洪水汇流快,中游又无湖泊调蓄,因此遇上大面积连续暴雨,往往形成峰高、量大、历时长的洪水,危及中下游沿江地势低洼、人口众多、经济发达的城镇和广

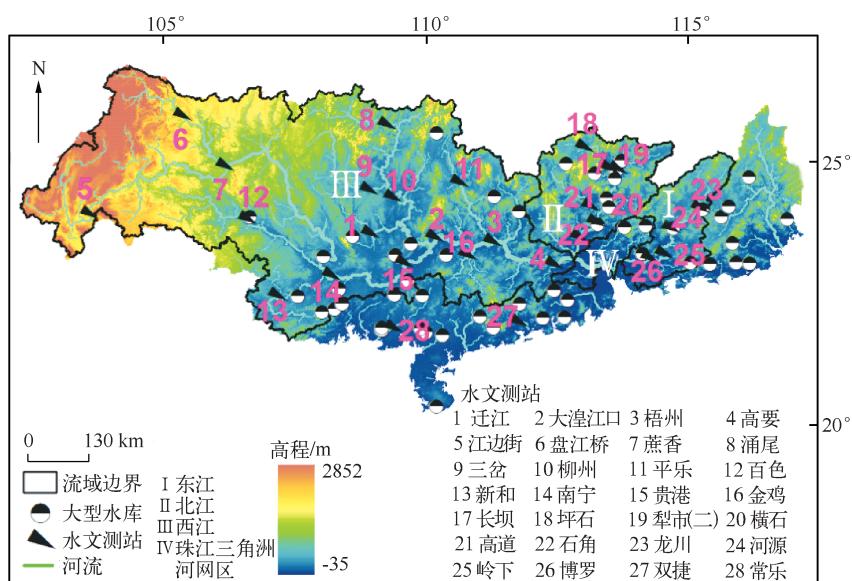


图 1 研究区域地形特征和位置

Fig. 1 The topographical characteristics and location of the study area

大农田,制约经济发展,影响社会安定^[14].

本文选取珠江流域位于干流和主要支流上的28个水文测站的年最大流量数据进行统计分析,序列长度为1951—2010年,共有60年数据。数据来源于广东省水文局,经过系统整编,质量可靠。水文测站点的地理位置分布见图1。

2 研究方法

2.1 确定最佳变化节点

雷红富等^[15]用统计实验的方法对常用的10种水文变异诊断方法进行研究,认为滑动秩和检验效果最优,Brown-Forsythe、Bayesian、里海哈林、有序聚类、滑动T次之,Mann-Kendall(MK)、滑动F再次之,信息二分割法、R/S检验法最差。本文使用滑动秩和法检验出所有水文变化节点^[6],用Brown-Forsythe、滑动T、有序聚类和MK检验法进行验证,结合年最大流量变化过程(应用累积距平曲线法分析,CSDMC)确定水文序列的最佳变化节点^[16]。最后,结合气候变化和人类活动情况,对水文变化节点进行成因分析,找出水文变化背后的可能影响因素。

2.2 水文序列变化前后趋势和频率分布

非参数统计方法Mann-Kendall可以检测时间序列的趋势,不需要正态性或者线性假设,所以被世界气象组织(World Meteorological Organization)强烈建议广泛使用^[17]。时间序列自相关性对趋势检测结果有重要影响,所以在趋势检测之前,先进行时间序列的自相关性分析。

按照以下步骤进行水文极值序列的概率分析:(1)选择6种广泛使用的极值分布^[18]进行概率分析:耿贝尔分布(极值一型,Gumbel)、广义极值分布(General Extreme Value distribution,GEV)、广义逻辑斯蒂分布(General Logistic distribution,GLO)、广义对数正态分布-3参数(General Log Normal distribution,GNO)、广义帕累托分布(General Pareto distribution,GPA)和皮尔逊-3型分布(Pearson type III distribution,P-III)。(2)以最佳变化节点为基准点,将水文序列分为两个子序列——变化前、变化后序列。对珠江流域28个水文测站每个测站年最大流量序列、变化前序列和变化后序列分别用这6种极值分布进行拟合。用线性矩法进行极值分布参数估计^[19]。(3)用Kolmogorov-Smirnov's statistic D(K-S D)^[20]方法进行极值分布拟合优度检验。(4)K-S D值最小的分布作为最佳拟合分布,最佳拟合分布用来描述水文极值的统计特性。(5)分析每个测站年最大流量、变化前序列和变化后序列10、30、50、70、90、100年一遇的设计洪水值变化特征。

3 研究结果

3.1 水文序列的自相关性分析

西江迁江站、北江长坝站、东江河源站和沿海地区常乐站自相关性分析结果表明,珠江流域28个水文测站年最大流量序列具有很好的独立性(图2),这为下面的研究提供了基础的技术支撑。

