

Characteristics of Runoff Changes over Last 50 Years in the Middle and Lower Reaches of Dongjiang River*

Tao Peng^{1,2}, Xiaohong Chen³, Gaoxu Wang², Ji Liu¹, Yinghai Li¹

¹College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang

²State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing

³Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou

Email: pengtao306@163.com

Received: May 21st, 2012; revised: Jun. 16th, 2012; accepted: Jun. 25th, 2012

Abstract: Based on the monthly runoff data of the Heyuan and Boluo station in the middle and lower reaches of Dongjiang River from 1956 to 2005, changes trend and abrupt changes of runoff variation were analyzed by the methods of linear trend analysis, moving average, moving t-test, Yamamoto and sequential cluster analysis. Some important results were obtained in three aspects as follows: 1) The annual runoff at the Heyuan and Boluo station had an unobvious increase and decrease trend, respectively, and change tendency rate of them were $0.38 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$ and $-0.46 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$, respectively; 2) The spring and winter runoff in the middle and lower reaches of Dongjiang River had an increase trend, while the summer and autumn runoff had a decrease trend, but they did not arrive at $\alpha = 0.05$ statistically significant level; 3) The annual runoff at the Heyuan station as well as winter runoff at the Heyuan and Boluo station had significant abrupt changes. The abrupt changes of the annual runoff at the Heyuan station occurred in 1972, while winter runoff at the Heyuan and Boluo station had significant abrupt changes in the early 1970s.

Keywords: Runoff Changes; Abrupt Changes Analysis; The Middle and Lower Reaches of Dongjiang River

近 50 年东江中下游径流时序演变特征*

彭涛^{1,2}, 陈晓宏³, 王高旭², 刘冀¹, 李英海¹

¹三峡大学水利与环境学院, 宜昌

²南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京

³中山大学水资源与环境系, 广州

Email: pengtao306@163.com

收稿日期: 2012 年 5 月 21 日; 修回日期: 2012 年 6 月 16 日; 录用日期: 2012 年 6 月 25 日

摘要: 利用东江中下游河源和博罗站 1956~2005 年径流资料, 采用线性倾向估计、滑动平均、滑动 t 检验、有序聚类等方法, 分析东江中下游年、季节径流量的变化趋势和突变特征, 结果表明: 1) 河源站和博罗站年径流量分别呈不显著的增加和减少趋势, 径流量倾向率分别为 $0.38 \text{ 亿 m}^3/10\text{a}$ 、 $-0.46 \text{ 亿 m}^3/10\text{a}$; 2) 东江中下游春季和冬季径流量呈现不显著的增加趋势, 而夏季和秋季径流量则呈现不显著的减少趋势; 3) 河源站年径流量和河源站、博罗站的冬季径流量发生了明显突变, 其中河源站年径流量突变出现在 1972 年, 而河源站和博罗站冬季径流量突变主要发生在 20 世纪 70 年代初。

关键词: 径流变化; 突变分析; 东江中下游

*基金项目: 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2011491711); 国家自然科学基金(50839005; 41101511); 湖北省教育厅自然科学基金项目(Q20121301); 三峡大学人才科研启动基金(KJ2010B029)。

作者简介: 彭涛(1973-), 男, 湖南保靖人, 讲师, 博士, 主要从事水文水资源及生态水文研究。

1. 引言

由于气候变化和剧烈人类活动的影响, 河川径流正发生着显著的变化。河川径流时序演变一直是水文水资源领域备受关注的科学问题^[1,2]。东江流域作为人类活动极为剧烈的地区, 大规模的人类活动必然会引起水文要素的变化, 导致水资源的时空分配和水资源量的改变^[3], 对社会经济可持续发展和流域生态安全产生重要影响。东江是珠江流域的第三大水系, 发源于江西省寻乌县桎髻钵, 上游称寻乌水, 南流入广东境内, 至龙川合河坝汇安远水后称东江, 经虎门注入狮子洋, 干流全长 562 km, 流域面积 35,340 km²。目前, 东江流域内已建成枫树坝、新丰江、白盆珠三大控制性水库, 枫树坝水库以下已建、在建和筹建之中的梯级电站 14 个。近年来, 许多学者对东江流域径流演变趋势及周期进行了一些研究^[4-7], 分析了气候变化特别是人类活动对径流的深刻影响, 但对于流域径流量在季节上变化的差异特征和突变分析还不够深入。基于此, 本文对东江中下游 1956~2005 年径流变化特征及突变情况进行较系统的分析与研究, 以期深化对变化环境下东江流域径流演变的科学认识, 为流域水资源的合理利用、生态建设与保护提供参考。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源及处理

