

# 人类活动影响下的北江流域径流变化特征 及其变异性分析

李艳<sup>1</sup>, 张鹏飞<sup>2</sup>

(1. 广东财经大学 公共管理学院, 广州 510320; 2. 广东嘉应学院 地理科学与旅游学院, 广东 梅州 514015)

**摘要:** 由于受环境变化特别是人类活动的影响, 水文水资源系统出现了新的特征。认识水文特征变异规律, 对维持人类社会的永续发展具有重要意义。本文以北江流域主要控制性水文站石角站 53 年(1956-2008) 径流序列为基础, 运用趋势分析、跳跃分析、相关分析等方法, 研究了北江流域径流变化的基本特征和变异规律。结果表明: 径流年内分配不均, 年际变化大, 年径流量序列呈不显著上升趋势, 1973 年发生了一次径流增量跃变。从对降雨、蒸发、径流系数的分析看, 径流在 1973 年发生了变异, 利用降雨-径流关系, 分析了人类活动对径流演变的作用, 发现城市化发展和水土流失加剧等导致了北江流域径流发生变异。可见, 在人类活动的影响下, 北江流域径流发生了变异。

**关键词:** 径流; 径流变化特征; 径流变异性; 人类活动; 北江流域

中图分类号: TV121.1; P333.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)02-0061-05

## Analysis of change characteristics and variability of runoff in Beijiang river basin under influence of human activity

LI Yan<sup>1</sup>, ZHANG Pengfei<sup>2</sup>

(1. School of Public Management, Guangdong University of Finance & Economics, Guangzhou 510320, China;

2. Geography Science and Travel College, Jiaying University, Meizhou 514015, China)

**Abstract:** Due to the impact of environment change and especial human activities, the hydrology and water resources systems appear new features. Understanding the variation rule of hydrological characteristics has important meaning to maintain sustainable development of human society. Using the analysis methods of trend, jumping and correlation, the thesis studied the variation characteristics of runoff in BeiJiang River basin based on the runoff data of 53 years in ShiJiao station from 1956 to 2008. The results show that the inter-annual variation is obvious and the seasonal distribution is non-uniform. Runoff has no significant ascending trend and occurred one jump change in 1973. From the analysis of precipitation, evaporation and runoff coefficient, the runoff varied at 1973. The effect of human activity on runoff evolution was analyzed based on rainfall-runoff relationship. The urbanization and soil erosion result in runoff variation in BeiJiang River basin. In conclusion, the variability of runoff in BeiJiang River basin has taken place under the influence of human activity.

**Key words:** runoff; change characteristics of runoff; variability of runoff; human activity; Beijiang River basin

## 1 研究背景

随着人口的增长、工农业生产的发展、城镇化进程的加快, 大规模人类活动明显改变了天然状态下的水循环过程<sup>[1]</sup>。在这种情形下, 研究人类活动影响下

的水文水资源特征变异显得十分必要, 国内学者对近几十年来人类活动影响下的径流量演变规律做了大量研究<sup>[2-7]</sup>, 本文选取北江流域作为研究对象, 分析人类活动对径流的影响。北江是珠江流域第二大水系, 也是广东省境内面积最大的河流。地理位置在东

收稿日期: 2013-11-09; 修回日期: 2013-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001019)

作者简介: 李艳(1978-), 女, 新疆人, 博士, 讲师, 主要从事水文与水资源研究。

经  $111^{\circ}52' \sim 114^{\circ}41'$ , 北纬  $23^{\circ}09' \sim 25^{\circ}41'$ 。北江上游浈江发源于江西省信丰县石碣, 经大余县进入广东, 自东北往西南穿山越岭, 流经南雄、始兴、曲江等市(县), 至韶关市沙洲尾与支流武江汇合, 始称北江; 再自北向南流经英德、清新、清远至三水河口, 在思贤滘与西江相通, 注入珠江三角洲网河区。本文以北江流域控制性水文站石角站 1956-2008 年的径流数据及北江流域 1956-2008 年的降雨数据为基础, 分析了北江流域近 53 年来的径流变化特征, 发现 1973 年后流域水文特征发生了变异。

