

气候变化和人类活动对汀江径流量变化的贡献

张 杰, 张正栋*, 万露文, 杨传训, 叶 晨

(华南师范大学地理科学学院, 广州 510631)

摘要:基于汀江流域控制站(溪口站)1965—2012年日均径流量实测数据及长汀、上杭、永定气象站逐日降水量、逐日气温资料,采用年段均值比较、5a滑动、趋势线分析和累积距平等方法,分析流域近50年来的径流量序列,揭示径流量变化的趋势,判别径流量变化的突变年份,划分径流量变化的阶段.并应用改进后的累积量斜率变化率比较法定量估算了近50年来气候变化和人类活动对汀江径流量变化的贡献率.结果表明:(1)径流量总体呈现下降—上升—下降的波动,判别突变年份为1972、2001年,划分径流变化阶段为1965—1972年(A阶段)、1973—2001年(B阶段)、2002—2012年(C阶段);(2)与A阶段相比,B、C阶段气候变化对径流量变化的贡献率分别为65.1%、50.5%,而人类活动对径流量变化的贡献率为34.9%、49.5%,可见人类活动对径流量变化贡献日趋突出.

关键词:径流量;气候变化;人类活动;贡献率;汀江

中图分类号:P333.6

文献标志码:A

文章编号:1000-5463(2017)06-0084-08

The Contributions of Climate Change and Human Activities on Runoff of the Tingjiang River

ZHANG Jie, ZHANG Zhengdong*, WAN Luwen, YANG Chuanxun, YE Chen

(School of Geography Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: Based on 1965–2012 average daily runoff measured data of control hydrometric station (Xi Kou) in the Tingjiang Basin, and daily precipitation and daily temperature of three meteorological stations in the Tingjiang Basin (Chang Ting, Shang Hang, Yong Ding). Paragraph mean comparison, 5a sliding trend line analysis and cumulative anomaly methods are used to analyze runoff series in recent 50 years. The trend of runoff variation is revealed. The mutation years of runoff variation are identified. The stages of runoff variation are divided. The improved cumulative slope rate comparison method is used to quantitatively analyze the contribution rate of the climate change and human activities to runoff variation of Tingjiang in nearly 50 years. The results show that: (1) The runoff shows a down-up-down fluctuation in general, and the mutation year is 1972 and 2001, the variation stages of runoff are 1965–1972 (stage A), 1973–2001 (stage B), 2002–2012 (stage C). (2) Comparing with stage A, the contribution rates of climate change to runoff variation in stage B and C are 65.1% and 50.5%, respectively, while the contribution rate of human activities to runoff variation is 34.9% and 49.5%, respectively. This shows that the contribution of human activities to the change of runoff is increasing prominent.

Key words: runoff; climate change; human activity; contribution rate; Tingjiang River

气候变化和人类活动是影响径流量变化的主要因素.近几十年来,随着全球气候不断变化和人类活动加剧,我国一些河流的径流量明显减少^[1-3],引起了水资源的严重短缺,激化了供需矛盾,而且对周边及其下游、入海口产生一定程度的影响^[4-6].因此,定量研究气候变化和人类活动对河流径流量的

影响,查明径流量的变化特征和变化趋势,分析其产生的原因,具有重要的实践意义.

目前气候变化和人类活动对径流量影响的定量研究方法主要是水文模型模拟法和数理统计分析法.水文模型模拟法主要适用于小流域且具有较好的物理基础,但参数的敏感性存在一定的不确定性,

如果对模拟的结果不进行验证,很有可能导致气候变化对径流量的影响偏大^[7]。数理统计分析法虽然比较简单,但需要较长的数据序列,且对水文气象观测资料要求较高,且长时间尺度的数据序列中的噪声会对计算结果造成干扰。2012年,王随继等^[8]提出累积径流量斜率变化率比较法,以消除噪声对计算结果的干扰,定量研究气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率。之后国内大量学者在该方法的基础上对长江流域、黄河流域和松花江流域径流量变化进行研究,发现这些流域径流量在气候变化和人类活动的影响下基本呈现不同程度减小的趋势^[9-12],并且人类活动逐渐成为径流量变化最重要的影响因素^[13-15]。

汀江哺育了闽西地区约70%(近200余万)人口,是客家人的母亲河,近年来随着农业、城市化进程的加快和人口的不断增多,流域内人类活动愈发活跃,使得水循环的时空分布特征以及生态水文都发生较为显著变化,导致该流域出现水土流失、洪涝灾害频发、极端降水等一系列的生态环境问题。虽然对于汀江流域的径流量已开展了一些研究^[16-18],但是很少有涉及气候变化和人类活动对径流量变化贡献的定量估算。

