

# 华南湿热山地小流域径流对气候变化和人类活动的响应 ——以宁江为例

杨传训<sup>1,2</sup>, 张正栋<sup>1</sup>, 朱汝雄<sup>3</sup>, 万露文<sup>1</sup>, 叶晨<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>

(1. 华南师范大学 地理科学学院, 广州 510631; 2. 广州地理研究所,  
广州 510070; 3. 中山大学 地理科学与规划学院, 广州 510275)

**摘要:**基于1953—2013年宁江流域5个气象站日气温、降水量及控制站河口水文站月径流量数据与1986年、1995年、2005年、2013年宁江流域土地覆被分类数据,运用Mann-Kendall趋势分析、小波分析及累计量斜率变化比较法探讨了1953—2013年宁江流域气候变化与人类活动对径流变化影响。结果表明:(1)1953—2013年宁江流域温度发生显著上升,变化率为 $0.139^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,降水变化波动较小,而径流量出现显著下降。(2)1990年前流域内径流量与气温、降水存在较为明显的27a周期规律,1990年以来受人类活动影响加大,径流量变化周期受到破坏,未能体现全域性;但在小尺度周期11a上仍与降水量保持同步,表明宁江流域径流量主要受降水影响。(3)随着经济发展以及水土保持工作的进行,到2013年林地面积占整个流域的73.8%,草地面积下降41.6%,耕地面积减少61.2%,土地利用变化较大区域发生在兴宁市北部。(4)与1953—1958年比,1959—2008年宁江流域径流量增加气候变化和人类活动贡献率分别为62.2%和37.8%,2009—2013年降水和人类活动对径流减少贡献率为45.8%和54.2%。

**关键词:**宁江; 径流; 气候变化; 人类活动

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)05-0113-07

## Response of Runoff to Climate Change and Human Activities in the River Basin of Southern Humid Area —A Case Study Of Ning Jiang

YANG Chuanxun<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhengdong<sup>1</sup>, ZHU Ruxiong<sup>3</sup>,  
WAN Luwen<sup>1</sup>, YE Chen<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>

(School of Geography Science, South China Normal University,  
Guangzhou 510631, China; 2. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China;  
3. School of Geography Science and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Based on the data of daily temperature and precipitation of six meteorological stations in Ningjiang River Basin and hydrological data gathered from Hekou station from 1953 to 2013, landscape pattern metrics with land use and land cover data derived from the Landsat TM imagery acquired in 1986, 1995, 2005 and 2013, we used the methods of Mann-Kendall trend analysis, Wavelet analysis and SCRAQ method aiming to analyze the contribution ratio of precipitation and human activities to the runoff in the Ningjiang River Basin. The results showed that: (1) the temperature presented significantly increasing trend and runoff demonstrated the decreasing trend, the precipitation appeared weakly increasing trend; (2) there was obvious correlation coefficients among temperature, precipitation and runoff at the scale of 27-year before 1990, while the scale was destroyed by human activities after 1990, it was still synchronization in scale of 11-year between runoff and precipitation, indicating that runoff changes were mainly affected by the precipitation; (3) with the development of economy and soil and water conservation from 1980s, woodland area increased by 26.2%, grassland area land reduced by 41.6% and cultivated area reduced by 61.2%. The large area of land use

change occurred in the northern Xingning; (4) the period from 1953 to 1958 was taken as the base period, the contribution rates of the precipitation and human activities to the increased runoff were 62.2% and 37.8% in the period from 1959 to 2008, the rates to the decreased runoff were 45.8% and 54.2%, respectively, in the period from 2009 to 2013.