## 2 径流年内、年际变化

### 2.1 年内变化

北江流域径流有明显的汛期(4-9月)。图1为北江流域各时段径流年内分配情况的对比。从多年平均月径流量分配曲线看, 径流在1-2月变化平缓且径流量小, 4月后增加迅速, 6月达到峰值, 之后开始逐渐减小, 10月以后减少显著, 至12月降至全年最低。多年平均情况下, 汛期径流量占全年径流量的比值为76.48%。

径流分配的年代际变化也较明显。20世纪70和80年代峰值出现在5月, 60、90年代、2000-2008年及多年平均峰值出现在6月。从径流年内分配的曲线形态看, 都表现为单峰型, 20世纪60、70年代及2000-2008年的线型相对多年平均较尖瘦, 80、90年代的线型相对多年平均较宽平。各时段汛期径流量占全年径流量的比值依次为80.1%、76.5%、73.3%、75.3%和77.5%。20世纪60、70年代及2000-2008年的汛期集中程度大于多年平均, 80、90年代的汛期集中程度小于多年平均。以上特征主要是受流域降雨的影响。

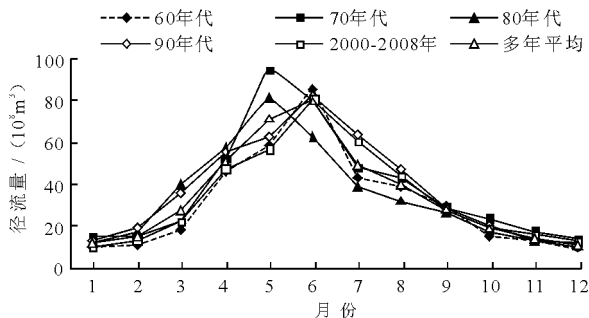


图1 各年代及多年平均月径流量分配曲线

### 2.2 年际变化

北江流域年径流变差系数在0.30~0.45之间, 年际变化较大。据石角站实测资料, 特丰水年1973

年的年均流量为  $2\,288\text{ m}^3/\text{s}$ , 特枯水年1963年年均流量为  $516\text{ m}^3/\text{s}$ , 丰枯比达4.4。从径流累积距平图(图2)看出, 北江流域径流在1984-1991年为一个显著的持续枯水时段, 1992-1998年为一个显著的持续丰水时段, 而1956-1983、1999-2008年间为不连续的丰、枯交替变化。

## 3 径流趋势及跳跃特征

### 3.1 趋势特征

用线性拟合发现, 北江流域径流呈上升趋势。采用肯德尔(Kendall)秩次相关法<sup>[8-9]</sup>对趋势进行显著性检验, 计算过程如下:

$$\begin{cases} U = \frac{\tau}{[\text{Var}(\tau)]^{1/2}} \\ \tau = \frac{4 \sum p_i}{n(n-1)} - 1 \\ \text{Var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $p_i$  为径流序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$  中对偶值  $(x_i, x_j, j > i)$  的  $x_i < x_j$  出现的个数,  $n$  为序列长度。

经计算,  $\tau = 0.0493$ ,  $\text{Var}(\tau) = 0.009$ ,  $U = 0.5216$ 。信度  $\alpha = 0.05$  时的临界值  $U_{\alpha/2} = 1.96$ , 现  $U < U_{\alpha/2}$ , 上升趋势不显著。结合一些相关文献[10-11], 本文认为北江径流存在不显著的上升趋势。

### 3.2 跳跃特征

采用有序聚类法<sup>[8-9]</sup>分析北江流域径流的跳跃特征。计算过程如下:

$$\begin{cases} V_\tau = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau)^2 \\ V_{n-\tau} = \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2 \\ S_n(\tau) = V_\tau + V_{n-\tau} \\ S_n^* = \min_{1 \leq \tau \leq n-1} \{S_n(\tau)\} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_n^* = \min_{1 \leq \tau \leq n-1} \{S_n(\tau)\} \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为可能分割点, 满足式(3)的  $\tau$  记为  $\tau_0$ , 即为跳跃点。