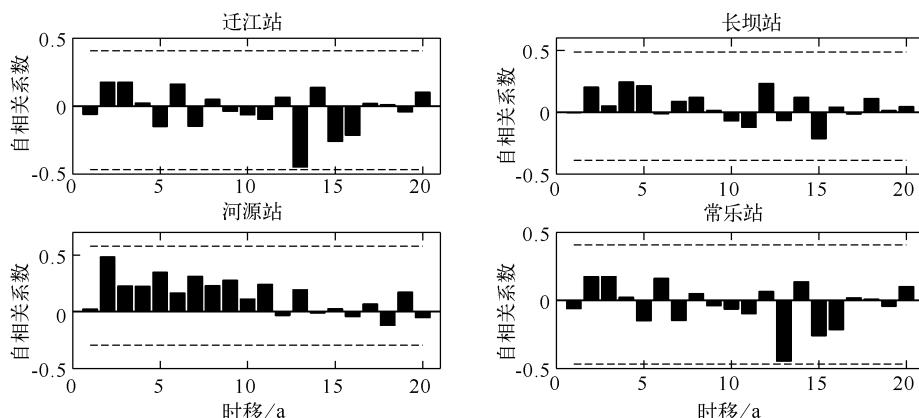


图2 年最大流量序列的自相关性分析(虚线表示95%置信区间)

Fig. 2 Autocorrelation analysis of annual maximum discharge series

序列变化节点在端点时,其结果可信度较差^[19],不予采信。当滑动秩和、Brown-Forsythe、滑动T、有序聚类和Mann-Kendall 5种检验方法检验结果完全一致时,取5种检验方法的一致结果作为最佳水文变化节点,例如大湟江口站、高要站、柳州站等。当5种检验方法检验结果不一致时,分析该站点年最大流量变化过程(CSDMC分析法),结合年最大流量丰枯转变时间节点确定最佳水文变化节点(表1,限于篇幅略去了滑动秩和检验出来的所有水文变化节点及CSDMC检验过程图)。19个水文测站变化前后年最大流量序列的均值变化率在20%以上,6个水文测站(涌尾、百色、坪石、犁市(二)、龙川和河源)甚至达到了40%以上,只有3个水文测站(江边街、贵港和双捷)变化率低于10%。可见珠江流域大部分水文测站变化前后年最大流量序列均值发生了明显改变。

表1 4种方法检验的水文变化点及综合确定的最佳变化点

Tab. 1 The change points are tested by 4 test methods and the best change point identified comprehensively

序号	水文测站	Brown-Forsythe	滑动T	有序聚类	MK	最佳变化点
1	迁江	1963年	2006年	2006年	1953年	1963年
2	大湟江口	1991年	1991年	1991年	1991年	1991年
3	梧州	1991年	1991年	1991年	1993年	1991年
4	高要	1991年	1991年	1991年	1992年	1991年
5	江边街	2002年	1971年	1971年	—	1971年
6	盘江桥	2002年	2002年	2002年	1968年	1984年
7	蔗香	1978年	1978年	1978年	1962年	1978年
8	涌尾	1965年	1991年	1991年	1965年	1991年
9	三岔	1992年	1992年	1992年	1990年	1990年
10	柳州	1991年	1991年	1991年	1991年	1991年
11	平乐	1991年	2001年	2001年	1980年	1991年
12	百色	2002年	2002年	2002年	2005年	2001年
13	新和	2000年	2000年	2000年	1999年	1991年
14	南宁	1986年	1986年	1986年	1986年	1986年
15	贵港	1965年	1953年	1953年	1991年	1991年
16	金鸡	1998年	1976年	1976年	1984年	1976年
17	长坝	1963年	1991年	1991年	1976年	1991年
18	坪石	1992年	2005年	2005年	1991年	1992年
19	犁市(二)	1992年	2005年	2005年	2005年	1992年
20	横石	1991年	1993年	1993年	1993年	1991年
21	高道	1992年	2009年	2009年	1971年	1992年
22	石角	1991年	1991年	1991年	1991年	1991年
23	龙川	1978年	1968年	1968年	1975年	1976年
24	河源	1957年	1968年	1968年	1973年	1968年
25	岭下	1987年	1966年	1966年	1988年	1987年
26	博罗	1987年	1987年	1987年	1984年	1987年
27	双捷	1956年	1998年	1998年	1999年	1976年
28	常乐	1963年	1953年	1953年	2004年	1972年

3.2 珠江流域年最大流量变化前后趋势变化

珠江流域变化前和变化后序列,趋势没有发生改变的测站有5个,占全部28个测站的17.8%,且在珠江流域分布较零散(图3)。珠江流域大部分站点年最大流量变化前、后序列趋势发生了改变。变化前序列,有12个测站呈上升趋势,其中6个呈显著上升趋势,主要分布在流域西南部和东部;16个测站呈下降趋势,没有测站呈显著下降趋势,主要分布在流域中北部。变化后序列,13个测站呈上升趋势,其中7个测站呈显著上升趋势,主要分布在西江干流和北江流域;15个测站呈下降趋势,其中4个测站呈显著下降趋势,主要分布在流域西南部和东部。珠江流域年最大流量变化前后,呈上升趋势或者下降趋势的总测站数没有明显变