**Keywords:** Ningjiang; runoff; climate change; human activities

气候变化和人类活动是河流径流变化的两个重要因素<sup>[1]</sup>。近年来,受气候变化和人类活动的影响,不同区域河流径流量出现不同程度下降,而两者在不同时间阶段对径流减少贡献率不同。小波分析方法具有较好的时频功能,小波多尺度分析为研究水文序列演变过程及认识规律周期提供途径,在当前研究河流水文中运用广泛成熟且取得显著成果<sup>[2-5]</sup>。一些学者利用小波分析方法对不同地域河流径流减少原因进行研究,如吴创收等<sup>[6]</sup>对近几十年珠江入海径流变化分析时发现 90 年代末以来径流量出现下降,认为人类活动在近几十年影响中占据主导;除小波分析方法外,王随继等<sup>[7]</sup>提出累积量斜率变化率比较法分析干旱半干旱区皇甫川流域降水和人类活动对径流量的贡献率,分析认为近半个世纪流域径流减少因素为人类活动。白乐等<sup>[8]</sup>同样运用累积量斜率变化率比较法在对半干旱黄土高原区秃尾河流域基流近 60 a 变化分析时认为人类活动日益成为基流演变的驱动因子;胡珊珊等<sup>[9]</sup>运用气候弹性系数分析华北平原白洋淀径流量下降中人类活动起主导作用。前人研究中对华南湿热区域流域较少,且研究结果中华南流域径流变化原因未能统一,林凯荣等<sup>[10]</sup>在东江流域径流影响贡献率分析上认为气候变化与人类活动影响分量相当;李艳等<sup>[11]</sup>对北江流域径流变化研究得出人类活动使流域植被减少,导致流域径流的增加。

本文选取宁江流域作为华南湿热环境下小流域典型代表,运用 Mann-Kendall 分析及小波分析方法分析近 60 a 流域内气温、降水、径流量变化趋势,采用累计量斜率变化率比较法对近几十年流域内气候变化及人类活动对径流变化进行定量分析探讨,为其日后保护宁江流域的生态环境提供参考性意见。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区域

宁江流域位于粤东北地区,发源于江西省寻乌县荷峰畲,贯穿广东省兴宁市南北,至水口站汇合进入梅江,主要流经兴宁盆地,全长 107 km,流域面积 1 364.75 km<sup>2</sup>,占兴宁市总面积的 65%,是梅江流域面积最大的支流,被称为兴宁市的母亲河。宁江流域

属于亚热带季风性气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,全年气候温暖湿润,年均降水量 1 426 mm,降水主要集中在 4—9 月,年均气温 21.68℃,年平均日照时数 2 066 h。流域植被为亚热带季风常绿阔叶林、灌木林、人工林及果园,流域内林地约占总面积的 73%。流域地形狭长,北部、东部、西部均为山地,中部为宁江盆地,河流流速湍急,径流集流快,易出现洪峰。土壤类型以水稻土、赤红壤为主。

### 1.2 数据来源

(1) 水文气象数据。包括宁江流域 5 个气象站点 1986—2013 年日降水量、气温及宁江控制站河口水文站 1986—2013 年月径流量,数据来源中国气象数据共享网及梅州市水文局。

(2) 空间数据。流域 DEM 数据来自于中国科学院国际科学数据服务平台,空间分辨率为 30 m;使用 1986 年、1995 年、2005 年、2013 年 Landsat TM 影像,在 ENVI 5.1 中进行校正、裁剪等预处理后,采取监督分类方法对其进行目视解译,为提高解译精度,开展流域野外实地调查采样,建立目视解译标志和标准,解译后 Kappa 系数为 0.86,分类精度较好。参照全国土地分类方法和当地实际情况,将宁江流域土地利用类型分为林地、草地、耕地、建筑用地和未利用土地。

## 2 研究方法

### 2.1 Mann-Kendall 检测方法

Mann-Kendall 检验法是气象学及气候学中经常用来进行突变检验的一种方法,适用于水文变量的趋势检验及突变点确定,该方法已经被很多学者成熟运用于气象变化分析<sup>[12-15]</sup>,详细原理及计算方法见参考文献<sup>[16]</sup>。

### 2.2 小波分析法

Morlet 小波是一种常用分析水文长时间序列变化的复值小波<sup>[17]</sup>,本文选用 Morlet 函数分析宁江径流降水气温周期及突变点。Morlet 小波函数变化系数。

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \sum_{k=1}^N f(k) e^{ikt} e^{-t^2/2} \quad (1)$$