本文基于1965—2012年汀江流域下游控制站(溪口站)实测水文数据和流域内上中下游3个国家气象站(长汀站、上杭站和永定站)逐日降水量、逐日气温数据,采用年段均值比较、5a滑动、趋势线分析、累积距平和改进后的累积径流量斜率变化率比较法,对近50年来气候变化和人类活动对汀江径流量变化进行定量分析,为汀江流域水资源管理和可持续利用提供有意义的参考。

1 研究区概况

本次研究区选择的是汀江流域(图1)。汀江是闽西最大河流,位于东经 $115^{\circ}59' \sim 117^{\circ}10'$ 、北纬 $24^{\circ}28' \sim 26^{\circ}02'$,位于福建省西部,发源于武夷山南段东南一侧的宁化县治平乡境内木马山北坡,植被覆盖度比较好,流经长汀县、武平县、上杭县和永定县,在永定县峰市镇进入广东省,至大埔县三河坝与梅江汇合后称韩江。流域面积为 $9\,022\text{ km}^2$,干流长度约285 km;支流众多,流域面积大于 500 km^2 以上的支流有:濯田河、桃澜溪、旧县河、黄潭河、永定河和金丰溪。汀江地处亚热带季风区,气候温和,降水

充足,多年平均降水量为 $1\,500 \sim 2\,000\text{ mm}$,雨量由北向南递减,5—7月雨量集中,约占全年总雨量的60%。汀江水哺育闽西约占70%的近200余万人口,其下游的韩江水则是沿岸1717.21余万粤东百姓的生命之源。

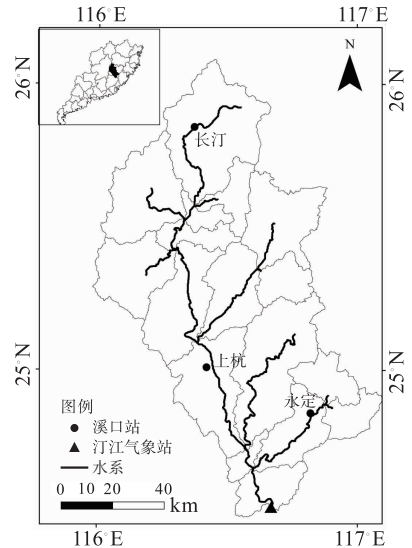


图1 汀江流域图

Figure 1 Sketch map of the Tingjiang River Basin

2 数据来源及研究方法

2.1 研究数据

水文数据收集了汀江流域控制站(溪口站)1965—2012年日径流量的实测数据,溪口站控制的流域面积为 $8\,657\text{ km}^2$,占总流域面积的96%,实测数据较为完整,且研究时间序列较长,可以满足研究的需要。

气象数据选用了汀江流域长汀站、上杭站和永定站等3个国家气象站(图1)1965—2012年逐日降水量、逐日气温数据,数据主要来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)。流域的面降水量采用3个站点的算术平均值表示。虽然汀江流域内只有3个国家站数据,气象站点较少,但长汀站位于汀江上游,上杭站位于汀江中游,永定站位于汀江下游支流,站点分布较均匀,具有一定的代表性,所以选取这3个站可以满足研究的需要,且各气象站点气象数据无明显的突变点和随机变化,数据变化较为一致,数据可靠,可以代表区域气候状况。

2.2 研究方法

2.2.1 数理统计分析方法 采用年段均值比较、5a滑动、趋势线分析和累积距平的方法,分析1953—

2012年汀江流域径流量、降水量、气温的变化特征和趋势. 采用累积距平法不仅可以分析径流量、降水量、气温长时间序列变化特征,而且识别的径流量、气温和降水量长时间序列突变年份清晰,突变前后双累积量的线性关系拟合性较高,可以避免近年来被广泛采用的降水量-径流量双累积曲线方法在判断突变年份上存在的缺陷^[19].

2.2.2 改进的累积量斜率变化率比较法 本研究改进了累积量斜率变化率比较法^[8],使用改进后的累积量斜率变化率比较法分析气候变化和人类活动对径流量变化的影响程度.