化。变化后西江干流和北江流域洪水风险加剧而东江流域洪水风险减小。

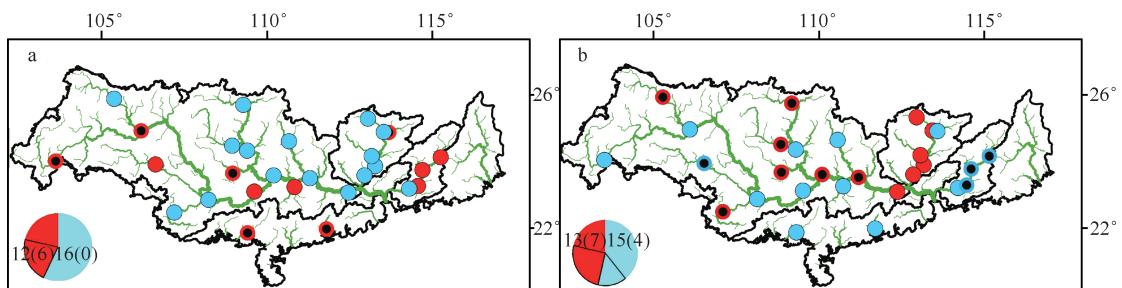


图3 珠江流域年最大流量变化前(a)和变化后(b)趋势变化分布
(红圆饼表示上升趋势,蓝圆饼表示下降趋势,内有黑点饼表示趋势显著)

Fig. 3 The trend of annual maximum discharge series of before and after change in Pearl River drainage basin

3.3 变化前后概率极值分布函数选择

本文用6种极值分布函数分别拟合珠江流域28个水文测站年最大流量序列、变化前序列和变化后序列,选取最小的K-S D值对应的分布函数作为每个测站最佳极值拟合分布(表略)。结果表明:以整体序列进行分析时,最佳拟合分布GEV有8个,占全部28个测站的29%;GLO和P-III分别有7个,分别占全部28个测站的25%;GNO有4个,占全部28个测站的14%;Gumbel有2个,占全部28个测站的7%。对于最佳拟合极值分布不是GEV分布的测站,GEV分布的K-S D值也比较小。

变化前后序列只有6个测站最佳拟合分布函数相同,分布线型没有改变,占全部28个测站的21%。因此大部分站点变化前后序列,概率分布线型发生变化,水文一致性遭到破坏。变化前序列,GEV分布是出现次数最多的最佳拟合极值分布,共出现10次,占全部28个测站的29%;变化后序列,GEV分布仍然是出现次数最多的最佳拟合极值分布,共出现12次,占全部28个测站的43%;而整个珠江流域出现次数最多的最佳拟合极值分布仍为GEV分布。由此,本文选取GEV作为珠江流域28个测站年最大流量序列、变化前序列和变化后序列的最佳拟合极值分布。

3.4 变化前后设计流量值变化特征

不同重现期(年)珠江流域设计流量值的空间分布表明(图4),相应重现期对应的设计流量值从上游往下游累积,设计流量值沿着河流流向增加。从高程上看,高程较低的站点设计流量值较大,高程较高的站点设计流量值较小。珠江流域中下游地区(西江干流、北江中下游、东江中下游)设计流量值较大,这些区域高程较低,一旦发生洪水灾害,造成的损失往往范围广、灾害大。区域IV是珠江三角洲,同时也是我国社会、经济最发达的地区之一,对洪水灾害具有强烈的敏感性。区域IV上游测站,如西江高要站、北江石角站和东江博罗站,相应重现期的设计流量值在相应流域站点最高。这些站点洪峰流量一旦在珠江三角洲地区遭遇重合,加上珠江三角洲地势较低以及下游潮汐顶托洪水,极易造成洪水雍高、水位上升。例如2005年6月,珠江流域西江、北江和东江同时遭遇大洪水之际,又恰逢珠江口出现天文潮顶托,珠江三角洲腹部出现超百年一遇洪水水位,最终造成广西、广东两省超过130亿元的损失。

西江流域与北江流域大部分地区变化前序列比整体序列下的设计流量值低(图5)。西江流域洪峰流量变化强度在-10%~0之间,而北江流域变化强度在-20%~-10%之间;东江流域大部分地区设计流量值高于整体序列下设计流量值,随着重现期的增加,变化强度处于20%~40%的区域在减小。变化前,整个珠江流域共有19个测站(西江12个、北江6个、东江0个及常乐站)设计流量值低于整体序列下的设计流量值,占全部28个测站的68%,百年一遇设计流量值减幅最大达到-42%,位于北江坪石站;共有9个测站(西江4个、东江4个、北江0个及双捷站)设计流量值高于整体序列下的设计流量值,占全部28个测站的32%,百年一遇设计流量值增幅最大达到34%,位于东江龙川站。

西江流域大部分地区和整个北江流域变化后序列比整体序列下的设计流量值高,变化强度多位于10%~30%之间,并且随着重现期的增加,这一区域面积随之增加;北江流域变化强度多位于10%~30%之间,坪石