式中:  $W_f(a, b)$  为小波变换系数;  $a$  为尺度伸缩因子,反映小波的周期长度;  $b$  为时间平移因子;  $t$  为时间变量;  $c$  值常取 6。将小波系数的平方值在  $b$  域上积分,就可得到小波方差,即

$$\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (2)$$

小波方差随尺度  $a$  的变化过程,称为小波方差图,它能反映信号波动的能量随尺度  $a$  的分布<sup>[18]</sup>。小波方差图可以用来确定信号中不同种尺度扰动的相对强度和存在的主要时间尺度,即主周期。

### 2.3 累积量斜率变化率分析方法

为定量区分降水量、蒸发量与其他因素对径流量的贡献率,王随继提出了累积斜率变化率比较法。假设基准期和变异期的降水量为  $P$ ,累积降水量一年份线性方程的斜率分别为  $K_{Pa}, K_{Pb}$  (mm/a),斜率变化率为  $S_P$ ;蒸散发为  $E$ ,累积蒸散发量一年份线性方程的斜率分别为  $K_{Ea}, K_{Eb}$  (mm/a),斜率变化率为  $S_E$ ;径流量为  $R$ ,累积径流量一年份线性方程的斜率分别为  $K_{Ra}, K_{Rb}$  (亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ),斜率变化率为  $S_R$ <sup>[7,19]</sup>。

则累积降水量斜率变化率  $S_P$  为

$$S_P = (K_{Pb} - K_{Pa}) / K_{Pa} \quad (3)$$

累积蒸散发斜率变化率  $S_E$  为

$$S_E = (K_{Eb} - K_{Ea}) / K_{Ea} \quad (4)$$

累积径流量斜率变化率  $S_R$  为

$$S_R = (K_{Rb} - K_{Ra}) / K_{Ra} \quad (5)$$

降水对径流量变化贡献率为

$$C_P = 100 \times \frac{S_P}{S_R} \quad (6)$$

蒸散发对径流量变化的贡献率  $C_E$  为

$$C_E = 100 \times \frac{S_E}{S_R} \quad (7)$$

人类活动对径流量变化的贡献率  $C_H$  为

$$C_H = 100 - C_P - C_E \quad (8)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 气温、降水、径流变化趋势规律分析

宁江流域 1953—2013 年均气温变化呈不断上升趋势(图 1A),年际变化率为  $0.139^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。1953—1992 年气温变化波动较小,1992 年以来气温呈现突变升高,年际气温变化率为  $0.172^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。5 a 滑动气温曲线显示 1967—1971 年 5 a 的气温均值最低,为  $21.04^\circ\text{C}$ ,5 a 均值最大出现在 1998—2002 年为  $22.13^\circ\text{C}$ 。1953—2013 年宁江流域年均温累积距平曲线显示气温变化大致经历稳中下降到快速上升的阶段(图 1B),年均温累积距平在 1997 年达到最小,并在 1997 年之后急剧上升。

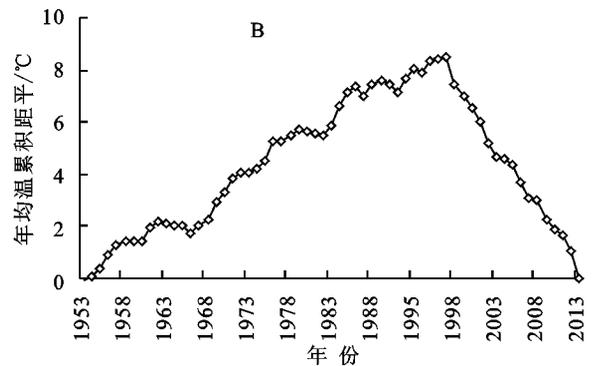
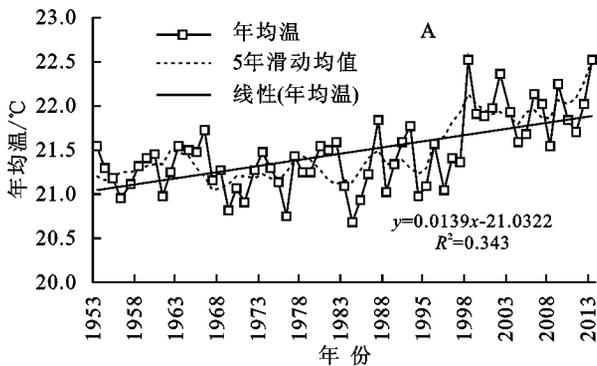