本文所用水文资料为东江中下游河源站和博罗站 1956~2005 年实测逐月径流量资料, 资料全部来源于广东省水文局。按 3~5 月为春季、6~8 月为夏季、9~11 月为秋季、12 月~翌年 2 月为冬季进行季节划分, 并对径流量资料按季节进行汇总整理, 分别计算河源和博罗站的年、四季径流量。

2.2. 研究方法

本文采用以下方法分析东江中下游径流序列变化趋势和突变特征: 1) 采用线性倾向估计法和滑动平均法来描述径流量的变化趋势。线性倾向估计法是建立径流量与时间之间的一元线性回归方程, 线性回归方程的斜率大于 0, 表示径流量随时间呈上升趋势, 反之, 表示下降趋势; 滑动平均用确定时间序列的平均值来显示变化趋势^[8]。2) 运用滑动 t 检验法、

Yamamoto 法和有序聚类法确定径流序列的突变点, 并反映突变点的显著性水平。滑动 t 检验是通过考察 2 组样本平均值的差异是否显著来检验突变^[8]; Yamamoto 法原理与滑动 t 检验法类似, 区别在于它通过信噪比检验 2 组样本平均值的差异是否显著来确定是否发生突变, 形式上比滑动 t 检验更简单明了^[9,10]; 有序聚类分析法推估时间序列可能突变点, 其实质就是推求最优分割点, 使同类之间的离差平方和最小, 而不同类之间的离差平方和相对较大^[11]。

3. 结果分析

3.1. 东江中下游径流变化的趋势性

趋势是水文序列中的一种暂态成分, 它常常不会以同样的形式出现, 其存在破坏了水文序列具有的原始状态, 因此需对这些成分进行识别以排除其对水文序列的影响。

3.1.1. 径流年际变化趋势

线性倾向估计结果表明, 近 50 年来东江中下游河源站和博罗站年径流量分别呈增加趋势和减少趋势, 年径流量倾向率分别为 0.38 亿 m³/10a、-0.46 亿 m³/10a(图 1)。对径流量变化的一次线性倾向方程进行检验, 河源站和博罗站径流量与时间的相关系数均未通过置信度 $\alpha = 0.05$ 显著性水平检验。因此, 近 50 年来东江中下游年径流量变化趋势均未达到统计意义上的显著水平。

5 年滑动平均分析结果显示, 东江中下游河源站和博罗站年径流量演变趋势总体一致, 均呈现波动式变化。从 1959 年开始年径流量有明显的减少趋势, 至 1963 年前后降为最低, 后又开始显著上升, 直至 1976 年前后; 1976~2005 年径流呈现 3 次较大的波动, 在 1973 年、1983 年、1996 年前后达到波峰, 在 1980 年、1989 年前后、2002 年到达波谷, 即 1996 年以来年径流量总体呈持续减少趋势。

总的来看, 东江中下游河源站和博罗站年径流量总体趋势变化不大, 河源站总体在波动中呈不显著增加趋势, 而博罗站呈现不显著减少趋势。研究表明, 近 50 年来东江流域年平均降雨量呈现不明显增加趋势, 降雨是径流变化的直接驱动因子^[12]。同时, 快速城市化造成的不透水面积增加、不合理农业经营造成