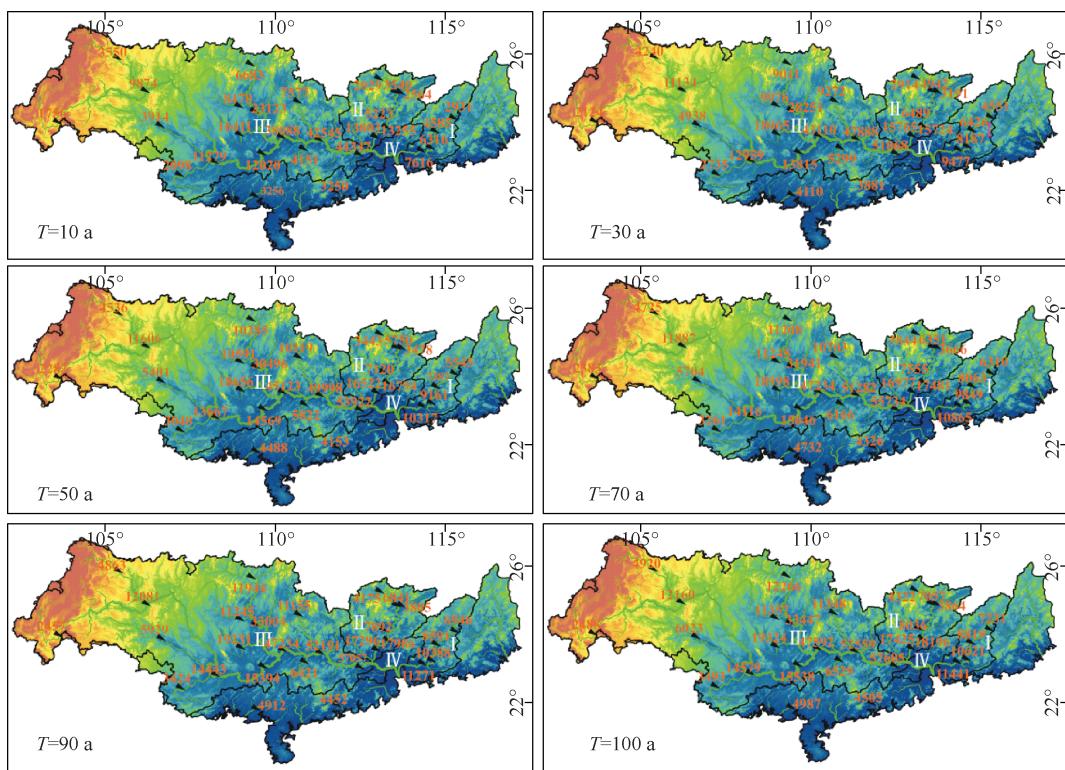


图4 不同重现期珠江流域设计流量值的空间分布(以全部时间序列的年最大流量值作为样本)

Fig. 4 The design discharge values maps corresponding to different return periods in Pearl River drainage basin

站最大达到30%~50%;整个东江流域变化后序列低于整体序列下的设计流量值,变化强度位于-30%~-10%之间,龙川、河源站最高达到-50%~-30%(图6).变化后,西江、北江高流量值出现频率相对变大,较大量级的洪峰流量出现概率增加,潜在洪水风险升高;用整体序列进行频率分析时会过高估计今后的洪水重现期,反之,用整体序列对水利工程进行设计洪水计算和规划时,会低估设计重现期的洪峰流量,这将给水利工程带来潜在风险.变化后,东江流域高流量出现频率相对降低,较大量级的洪峰流量出现概率减少,潜在的洪水风险变小,并且用整体序列进行频率分析时会过低估计今后洪水重现期.整个珠江流域,共有19个测站(西江12个、北江6个、东江0个及常乐站)变化后序列高于整体序列下的设计流量值,占全部28个测站的68%,百年一遇设计流量值,增幅最大达到123%,位于西江百色站;共有9个测站(西江4个、东江4个、北江0个及双捷站)变化后序列低于整体序列下的设计流量值,占全部28个测站的32%,百年一遇设计流量值减幅最大达到43%,位于东江河源站.

西江、北江绝大部分区域变化前序列相对变化后序列设计流量在增加,增幅主要在0~40%之间;东江整个区域设计流量在减少,减幅主要在-60%~-20%之间(图7).相比图6,设计流量值变化幅度更大,增幅和降幅均如此(图6中西江、北江变化强度多位于10%~30%之间,东江变化强度多位于-30%~-10%之间),意味着变化后和变化前序列相应重现期对应的设计流量值相差更大,变化前、后序列呈现出更加明显的非一致性.变化后,西江、北江较大洪峰量级出现概率增加,而东江流域较大洪峰量级出现概率变小.水文过程变化破坏了年最大流量序列样本一致性,如不考虑水文过程变化,洪水重现期及相应设计流量分析结果会给现有的防洪、抗旱等工程带来潜在风险.