图 1 年均温年际变化和累积距平曲线

图 2 为宁江流域 1953—2013 年降水量及累计距平变化趋势图,年均降水量变化较为平稳,未出现明显上升下降趋势。年降水量最大值出现在 1959 年,为  $2171.5 \text{ mm}$ ,最小值出现在 1991 年为  $801.5 \text{ mm}$ 。降水累积距平曲线显示年降水在 1959—1961 年及 1998—2011 年降水量较多,其余时间年降水较少,采用 R/S 分析法预测未来趋势变化,其 Hurst 指数为  $0.28 < 0.5$ ,表明未来降水量增加不显著。

气温和降水是径流变化的两个重要气象因素。从 1953—2013 年宁江流域年径流量变化(图 3)可以看出呈下降趋势,尤其在 1983 年以来径流量出现大幅度下降,其年际变化趋势率为  $-0.189 \text{ 亿 m}^3/10 \text{ a}$ 。年降水量累积距平曲线图 3B 反映径流量在 1958—1963 年,1973—2001 年呈增加趋势,在 1963—1973 年及 2001—2013 年为下降趋势。

### 3.2 气温、降水、径流变化分析

为进一步明确宁江流域气温、降水、径流变化趋势,利用 Mann-Kendall 检验方法分别计算宁江流域近 60 a 来气温、降水、径流量的时间序列的秩序列(图 4),从图 4A 可以看出年均温 UF 始终大于 0 且超过  $\alpha=0.05$  置信水平,计算  $U=4.38$ ,  $|U| > U_{\alpha/2}$ ,表明近 60 a 来宁江流域气温呈显著上升趋势,并在 1998 年发生突变,结合图 1 发现 1998 年气温陡升,在 1998—2013 年以来保持较高平稳的气温状态。由图 4B 中可以看出近 60 a 宁江流域降水量曲线始终未达到显著水平,显示近 60 a 流域降水较为稳定,上下波动较小,但降水量在 1958 年及 2009 年附近发生突变,1958 年附近降水量出现急剧上升,2009 年降水量出现急剧下降。而宁江流域径流量曲线图 5CUF 在 1971 年之后不断上升,并在 1986 年 UF 曲线超过

临界值,从 1986 年以后降水量逐步下降经计算  $U = -2.08$ ,  $|U| > U_{\alpha/2}$ ,径流量出现显著下降趋势,尤其 2007 年以来径流量出现急剧下降,径流量 M-K 趋势变化图和降水量整体保持一致,且径流量与降水量相同在 1958 年及 2009 年附近出现突变,主要受降水量变化影响。

### 3.3 气温、降水、径流周期性变化规律分析

对 1953—2013 年宁江流域气温、降水量及出口控制站河口站径流量标准化距平系列采用 Matlab 软件 Morlet 小波做连续变换,并借助 Surfer 10.0 绘制出 1953—2013 年宁江流域年气温、降水量、径流量变化的小波系数实部等值线图 5。图中横坐标为时间尺度,纵坐标为频域尺度。图中小波系数的正、负分别表示径流量的偏多与偏少,小波系数为零对应着突

变点,等值线中心对应的时间尺度为水沙时间序列变化的主周期<sup>[7,19-20]</sup>。从宁江流域气温小波系数实部图 5A 可以看出气温主要存在以 28 a 为尺度中心的 20~30 a 变化周期,该年代震荡周期最为明显,形成四个高震荡中心和三个低震荡中心,气温出现高一低一高一低一高一低一高一准 4 次高交替震荡。高震荡时间分别出现在 1953—1958 年、1972—1980 年、1990—1998 年、2008—2013 年,表明这四个时间段气温较高。3 个低震荡中心出现在 1960—1969 年、1981—1988 年以及 1999—2007 年,表明这三个时间段气温较低,其中 1953—1977 年及 2000—2013 年间气温震荡较大,其余时间段波动较小。而到 2013 年震荡周期等值线远未闭合,说明 2012 年以后宁江流域气温会持续升高。