经计算, 总离差平方和  $S_n(\tau)$  和  $\tau$  的关系如图3。发现  $\tau$  为17时, 总离差平方和最小, 对应的年份为1973年。1956-1972年平均径流量为385.7亿  $\text{m}^3$ , 1973-2008年平均径流量为434.9亿  $\text{m}^3$ , 可见1973年后北江流域径流量有所增加。

## 4 径流变异性分析

对于一个闭合流域的水量平衡, 降水量、蒸发量、出口断面径流量和流域蓄水变量分别用  $P$ 、 $E$ 、 $R$

和  $\Delta U$  表示,则任意时段流域水量平衡方程式为: $P = E + R + \Delta U$ ,多年平均水量平衡方程式为: $P = E + R$ 。假设北江流域是闭合的,且对应于表 1 中的各时段, $\Delta U = 0$ ,则各时段的流域平均陆面蒸发量等于时段内流域平均年降水量与平均年径流深之差。借用气象部门  $E_{Q20}$  水面蒸发量资料,选取北江流域 1956 - 2001 年有完整资料的 5 个观测站,用泰森多边形法计算流域面水面蒸发量。将北江流域不同时段平均年径流深、平均年降雨量、平均年蒸发量和相对 1956 - 2001 长系列均值的变化率列于表 1 中,可以看出,各时段径流变化幅度比相应的降雨量大,变化率基本在  $\pm 10.0\%$  以内。降雨量在 20 世纪 70 年代较多年平均增加最大,而 80 年代减少最大。流域陆面蒸发量在 70、80 年代及 1990 - 2001 年都呈下降趋势,特别是最近 11 年下降最显著,而 1956 - 1968 年间,流域陆面蒸发量高于多年平均值 9.4%。水面蒸发量各时段变化相对较平稳,1991 - 2001 年

表现为降低趋势,而之前各时段表现为略微增加趋势。总体来说,流域陆面蒸发量的变化幅度较水面蒸发量大,说明流域内人类活动引起的下垫面变化对流域水文循环产生了影响。对比降雨、径流和蒸发量的变化,发现径流的变化程度较大,说明北江流域径流发生了变异。

在湿润地区,降雨和径流关系密切,将 1956 - 2008 年降雨量与径流量及其线性趋势绘在同一图上(图 4),发现降雨序列趋势线基本水平,而径流序列趋势线有着不显著上升趋势,这说明,在降雨输入基本不发生变化的情况下,径流输出发生了变化,此变化应该是由流域的下垫面变化引起的。为进一步分析径流变异的原因,采用有序聚类法对径流系数进行变异点识别(图 5),因为径流系数可以较好地反映流域的下垫面特征。计算表明,在分割点  $\tau$  为 17,对应的年份为 1973 年时,总离差平方和最小,说明 1973 年以后北江流域径流发生了变异。

表 1 北江流域水文要素变化情况

水文要素	mm, %									
	1956 - 2001		1956 - 1969		1970 - 1979		1980 - 1989		1990 - 2001	
	均值	均值	相对变化	均值	相对变化	均值	相对变化	均值	相对变化	
降雨量	1736	1695	-2.4	1810	4.3	1680	-3.2	1770	2.0	
径流深	1100	998	-9.3	1188	8.0	1064	-3.3	1177	7.0	
陆面蒸发量	636	696	9.4	622	-2.2	617	-3.0	593	-6.8	
水面蒸发量	1543	1561	1.2	1585	2.7	1551	0.5	1481	-4.0	