4 讨论

整个珠江流域近60年来气候变化明显.流域平均温度呈显著上升趋势,上升速率为0.1°C/10 a,并在

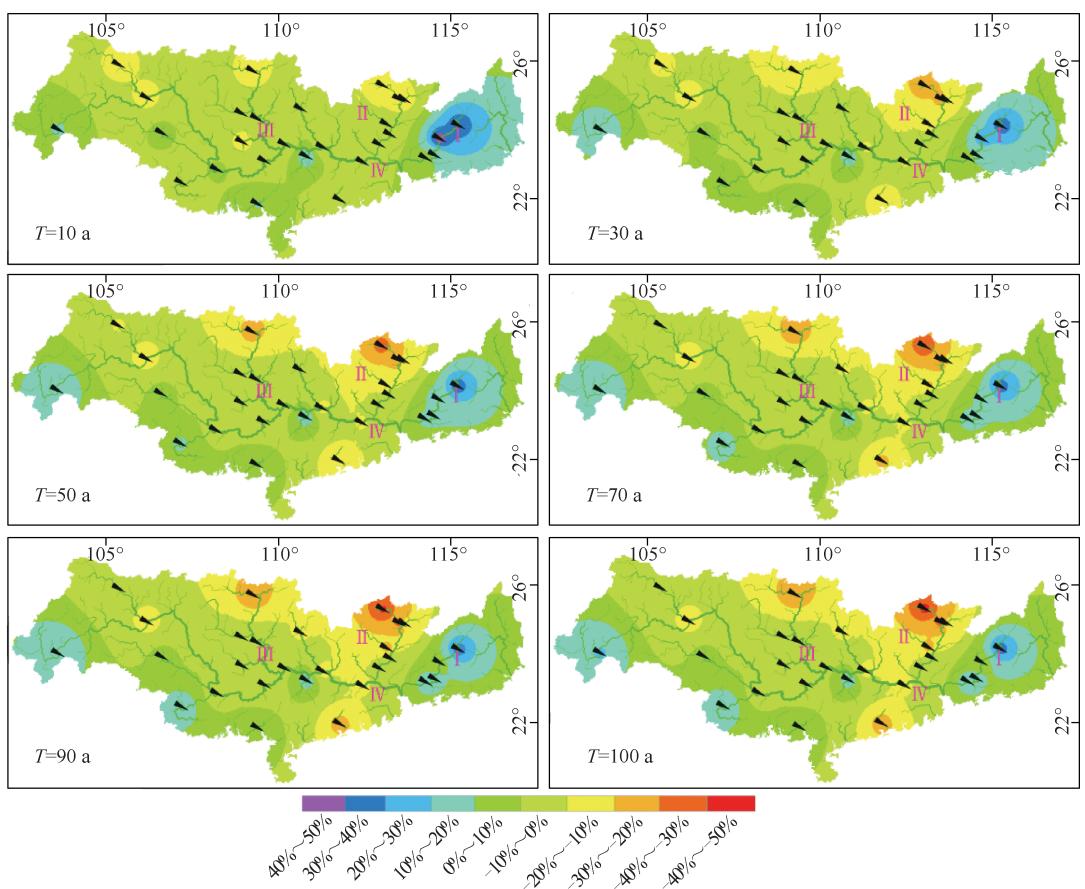


图5 珠江流域变化前洪峰流量相对于整个时间序列(1951—2010年)的强度变化
(正值百分数表示洪峰流量强度增加,负值百分数表示洪峰流量强度减小)

Fig. 5 The changes in peak flow of time series between before change points and the whole (during 1951–2010) in Pearl River drainage basin

1987年发生了明显变暖突变^[21]。1960—2005年珠江流域中部和上游降水减少,整个珠江流域降水天数减少,降水密度却在增加,尤其是流域中部和东部地区;整个珠江流域长历时降水在减少,短历时降水(如2~5 d降水)显著增加^[22]。整个流域气候变化对流域内所有水文站点水文变化情况造成重要影响。

在流域气候变化的大环境下,流域各个区域内水文站点水文情况的变化具有其自身的规律。

西江流域平均年最大1、3 d降水量呈上升趋势,1958—2007年总体变化的倾向律分别为1.42、1.53 mm/10 a,但是上升趋势均不显著;西江流域东部、东北部年最大1、3 d降水量增加趋势明显,其余区域呈递减趋势^[23]。1960—2005年,西江、北江下游和北盘江降水集中指数显著增加^[8]。人类活动方面,西江现有大型水库36座,总库容 $290 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。对干流或主要一级支流洪水具有调节作用的水电站主要有天生桥一级、龙滩、百色、登碧河、大王滩、青狮潭、龟石和爽岛等,其中对西江干流桂平至梧州河段较大洪水有一定影响的主要是天生桥一级、龙滩和百色3座水电站^[24]。这些水库主要聚集在西江流域中部、中下游地区。水库对控制西江流域洪峰量级具有重要作用。近些年,随着社会经济的发展,西江流域土地利用方面发生了显著变化。以梧州市为例,解放初期市区面积只有 1.8 km^2 ,1995年市区面积扩大至 16.1 km^2 。尤其是改革开放后,城市化速度明显加快,城市用地急剧上升,1978—1995年城市用地面积平均增速为 $0.5 \text{ km}^2/\text{a}$,比1950—1978年增长速度快1倍多^[25]。气候变化和人类活动的共同作用下,西江流域各站点在不同的主要影响因子下呈现出不同的变化趋势。例如位于上游的江边街站、蔗香站由于降水量的减少,年最大流量呈下降趋势;受水