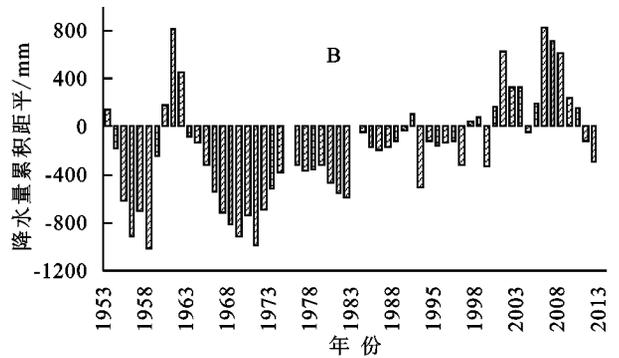
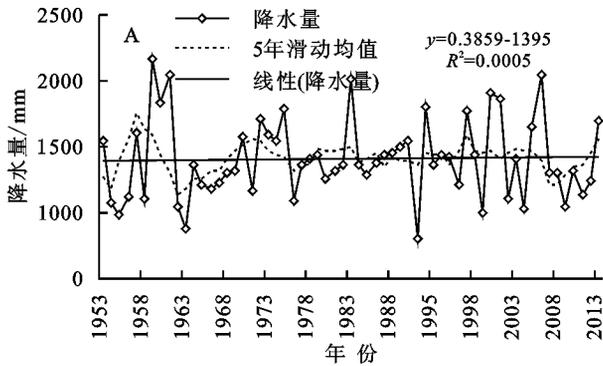


图 2 宁江流域年降水量年际变化和累积距平曲线

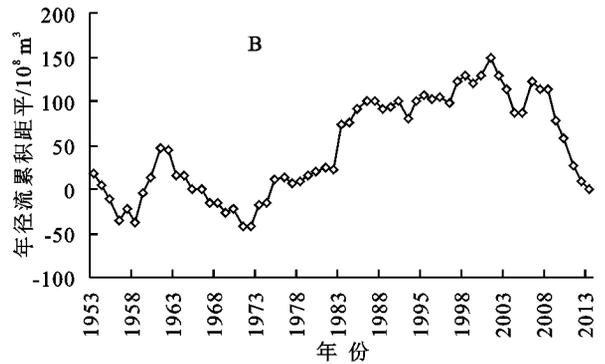
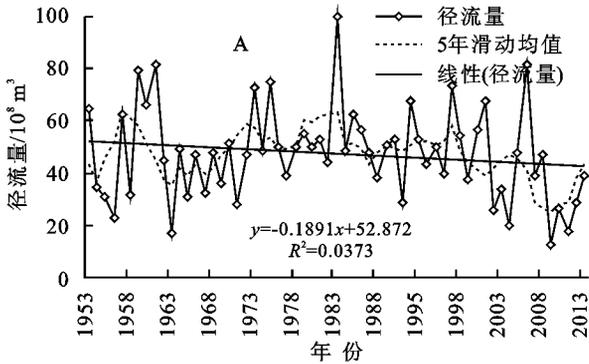