参考的累积量斜率变化率比较法过程如下:

假设累积径流量-年份线性关系式的斜率(km^3/a)在拐点前后2个时期分为 S_{Rb} 和 S_{Ra} ,累积降水量-年份线性关系式的斜率(mm/a)在拐点前后2个时期分为 S_{Pb} 和 S_{Pa} ,则累积径流量-年份线性关系式的斜率变化率 R_{SR} (%)为:

$$R_{SR} = 100 \times (S_{Ra} - S_{Rb}) / S_{Rb} = (S_{Ra} / S_{Rb} - 1) \times 100, (1)$$

累积降水量-年份线性关系式的斜率变化率 R_{SP} (%)为:

$$R_{SP} = 100 \times (S_{Pa} - S_{Pb}) / S_{Pb} = (S_{Pa} / S_{Pb} - 1) \times 100, (2)$$

其中, R_{SR} 、 R_{SP} 为正数时表示斜率增大,为负数时表示斜率减小. 降水量变化对径流量变化的贡献率 C_P (%)可以表示为:

$$C_P = 100 \times (R_{SP} / R_{SR}) = 100 \times (S_{Pa} / S_{Pb} - 1) / (S_{Ra} / S_{Rb} - 1). (3)$$

气温变化导致蒸发量变化而引起径流量变化,如果用 C_{ET} 表示流域内累积蒸散总量一年之间线性关系的斜率变化率(%),则人类活动对径流量变化的贡献率 C_H (%)可以表示为:

$$C_H = 100 - C_P - C_{ET}. (4)$$

径流量变化是气候变化和人类活动共同作用的结果,所以,可将径流量的影响只分为气候变化和人类活动两大类;而气候变化对径流量的影响主要体现为水、热方面,且长时间序列持续观测的蒸散量数据较难获取,因此,可将各类气候因子变化归结为两大因素:水和热,体现为降水量和气温. 为了满足气候对径流量影响计算的合理性,体现水热综合变化对径流量变化影响,本文采用累积降水量-累积平均气温线性关系式的斜率变化率来代替单因子-年份线性关系式的斜率变化率.

以 C_C 表示气候变化对径流量变化的贡献率(计算方法同式(3)),则改进后人类活动对径流量变化

的贡献率可表示为:

$$C_H = 100 - C_C. (5)$$

3 结果与分析

3.1 径流量分析

由图2~图4及表1可知:(1)汀江流域的年径流量变化波动较大,尤其在1971—1980、2001—2012年:1971—1980年与1965—1970年相比,年代平均径流量增加 1.55 km^3 ,即增加了21.08%;2001—2012年与1991—2000年相比,年代平均径流量减少 1.08 km^3 ,即减少了11.9%. 年径流量近50a总体呈现微弱上升趋势,但在近10a径流量明显减少.(2)近50a降水量总体呈现微弱上升的趋势,在1971—1980、2001—2012年波动较大:1971—1980年与1965—1970年相比,年代降水量增加101 mm,即增加了6.55%;2001—2012年与1991—2000年相比,年代降水量减少82 mm,即减少了4.82%. 多年平均气温总体呈现上升的趋势.

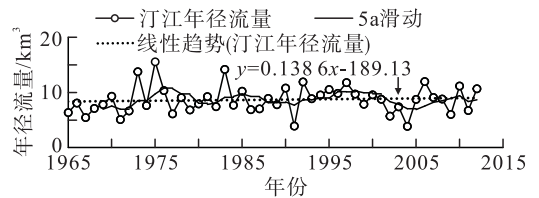


图2 汀江流域径流量年际变化和总体趋势(1965—2012年)
Figure 2 Annual variations and general tendency of runoff of the Tingjiang Basin from 1965 to 2012

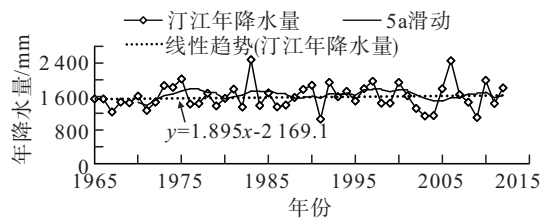


图3 汀江流域降水量年际变化和总体趋势(1965—2012年)
Figure 3 Annual variations and general tendency of precipitation of the Tingjiang Basin from 1965 to 2012

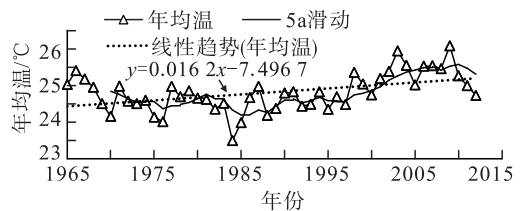


图4 汀江流域年平均气温年际变化和总体趋势(1965—2012年)
Figure 4 Annual variations and general tendency of air temperature of the Tingjiang Basin from 1965 to 2012