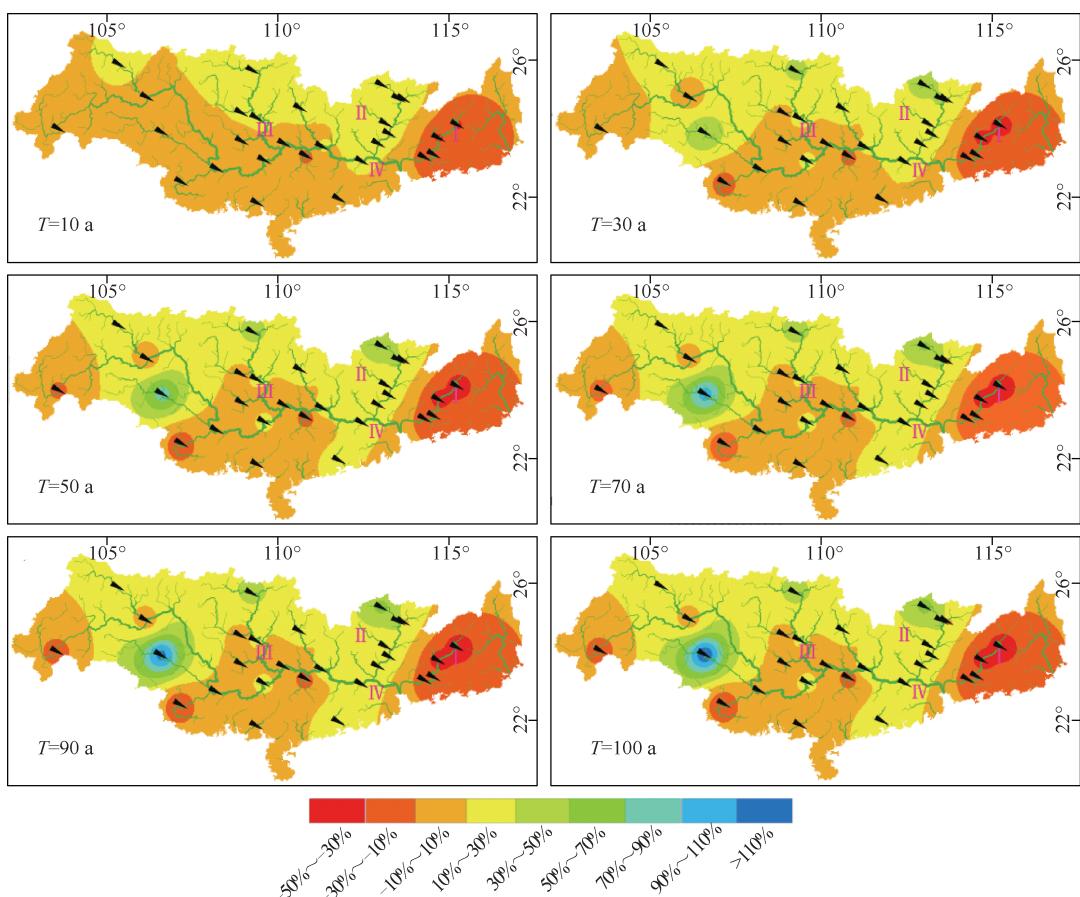


图 6 珠江流域变化后洪峰流量相对于整个时间序列(1951—2010 年)的强度变化

(正值百分数表示洪峰流量强度增加,负值百分数表示洪峰流量强度减小)

Fig. 6 The changes in peak flow of time series between after change points and the whole
(during 1951—2010) in Pearl River drainage basin

库调节作用影响的百色站,在上游百色水库(集水面积 19600 km^2 、最大库容 $56.6 \times 10^8 \text{ m}^3$)、澄碧河水库(集水面积 2000 km^2 、总库容 $11.3 \times 10^8 \text{ m}^3$)调节下,年最大流量呈显著下降趋势;西江干流(代表站点迁江、大湟江口、梧州、高要站)尽管有岩滩水库、大藤峡水库和长洲水库(3 大水库总集水面积为 $60.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、总库容为 $119.1 \times 10^8 \text{ m}^3$)的调节,但是由于受到降水增加以及支流龙江、柳江、蒙江、桂江等汇流的影响,年最大流量反而呈显著上升趋势。综合分析,西江流域各站点水文变化受主要影响因子不同,呈现出不同的变化节点和趋势。

北江流域地势为北高南低,山脉走向与偏南暖湿气流成直交或斜交,在迎风坡易产生大量降水,并沿山脉走势极易由支流汇流到下游干流。流域降水序列在 1992 年发生了一次跃变^[12],1992 年之后降水量增加^[26]。1982—2003 年,大部分地区 NDVI(归一化植被指数)变化率为 -3.05 ,呈不显著下降趋势。人类活动方面,北江流域大型水库的总库容已经超过 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要水利工程有南水水库、孟洲坝水库、白石窟水库、飞来峡水库等,但是没有形成对整个流域水文过程的控制性作用。流域内水文站点年最大流量序列尽管有上述大型水库消峰错峰影响,在 1991 年之后依然呈上升趋势。李艳等通过还原北江流域天然径流量,发现降水是北江流域发生跃变的原因,城镇化导致的下垫面变化是径流增加的原因^[12]。可见,流域内降水增加、北高南低的地势地貌以及植被覆盖率降低等综合导致了北江流域年最大流量呈上升趋势。