图 3 年径流年际变化和累积距平曲线

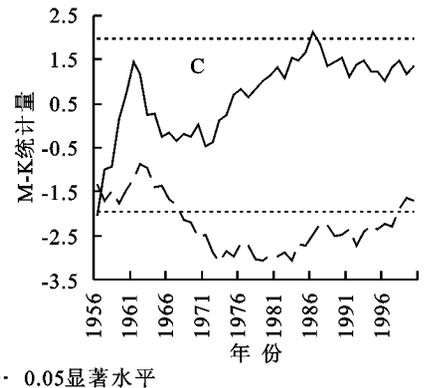
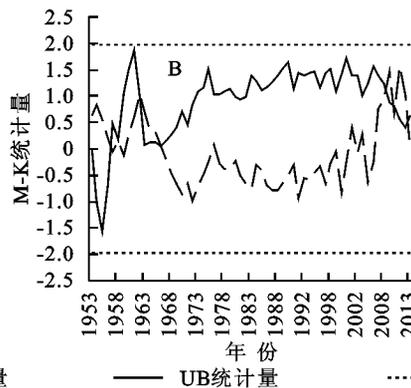
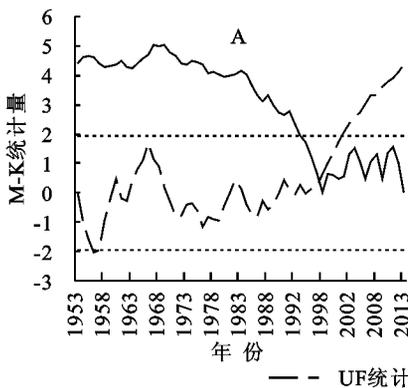


图 4 宁江流域气温、降水、径流 Mann-Kendall 曲线



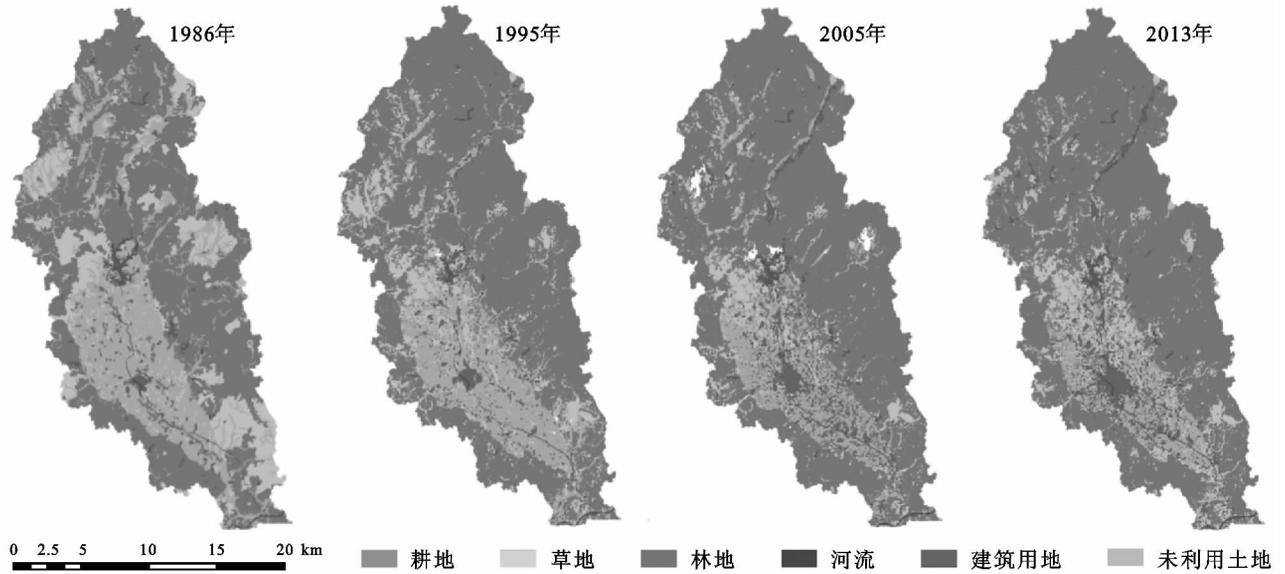


图 6 1986—2013 年宁江流域景观格局

表 1 1986—2013 年宁江流域土地利用类型面积变化比例

土地类型	1986 年	1995 年	2005 年	2013 年
耕地	22.70	18.20	13.36	8.81
林地	58.45	64.60	70.32	73.82
草地	16.62	13.35	10.34	9.69
河流	0.96	0.99	0.96	0.91
建筑用地	0.83	2.37	4.39	5.50
未利用土地	0.43	0.49	0.58	1.17