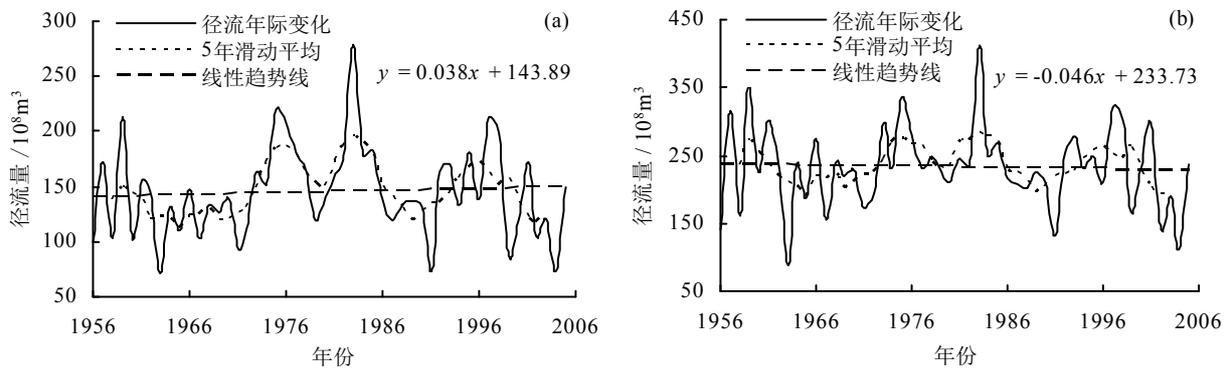


Figure 1. Inter-annual variation of runoff, linear tendency and 5 years moving average at the Heyuan (a) and Boluo (b) station
图 1. 河源站(a)和博罗站(b)径流量年际变化、线性趋势和 5 年滑动平均

的植被覆盖率下降以及流域经济迅猛发展使得河道外用水量剧增等因素,也是导致年径流量变化的重要原因^[3]。

3.1.2. 径流季节变化趋势

为了反映径流变化的全貌,对东江中下游径流序列资料进行春、夏、秋、冬四季的径流倾向率分析(表 1)。结果表明,河源站和博罗站春季和冬季径流量都呈增加趋势,夏季和秋季径流量均呈减少趋势,其中冬季径流变化倾向率分别达 0.593 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 、0.630 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$,夏季径流量倾向率分别为-0.412 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 、-1.011 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$,博罗站四季径流量变幅要大于河源站。东江流域三大控制性水库总库容达 170.6 亿 m^3 ,水库汛期拦蓄洪水,并在枯水期加大泄水以满足下游河流生态和城市供水需求,这应该是夏季径流大幅减少和冬季径流大幅增加的主要原因之一。对四季径流变化的线性倾向方程的相关系数进行检验, $|r|$ 均小于 $r_{0.05}$,表明四季径流量的增加或减少趋势均未达到 95%信度水平。

3.1.3. 径流年代际变化趋势

20 世纪 60 年代,东江中下游径流量相对偏枯,70 年代以后径流量呈持续增加趋势,80 年代增幅达到高峰,90 年代以后,年径流量减幅明显,特别是进入 21 世纪后,径流量大幅减少(表 2)。20 世纪 90 年代以后东江流域人类活动强度加剧,特别是河道外取水量剧增导致年径流量减少。从径流年代际变化空间分异特征来看,在 20 世纪 50 年代博罗站径流量年代际变化相对较大,而 80 年代至 90 年代河源站变幅较大,进入 21 世纪以来,则博罗站径流量减幅更大。

3.2. 东江中下游径流变化的突变性

3.2.1. 径流年际突变特征

为避免滑动 t 检验法任意选择子序列长度造成突变点的漂移,变动子序列长度进行分析比较,提高计算结果的可靠性。此处, $n = 50$,分别取两子序列长度 $n_1 = n_2 = 5$, $n_1 = n_2 = 10$,给定显著性水平 $\alpha = 0.01$,计算 t 统计量序列(图 2)。经过滑动 t 检验,当子序列长度取 5 时,河源站和博罗站的年径流量分别在 1972 年和 1995 年出现了突变,均通过了 $\alpha = 0.01$ 的信度水平检验(图 2(a1)和图 2(b1));当子序列长度取 10 时,河源站的年径流量在 1971~1974 年发生了突变,超过 99%的信度水平(图 2(a2)),而博罗站的年径流量未检测到信度水平超过 99%的突变点(图 2(b2))。

根据 Yamamoto 法绘制两站信噪比 S/N 序列变化趋势图(图 3)。从图 3 可以看出,当 $n_1 = n_2 = 5$ 时,河源站在 1972 年、1973 年和 1985 年出现了超过 99%的信度水平的突变(图 3(a1)), S/N 值达到了 1.39、1.09 和 1.14;当 $n_1 = n_2 = 10$ 时,河源站在 1972 年达到 99%的信度水平的突变(图 3(a2)),博罗站在 2 个子序列时段均未检测到统计意义上的突变现象(图 3(b1)和图 3(b2))。