东江流域年最大流量序列变化时间点分别为 1968、1976、1987 年,与东江流域 3 大控制性水库——新丰

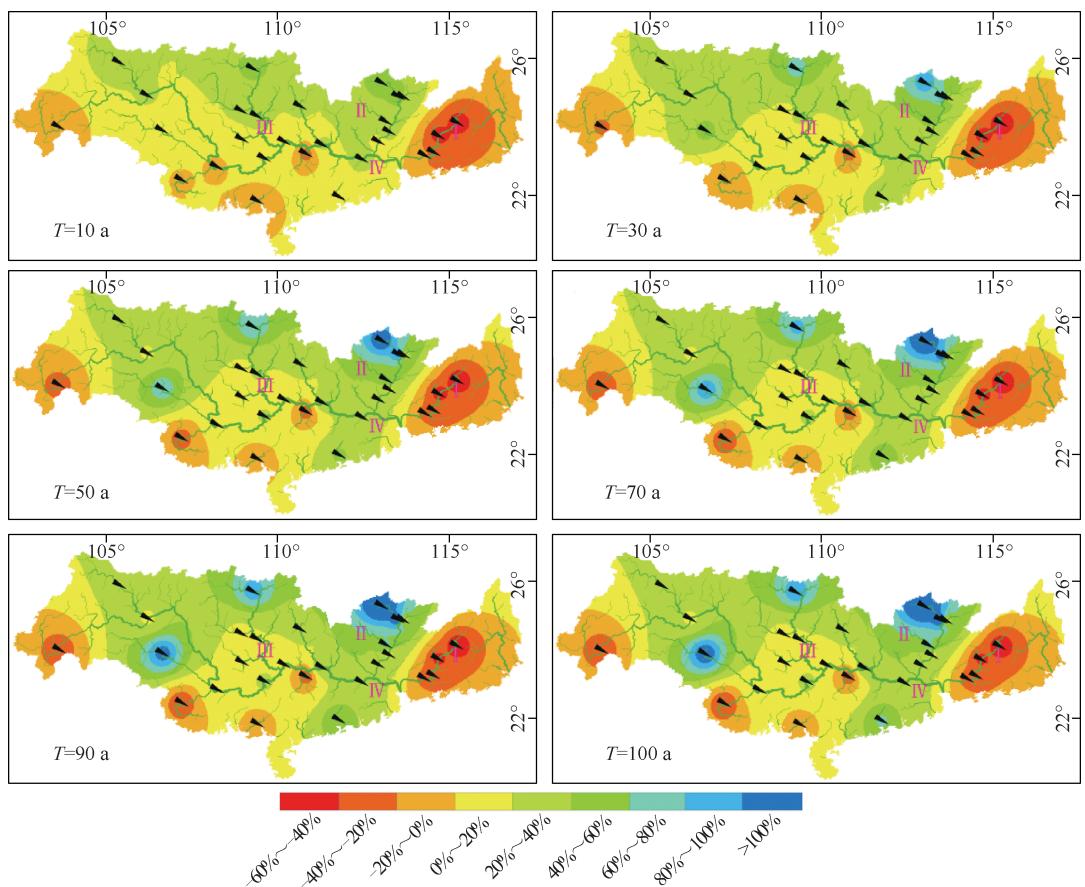


图7 珠江流域变化后洪峰流量相对于变化前的强度变化
(正值百分数表示洪峰流量强度增加,负值百分数表示洪峰流量强度减小)

Fig. 7 The changes in peak flow of time series between before and after change points in Pearl River drainage basin

江、枫树坝和白盆珠水库建成时间基本一致(分别为1960、1974、1985年).这3大水库总库容为 $209.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,总控制集水面积为 $1.17 \times 10^4 \text{ km}^2$,占东江下游控制站博罗水文站以上控制面积的46.6%,基本上可抵御100年一遇的洪水.在流域3大水库调度影响下,龙川、河源和岭下站年最大流量变化后序列均值分别下降了48%、51%和30%.可见,东江流域人类活动已经主导了流域水文过程的变化.

5 结论

本文分析了珠江流域年最大流量序列变化前后概率分布变化,采用GEV分布作为分析中的统一极值分布函数.采用滑动秩和检验法结合Brown-Forsythe、滑动T、有序聚类和Mann-Kendall检验法进行变化时间节点的识别,并用CSDMC分析法获得年最大流量序列的详细信息.用MK趋势检验法分析变化前后珠江流域年最大流量序列的变化趋势,获得如下结论:

1) 西江、北江年最大流量序列变化时间多发生在1991年左右.变化原因主要受到气候变化的影响,人类活动加剧了气候变化影响的效果,变化后多数站点呈上升趋势.变化后,西江干流年最大流量显著增加,受到支流洪水归槽和洪水遭遇的影响较大.东江流域变化时间与东江3大控制性水库的完工基本吻合,变化后,年最大流量呈显著减小趋势.