从表 2 看出, B 与 A 时期相比, 累积径流量斜率年均增加 6.13 亿  $m^3$ , 增加率为 16.7%。同期相比, 累积降水量斜率年均增加 201 mm, 增加率为 16.2%, 累积蒸发量斜率年均增加 88 mm, 根据公式计算降水与蒸发量对径流贡献率为 62.2%, 而人类活动在此时期由于毁林开荒, 滥砍滥伐等对流域森林植被的破坏, 加重水土流失, 增大局部的流域量, 对径流增加贡献率为 37.8%。

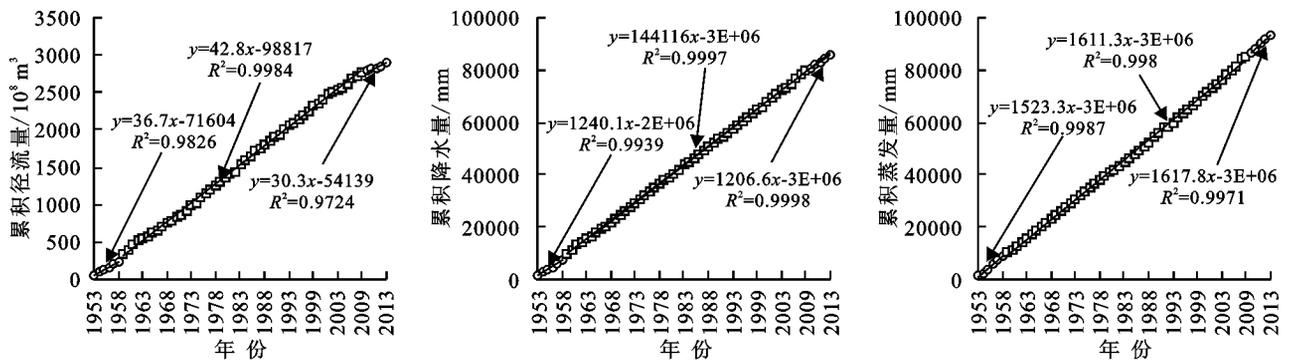


图 7 宁江流域累积径流量累积曲线、降水量累积曲线及蒸发量累积曲线

C 与 A 时期相比, 累积径流量斜率年均减少 8.39 亿  $m^3$ , 减少率为 19.4%, 出现严重下降。同期相比, 累积降水量斜率年均减少 34 mm, 减小率仍为

2.7%, 累积蒸发量斜率年均增加 6.2%, 计算得出降水及蒸发量对径流减少贡献率为 45.8%, 人类活动贡献率为 54.2%。

表 2 宁江流域径流量、降水量、蒸发量不同时期累积斜率及变化率

项目	时间段	累积斜率	与斜率 A 相比		与斜率 B 相比	
			变化量/mm	变化率/%	变化量/mm	变化率/%
径流量	A: 1953—1958	36.7				
	B: 1959—2009	42.8	6.13	16.7		
	C: 2010—2013	30.3	-8.39	-19.4	-12.5	-29.2
降水量	A: 1953—1958	1240				
	B: 1959—2009	1441	201	16.2		
	C: 2010—2013	1206	-34	-2.7	-124	-8.6
蒸发量	A: 1953—1958	1523				
	B: 1959—2009	1611	88	5.8		
	C: 2010—2013	1617	94	6.2	6	0.4

## 4 讨论

宁江流域 1953—2013 年径流量在气温升高、降水波动不大情况下出现显著下降,突变年份出现在 1958 年和 2008 年。王随继学者提出的累计量斜率变化率比较法在干旱半干旱区评估中忽略蒸散发因素,鉴于华南地区蒸发量较大且宁江流域内近 60 a 气温呈上升趋势,本文在计算气候变化对径流贡献率时加上蒸散发,计算得到 1959—2008 年流域内径流减少贡献率中气候变化占 62.2%,人类活动为 37.8%;2009—2013 年气候变化对流域径流量减少贡献率为 45.8%,人类活动贡献率为 54.2%。1953—2013 年宁江流域径流量序列变化中存在 1958 年,2008 年两个突变点,而降水量也存在 1958 年,2008 年两个突变点,表明流域内径流量受降水影响较大。加上宁江流域近 60 a 气温升高,计算出华南地区人类活动对径流贡献比王随继学者在西北半干旱区结果 83.19% 小,表明在华南地区由于径流量较大,人类活动对径流影响比干旱区小,利用这一方法得出结论与林凯荣等对东江流域人类活动贡献率分析结果较为吻合<sup>[10]</sup>。