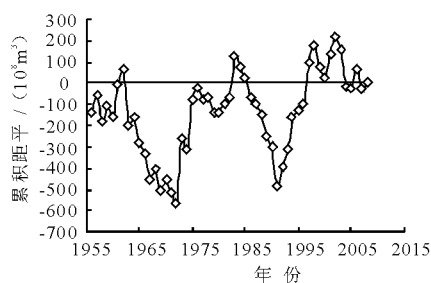


图 2 年径流累积距平曲线图

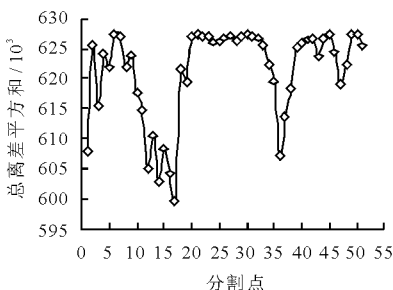


图 3 径流量的  $S_n(\tau) - \tau$  关系图

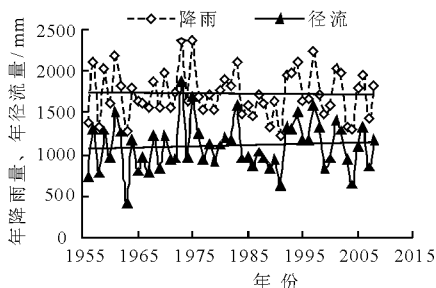


图 4 年降雨和年径流过程及趋势线

## 5 人类活动的影响

事实上,自 20 世纪 70、80 年代以来,北江流域内人口和经济水平都有了较大的发展。从表 2 和表 3 中可以看出,1980 - 2000 年间,流域内总人口和 GDP 值都呈显著上升趋势,说明人类的社会、经济活动加强,人类活动对流域下垫面和河川径流的影响在加大。北江流域内包含的行政区中以韶关和清远两市所占的面积较大,所以进一步来观察韶关和清远两市历年社会经济指标的发展状况。图 6 为韶

关、清远年末户籍总人口发展图,可以看出,总人口呈现稳定的上升趋势。图 7 为两市国内生产总值发展图,发现 20 世纪 70 年代后,两市 GDP 都呈指数型增长,增长速度很快,而在 70 年代以前,GDP 的发展速度很慢,说明在 70 年代后,韶关、清远两市的经济发展较以前有了很大的提高,人类的生产能力加大了。因此,将 1973 年作为人类活动影响加剧的分割点是比较合适的,这说明人类活动对径流造成影响的时段与实际人类经济建设活动和城市化发展的阶段较符合。

表2 北江流域总人口及城镇化进程

万人, %

北江流域水 资源分区	总人口					城市化率				
	1980	1985	1990	1995	2000	1980	1985	1990	1995	2000
北江大坑口以上	188	202	215	222	235	28.7	29.3	32.9	40.8	55.7
北江大坑口以下	478	509	535	559	606	10.2	13.6	27.8	23.6	29.7

表3 北江流域 GDP 发展情况

亿元, %

北江流域 水资源分区	GDP					年平均增长率				
	1980	1985	1990	1995	2000	1980 - 1985	1985 - 1990	1990 - 1995	1995 - 2000	1980 - 2000
北江大坑口以上	34	53	77	112	155	9.5	7.7	7.7	6.7	7.9
北江大坑口以下	36	59	92	234	308	10.2	9.4	20.5	5.7	11.3

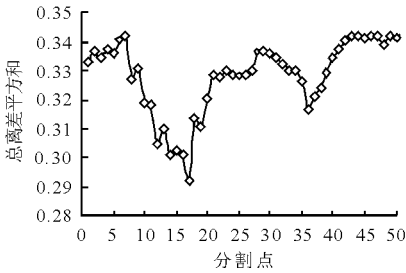
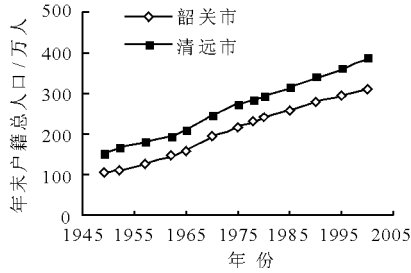
图5 径流系数的  $S_n(\tau) - \tau$  关系图