为了确认突变点的真伪,增强突变分析结果的可信度,进一步采用有序聚类法对径流时间序列进行突变检验。利用有序聚类分析方法计算得到年径流序列的离差平方和 $S_n(\tau)$,绘制 $S_n(\tau)$ 随时间变化的曲线(图 4)。河源站径流序列的 $S_n(\tau)$ 曲线在 1973 年达到最低点(图 4(a)),即 1973 年为最有可能的突变点。秩和检验结果显示,1973 年突变点超过 $\alpha = 0.05$ 显著性水平,突变成分显著。然后以 1973 年为界,对 1956~1973 年和 1974~2006 年序列分段进行了检测,均未达到 $\alpha =$

0.05 显著性水平。博罗站 $S_n(\tau)$ 曲线在 2002 年达到最低点(图 4(b)), 对以 2002 年为分割点前后序列检验, 未能通过 $\alpha = 0.05$ 显著性水平, 故认为博罗站年径流量没有发生统计意义上的突变。

3.2.2. 径流季节突变特征

采用滑动 t 检验法、Yamamoto 法和有序聚类法对河源站、博罗站四季径流序列进行突变检验, 如表 3 所示。滑动 t 检验法($n = 10$)、Yamamoto 法($n = 5$)均检出河源站春季径流量在 1972 年发生了突变, 通过了 $\alpha = 0.01$ 信度检验。3 种方法均未检出博罗站春季径流

量发生突变情况; 河源站夏季径流量未检出统计意义上的突变现象。Yamamoto 法($n = 5$)检验出博罗站夏季径流量在 1986 年发生了突变, 而有序聚类法检出突变发生在 1978 年; 滑动 t 检验法和 Yamamoto 法($n = 5$)均检出河源站秋季径流量在 1985 年存在突变, 而有序聚类法未检出该站秋季径流量存在突变现象。除 Yamamoto 法($n = 5$)检出博罗站秋季径流量在 1985 年发生突变外, 其他方法均未检出该站秋季径流量存在突变点; 3 种方法均检出河源站和博罗站冬季径流量在 1973 年发生了突变, 超过了 99% 置信度水平。

Table 1. Change tendency rate of seasonal runoff at the Heyuan and Boluo stations (unit: $10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$)
表 1. 河源站和博罗站四季径流量线性倾向率(单位: $10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$)

站名	春季	夏季	秋季	冬季
河源站	0.249	-0.412	-0.049	0.593
博罗站	0.298	-1.011	-0.371	0.630

Table 2. Annual average runoff anomaly of different decades at the Heyuan and Boluo stations (unit: 10^8 m^3)
表 2. 河源站和博罗站不同年代平均径流量距平值(单位: 10^8 m^3)

站名	1956~1959	1960~1969	1970~1979	1980~1989	1990~1999	2000~2005
河源站	2.302	-22.283	10.506	19.581	4.373	-21.831
博罗站	9.360	-15.764	12.453	15.312	3.059	-31.338