## 5 结论

(1) 宁江流域近 60 a 来气温呈显著上升趋势,上升 1.05℃,且达到显著水平,降水量较为稳定,上下波动较小,未达到显著水平,径流量在 1984 年以来出现持续显著下降趋势,近 60 a 下降 8.39×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,占流域多年平均的 19.4%。

(2) 1990 年前流域内径流量与气温、降水存在较为明显的 27 a 周期规律,1990 年以来流域内受人类活动影响较大,径流量变化周期受到破坏,未能体现全域性;但在小尺度周期 11 a 上仍与降水量保持同步,表明宁江流域径流量主要受降水影响。

(3) 随着经济发展以及水土保持工作的开展,到 2013 年林地面积占整个流域的 73.8%,耕地面积则由 1986 年的 22.7% 下降到 2013 年的 8.81%。林地面积的增加对流域水土保持及防治水土流失起到重要作用,同时也有效吸收降水,增加径流量下渗。

(4) 宁江流域 1953—2013 年径流量存在 1958 年、2008 年两个突变年份,降水量也存在两个 1958 年、2008 年两个突变年份。以 1953—1958 年为基准期,计算出气候变化和人类活动在 1959—2008 年宁江流域径流量增加中贡献率分别为 62.2% 和 37.8%,在 2009—2013 年径流量减少中贡献率分别占 45.8% 和 54.2%。在华南地区由于径流量较大且主要受降水影响,人类活动对径流贡献率比干旱区小。

## 参考文献:

- [1] 刘昌明,张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报, 2004, 59(3): 323-330.
- [2] 王钧,蒙古军. 黑河流域近 60 年来径流量变化及影响因素[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 83-88.
- [3] 刘宇峰,孙虎,原志华. 基于小波分析的汾河河津站径流与输沙的多时间尺度特征[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 764-770.
- [4] Kuang C, Su P, Gu J, et al. Multi-time scale analysis of runoff at the Yangtze estuary based on the Morlet Wavelet Transform method[J]. Journal of Mountain Science. 2014, 11(6): 1499-1506.
- [5] 潘威,郑景云,萧凌波,等. 1766 年以来黄河中游与永定河汛期径流量的变化[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 975-982.
- [6] 吴创收,杨世伦,黄世昌,等. 1954—2011 年珠江入海水沙通量变化的多尺度分析[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 422-432.
- [7] 王随继,闫云霞,颜明,等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 388-397.
- [8] 白乐,李怀恩,何宏谋. 降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2078-2088.
- [9] 胡珊珊,郑红星,刘昌明,等. 气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 62-70.
- [10] 林凯荣,何艳虎,陈晓宏. 气候变化及人类活动对东江流域径流影响的贡献分解研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1312-1321.
- [11] 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.
- [12] 樊辉,何大明. 怒江流域气候特征及其变化趋势[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 621-630.
- [13] 李鹏飞,刘文军,赵昕奕. 京津冀地区近 50 年气温、降水与潜在蒸散量变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 137-143.
- [14] 陈睿,桑燕芳,王中根,等. 1956—2010 年甬江流域降水变化特性分析[J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1149-1156.
- [15] Zhang Q, Xu C Y, Zhang Z, et al. Spatial and temporal variability of precipitation over China, 1951—2005 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 95(1): 53-68.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [17] 王文圣,丁晶,向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 515-520.
- [18] 王文圣,丁晶,衡彤,等. 水文序列周期成分和突变特征识别的小波分析法[J]. 工程勘察, 2003(1): 32-35.
- [19] 刘晓琼,刘彦随,李同昇,等. 基于小波多尺度变换的渭河水沙演变规律研究[J]. 地理科学, 2015, 35(2): 211-217.