图6 韶关、清远两市人口发展图

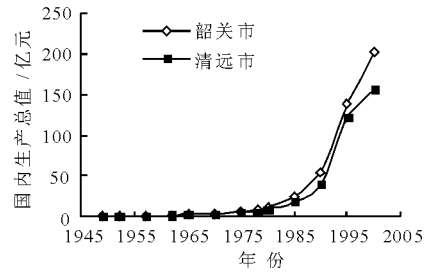


图7 韶关、清远两市 GDP 发展图

北江流域径流发生变异除受到社会经济发展、城镇化进程加剧及人类活动的影响外,还与流域内水土流失严重有关。20世纪50年代以前,北江流域的土壤侵蚀以自然侵蚀为主,人类活动只是加速了局部地区的土壤侵蚀。近几十年来,由于缺乏对自然规律的认识,乱砍乱伐森林、陡坡开山造田,以及房屋建设等,导致了水土流失的进一步发生与发展。表4列出了北江流域部分地区1957和1985年水土流失面积情况,可以看出,1985年北江山区水土流失面积较1957年增加了6.1倍,而翁源县更是增加到25倍。造成水土流失的人为因素主要有:①森林和植被的破坏。②不合理的耕作方式。③筑路、开石、采矿、基建等人为造成的水土流失。流域内水土流失对生态环境造成破坏的同时,对径流演变情势亦造成深远的影响。

表4 北江流域部分地区1957、1985年水土流失面积<sup>[12]</sup>

土地面积	1957年水土		1985年水土	
	流失面积	流失面积	流失面积	流失面积
南雄	2297.53	303	602.53	
翁源	2204.95	26	652.45	
北江山区	37868.57	757	4249.2	

再进一步对人类活动的影响量进行估算。假设一个流域的下垫面特征决定了降雨径流产出关系,如果下垫面条件不发生变化,这一关系为确定关系,

如果此关系发生了变化,就视为下垫面变化引起的。据此原理,选用基期即无人类活动影响时期的降雨径流序列回归出降雨-径流关系,再利用此回归方程,将研究期人类活动影响时期的降雨数据代入,求得无人类活动影响下的可能径流量,与实测值的差值就是人类活动的影响量。

前面分析表明,北江流域1973年以前径流基本未发生变异,可视为无人类活动影响的时期。将1956-1972年降雨量和天然径流量进行线性回归,建立降雨-径流回归方程(图8),作为评价北江流域下垫面变化的基准。将1973-2008年的降雨数据代入回归方程,计算得到的径流量记为 $R_{\text{回归}}$ 。可以看出,人类活动对径流的直接影响量为1973年后实测径流量 $R_{\text{实测}}$ 与天然径流量 $R_{\text{天然}}$ 的差值;间接影响量为1973年后天然径流量 $R_{\text{天然}}$ 与 $R_{\text{回归}}$ 的差值;综合影响量为1973年后实测径流量 $R_{\text{实测}}$ 与 $R_{\text{回归}}$ 的差值<sup>[13-14]</sup>。

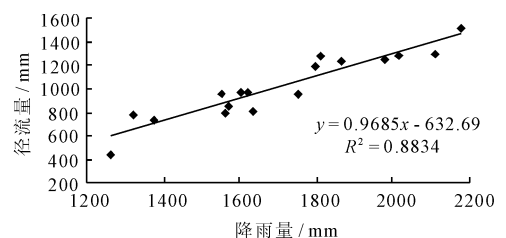


图8 北江流域1956-1972年降雨量与天然径流量相关图

表5 人类活动对北江流域径流量影响的大小

亿  $m^3$ , %

时段	天然年径	实测年径	回归年径	人类活动影响			
	流量 $R_{天然}$	流量 $R_{实测}$	流量 $R_{回归}$	直接影响	间接影响	综合影响	综合影响占 $R_{回归}$ 的比率
1973 - 1979	489.8	480.4	437.6	-9.4	52.2	42.8	9.8
1980 - 1989	418.6	408.1	381.7	-10.6	37.0	26.4	6.9
1990 - 1999	462.4	451.8	412.7	-10.6	49.7	39.1	9.5
2000 - 2008	421.0	410.5	384.4	-10.5	36.6	26.1	6.8
1973 - 2008	445.2	434.9	401.8	-10.3	43.4	33.0	8.2