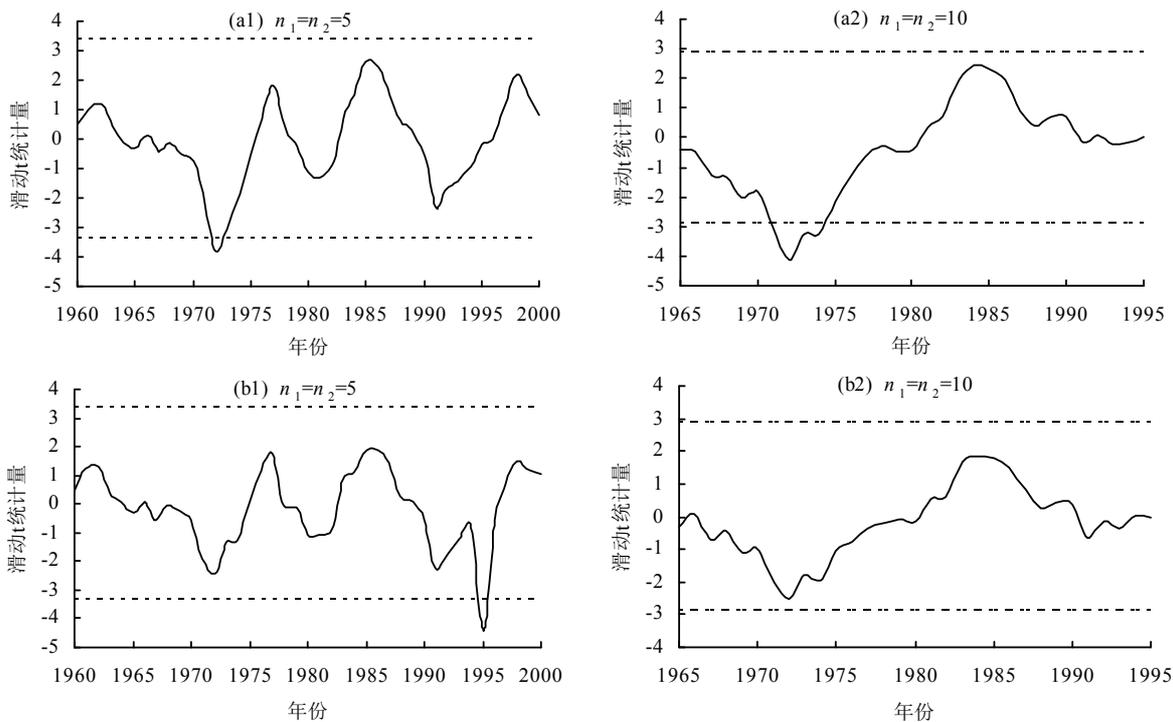


Figure 2. The moving t-test for annual runoff abrupt changes at the Heyuan (a1, a2) and Boluo (b1, b2) stations
图 2. 河源站(a1、a2)和博罗站(b1、b2)年径流量滑动 t 突变检验

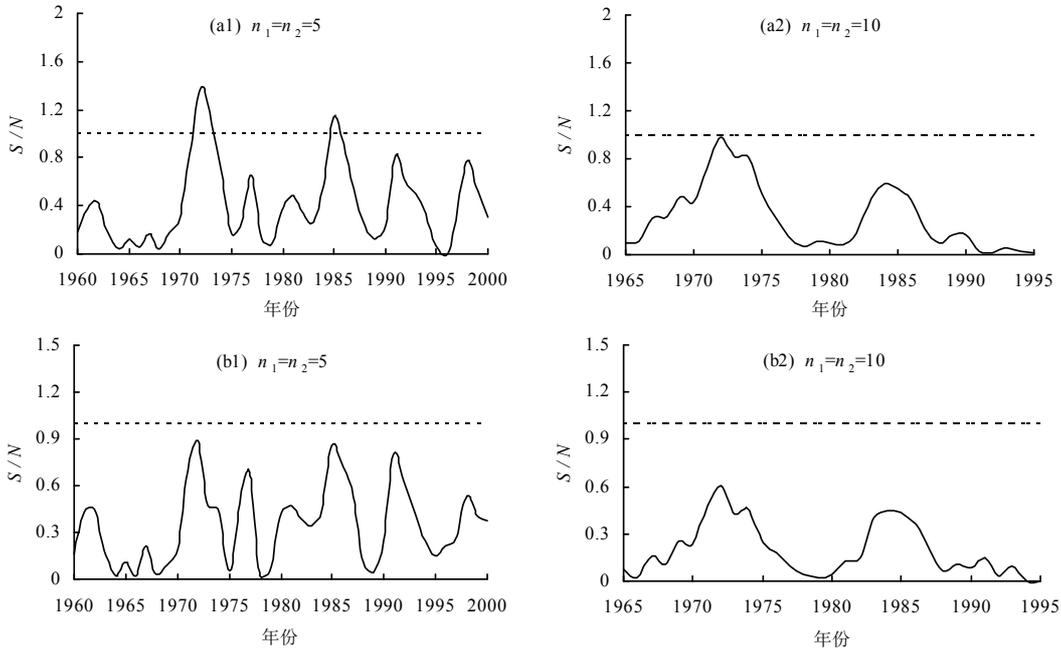


Figure 3. Annual runoff abrupt changes detected by using Yamamoto method at the Heyuan (a1, a2) and Boluo (b1, b2) stations
图 3. 河源站(a1、a2)和博罗站(b1、b2)年径流量 Yamamoto 法突变检验