2) 珠江流域年最大流量从上游到下游、从北向南逐渐增加.变化后,西江、北江洪水强度相对于变化前

和整个年最大流量样本均在增加,增加幅度分别主要位于0~40%、10%~30%之间,西江、北江相应的洪水风险也在增加。东江流域洪水强度相对于变化前和整个年最大流量样本均在减少,减少幅度分别主要位于-60%~-20%、-30%~-10%之间,东江相应的洪水风险在降低。

3) 西江、北江原有的水利工程设计标准相对于变化后的洪水设计流量偏低,存在潜在的风险。由于珠江三角洲受到人类活动的巨大影响如河道采砂、围堰筑坝、快速城市化以及潮流顶托等,西江、北江变化后持续增加的洪峰流量叠加上述孕灾因素会对珠江三角洲堤防工程和城市产生巨大的破坏风险。因此,建议珠江三角洲地区复核和加固原有的防洪工程,使其满足更高的防洪要求。在以后的西江、北江水利工程建设中,其设计标准应该满足变化后的设计洪水流量。

6 参考文献

- [1] Milly PCD, Betancourt J, Falkenmark M et al. Stationarity is dead: whither water management? *Science*, 2008, **319**:573-574.
- [2] Cunderlik JM, Burn DH. Non-stationary pooled flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 2003, **276**(1/2/3/4): 210-223.
- [3] Zhang Q, Jiang T, Chen YD et al. Changing properties of hydrological extremes in south China: natural variations or human influences? *Hydrological Processes*, 2010, **24**(11):1421-1432.
- [4] 陈晓宏,涂新军,谢平等.水文要素变化的人类活动影响研究进展.地球科学进展,2010, **25**(8):800-811.
- [5] 刘昌明,张学成.黄河干流实际来水量不断减少的成因分析.地理学报,2004, **59**(3):324-330.
- [6] 李剑锋,张强,陈晓宏等.考虑水文变化的黄河干流河道内生态需水研究.地理学报,2011, **66**(1):99-100.
- [7] Zhang Q, Xu CY, Zhang Z et al. Spatial and temporal variability of precipitation maxima during 1960–2005 in the Yangtze River basin and possible association with large-scale circulation. *Journal of Hydrology*, 2008, **353**(3/4): 215-227.
- [8] Zhang Q, Xu CY, Gemmer M et al. Changing properties of precipitation concentration in the Pearl River basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2009, **23**(3):377-385.
- [9] Luo XL, Eddy Y, Zeng RY et al. Effects of in-channel sand excavation on the hydrology of the Pearl River Delta, China. *Journal of Hydrology*, 2007, **343**(3/4):230-239.
- [10] 陈晓宏,陈永勤.珠江三角洲网河区水文与地貌特征变化及其成因.地理学报,2002, **57**(4):429-436.
- [11] 朱颖洁,郭纯青,黄夏坤.气候变化和人类活动影响下西江梧州站降水径流演变规律研究.水文,2010, **30**(3):50-55.
- [12] 李艳,陈晓宏,王兆礼.人类活动对北江流域径流系列变化的影响初探.自然资源学报,2006, **21**(6):910-915.
- [13] 何慧,陆虹,欧艺.1959—2008年广西西江流域洪涝气候特征.气候变化研究进展,2009, **5**(3):134-138.
- [14] 珠江水利网. <http://www.pearlwater.gov.cn/zjgk/>.
- [15] 雷红富,谢平,陈广才等.水文序列变化点检验方法的性能比较分析.水电能源科学,2007, **25**(4):36-40.
- [16] McGilchrist CA, Woodyer KD. Note on a distribution-free CUSUM technique. *Technometrics*, 1975, **17**(3):321-325.
- [17] Mitchell JM, Dzerdzevskii B, Flohn H et al. Climate change. WMO Technical Note No. 79 World Meteorological Organization, 1966;79.
- [18] Mares C, Mares H, Stanciu A. Extreme value analysis in the Danube lower basin discharge time series in the twentieth century. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, **95**(3/4): 223-233.
- [19] Hosking JRM. 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.
- [20] Messey FJ. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 1951, **46**(253):68-78.
- [21] 王兆礼,陈晓宏,黄国如.近40年来珠江流域平均气温时空演变特征.热带地理,2007, **27**(4):289-293.
- [22] Zhang Q, Singh VP, Peng JT et al. Spatial-temporal changes of precipitation structure across the Pearl River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2012, **440/441**:113-122.
- [23] 朱颖洁,郭纯青,黄夏坤.广西西江流域降水极值趋势分析.水文,2012, **32**(2):72-77.
- [24] 苏灵,梁才贵.广西境内西江干流洪水特征变化初探.水文,2012, **32**(1):92-96.
- [25] 琅健,刘伟,包浩生.梧州市土地利用变化的驱动力研究.经济地理,1999, **19**(4):74-79.
- [26] Zhang Q, Xu CY, Chen XH et al. Abrupt changes in the discharge and sediment load of the Pearl River, China. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(10):1495-1508.