将分析结果列于表5,可以看出,人类从河道中引水等直接活动导致径流量减小,植被覆盖条件变化、城市化发展等间接活动又导致径流量增加,总的的影响结果表现为径流量增加,不同时段人类活动的综合影响量分别为42.8亿、26.4亿、39.1亿、26.1亿、33.0亿  $m^3$ 。

## 6 结 语

运用趋势分析、跳跃分析、相关分析等方法,研究了北江流域径流变化的基本特征和变异规律。结果表明:

(1)北江流域径流存在明显的汛期(4-9月)。多年平均情况下,汛期径流量占全年径流量的比值为76.48%。径流分配的年代际变化也较明显,20世纪60、70年代及2000-2008年的汛期集中程度大于多年平均,20世纪80、90年代的汛期集中程度小于多年平均。累积距平图显示年径流量存在明显的持续枯水阶段(1984-1991)和持续丰水阶段(1992-1998)。

(2)北江流域年径流量存在不显著的上升趋势,1973年发生了一次跳跃。

(3)对比降雨、径流和蒸发量的变化,发现径流的变化程度较大,说明近50年来北江流域径流发生了变异。对比降雨、径流过程线,发现径流量增加主要是受到人类活动的影响。对径流系数进行分析,发现1973年后流域下垫面变化显著。

(4)通过流域内社会经济指标的分析发现,人类活动对径流造成影响的时段与实际人类经济建设活动和城市化发展的阶段较符合。1973-1979、1980-1989、1990-1999、2000-2008、1973-2008年间,人类活动的综合影响占各时段按基准期1956-1972年降雨-径流关系回归后的天然径流量的比值分别为:9.8%、6.9%、9.5%、6.8%、8.2%。径流发生变异与

城市化发展和水土流失加剧等因素有关。

## 参考文献:

- [1] 刘春蓁. 气候变异与气候变化对水循环影响研究综述[J]. 水文, 2003, 23(4): 1-7.
- [2] 覃爱基, 陈雪英, 郑艳霞. 宜昌径流时间序列的统计分析[J]. 水文, 1993, 13(5): 15-21.
- [3] 黄强, 蒋晓辉, 刘俊萍, 等. 二元模式下黄河年径流变化规律研究[J]. 自然科学进展, 2002, 12(8): 874-877.
- [4] 刘红玉, 李兆富. 三江平原典型湿地流域水文情势变化过程及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 493-501.
- [5] 任立良, 张炜, 李春红, 等. 中国北方地区人类活动对地表水资源的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 13-18.
- [6] 李丽娟, 郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析——以潮白河为例[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 309-317.
- [7] 周红, 秦嘉轮, 卫江益. 人类活动对塔里木河年径流量影响量的估算[J]. 干旱区地理, 2002, 25(1): 70-74.
- [8] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.
- [9] 朱颖元, 石凝. 福州市一百年来(1900-1999年)年降水量序列统计特性分析[J]. 水文, 2002, 22(3): 22-25.
- [10] 何兰, 陈伟宇. 北江下游河段的水文特征分析[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2003, 21(2): 67-69.
- [11] 李湘皎. 广东省主要河流径流情势演变分析[J]. 广东水利水电, 2005(1): 39-41+44.
- [12] 广东省防汛防旱防风总指挥部, 广东省水利厅. 广东水旱风灾害[M]. 广州: 暨南大学出版社, 1997.
- [13] 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+47.
- [14] 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[J]. 自然资源学报, 2006, 21(6): 910-915.