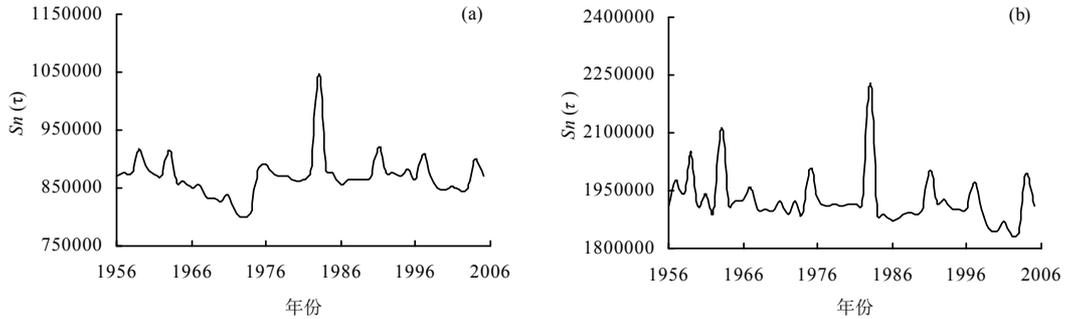


Figure 4. Annual runoff abrupt changes detected by using sequential cluster method at the Heyuan (a) and Boluo (b) stations
图 4. 河源站(a)和博罗(b)年径流量有序聚类法突变检验

Table 3. Seasonal runoff abrupt changes detected by using moving t-test, yamamoto and sequential cluster analysis method
表 3. 滑动 t 检验法、Yamamoto 法和有序聚类法检测出的四季径流量突变点

时间	站名	滑动 t 检验法		Yamamoto 法		有序聚类法
		n = 5	n = 10	n = 5	n = 10	
春季	河源站		1971~1972	1972		1985
	博罗站					
夏季	河源站					
	博罗站			1986		1978
秋季	河源站	1985	1972~1974、1984~1985	1985		
	博罗站			1985		
冬季	河源站	1973、1985~1986、1991~1992、1998	1968、1971~1974、1985	1972~1973、1985~1986、1991~1993、1998	1972~1974	1973
	博罗站	1973、1991~1992	1968~1969、1971~1974	1973、1985、1991~1993、1998	1968	1973

注: 表中突变点均通过 99% 的信度水平。

综上所述, 对比滑动 t 检验、Yamamoto 法和有序聚类法突变检验结果发现, 上述方法确定的径流突变年份部分是相吻合。经综合分析, 将河源站年径流的突变点确定为 1972 年, 而博罗站年径流未发生显著的突变现象, 这与谭莹莹等^[6]研究结果基本相符。四季径流量以冬季突变点最为显著, 突变点主要集中在 20 世纪 70 年代初。从站点来看, 河源站季节径流量突变点相比博罗站要多, 这可能与河源站径流序列受新丰江水库调蓄显著影响有关, 而博罗站地处东江下游河口三角洲, 距离流域三大控制性水库较远, 受水利工程调蓄影响程度下降, 季节突变成成分不太明显^[13]。

4. 结论

本文利用线性倾向估计、5 年滑动平均、滑动 t 检验、有序聚类等方法, 对东江中下游 1956~2005 年径流的变化趋势和突变特征进行了分析, 得到以下结论:

1) 东江中下游河源站和博罗站年径流量分别呈现增加趋势和减少趋势, 但都未达到 $\alpha = 0.05$ 显著性水平, 径流量倾向率分别为 0.38 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 、-0.46 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$, 20 世纪 90 年代后期以后均表现为持续减少的趋势。

2) 河源站和博罗站春季和冬季径流量都呈现增加趋势, 其中冬季径流变化倾向率分别达 0.593 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 、0.630 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$; 河源站和博罗站夏季和秋季径流量均呈减少趋势, 其中夏季径流量倾向率分别为 -0.412 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$ 、-1.011 亿 $\text{m}^3/10\text{a}$, 但这些变化趋势均未达到统计意义上的显著性水平。

3) 河源站年径流量和河源站、博罗站的冬季径流量发生了明显突变, 其中河源站年径流量突变出现在 1972 年左右, 而河源站和博罗站冬季径流量突变主要发生在 20 世纪 70 年代初。

4) 对于年、季节径流量突变点的检测结果表明, 采用不同检测方法得到的结果会存在一定差异, 而且每种检测方法都有其不足之处。因此, 要准确地确定径流序列的突变点, 最好使用多种方法进行比较, 并联系河川径流变化的物理成因来共同确定。

参考文献 (References)

[1] BIRSAN, M.-V., MOLNAR, P., BURLANDO, P., et al. Stream-

- flow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 2005, 314: 312-329.
- [2] 赵雪花, 黄强. 黄河上游径流变化的影响因素分析研究[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(6): 700-704.
ZHAO Xuehua, HUANG Qiang. Runoff changes and its influencing factors in the upper reaches of the Yellow River. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(6): 700-704. (in Chinese)
- [3] 陈晓宏, 王兆礼. 东江流域土地利用变化对水资源的影响[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 46 (3): 311-316.
CHEN Xiaohong, WANG Zhaoli. Landuse change and its impact on water resources in East River Basin, South China. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 46(3): 311-316. (in Chinese)
- [4] 石教智, 陈晓宏, 吴甜. 东江流域降雨径流变化趋势及其原因分析[J]. *水电能源科学*, 2005, 23(5): 8-10.
SHI Jiaozhi, CHEN Xiaohong and WU Tian. Study on rainfall and runoff change tendency and its causes in East River basin. *Water Resources and Power*, 2005, 23(5): 8-10. (in Chinese)
- [5] ZHANG Q., XU, C. Y., YU, Z. G., et al. Multifractal analysis of streamflow records of the East River Basin (Pearl River), China. *Physica A*, 2009, 388: 927-934.
- [6] 谭莹莹, 谢平, 陈丽, 等. 东江流域径流序列变异分析[A]. 中国水利学会水资源专业委员会. 变化环境下的水资源响应与可持续利用[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 2009: 98-104.
TAN Yingying, XIE Ping, CHEN Li, et al. Analysis of variation of runoff in Dongjiang Basin. In: Professional Committee of China International Water Resources Association. *Response to Changes in Environment and Sustainable Use of Water Resources*, Dalian: Dalian University of Technology Press, 2009: 98-104. (in Chinese)
- [7] 王兆礼, 陈晓宏, 杨涛. 近 50 年东江流域径流变化及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(8): 1365-1374.
WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong and YANG Tao. Runoff variation and its impacting factors in the Dongjiang River Basin during 1956-2005. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(8): 1365-1374. (in Chinese)
- [8] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
WEI Fengying. *Modern climate statistical diagnosis and prediction technology*. Beijing: China Meteorology Press, 1999. (in Chinese)
- [9] YAMAMOTO, R. T., IWASHIMA, T. and SANGA, N. K. An analysis of climatic jump. *Journal of the Meteorology Society of Japan*, 1986, 64: 273-281.
- [10] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-493.
FU Chongbin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climate change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1992, 16(4): 482-493. (in Chinese)
- [11] 丁晶. 洪水时间序列干扰点的统计推断[J]. *武汉水利电力学院学报*, 1986, 5: 36-40.
DING Jing. Statistical detection for transition point in flood time sequences. *Journal of Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Power*, 1986, 5: 36-40. (in Chinese)
- [12] 林凯荣, 何艳虎, 雷旭, 等. 东江流域 1959~2009 年气候变化及其对径流的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1783-1787.
LIN Kairong, HE Yanhu, LEI Xu, et al. Climate change and its impact on runoff during 1956-2009 in Dongjiang Basin. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(12): 1783-1787. (in Chinese)
- [13] 彭涛, 陈晓宏, 庄承彬. 基于样本熵的东江月径流序列复杂性分析[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1379-1382.
PENG Tao, CHEN Xiaohong and ZHUANG Chengbin. Analysis on complexity of monthly runoff series based on sample entropy in Dongjiang River. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4): 1379-1382. (in Chinese)