表1 汀江流域径流量、降水量、平均气温年代变化及相对变化率(1965—2012年)

Table 1 Decade changes of runoff, precipitation, air temperature and relative variation ratios of the Tingjiang Basin from 1965 to 2012

年份	年代平均 径流量/km ³	年代降水量/ mm	年平均 气温/°C	径流量相对 变化率/%	降水量相对 变化率/%	气温相对 变化率/%
1965—1970	7.33	1 540	24.9	—	—	—
1971—1980	8.88	1 641	24.6	21.08	6.55	-1.09
1981—1990	9.00	1 684	24.4	1.36	2.60	-0.82
1991—2000	9.33	1 703	24.7	3.73	1.13	1.34
2001—2012	8.25	1 621	25.4	-11.90	-4.82	2.69

由此可知,在人类活动影响较小的情况下,径流量随着气候的变化呈现有规律的变化,但随着人类利用和改造自然能力的不断加强,日趋活跃的人类活动也会对径流量变化幅度产生影响,所以根据人类活动的强弱,将径流量变化的影响因素分为气候变化作用、气候变化和人类活动共同作用,接下来根据不同影响因素划分不同阶段。

3.2 径流量、降水量及平均气温突变分析及阶段划分

由图5可知,汀江流域径流量在1972年前后呈现从减少到增加的趋势,2001年前后呈现从增加到减少的趋势,显然径流量发生突变年份为1972、2001年。汀江流域的年降水量变化大致也呈现减少—增加—减少的趋势,降水量突变的年份大致也为1972、2001年,年均温大致呈现减少—增加的趋势,1972年呈现减少趋势,2001年呈现上升趋势,因此可以根据累积距平值确定汀江流域的突变年份为1972、2001年。

根据上述突变年份把汀江流域径流量变化划分为3个阶段:1965—1972年为基准期(A阶段),径流量主要受到气候变化的影响;1973—2001年为第2个阶段(B阶段),2002—2012为第3个阶段(C阶段),B、C阶段径流量主要受到气候变化和人类活动的双重影响,气候变化和人类活动对径流量变化的贡献率是需要定量分析的问题。

3.3 气候变化和人类活动对径流量变化的贡献

利用径流量的突变年份为分界点,分别对不同时期年份与累积径流量、降水量与平均气温累积变化进行线性回归分析(图6、图7)。两类关系式的决定系数 R^2 均大于0.99,表明相关性很强,均达到0.01的显著水平。

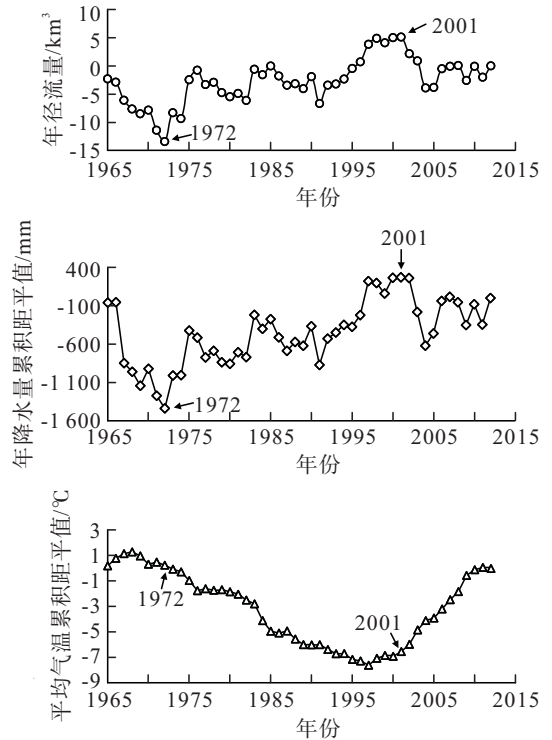


图5 汀江流域径流量、降水量、平均气温累积距平值(1965—2012年)

Figure 5 The variations of cumulative anomaly of runoff, precipitation, and air temperature of the Tingjiang Basin from 1965 to 2012

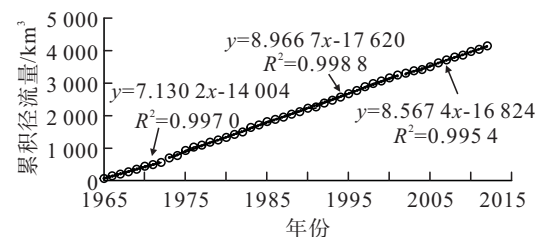


图6 汀江流域累积径流量—年份线性关系(1965—2012年)

Figure 6 Linear relationships between year and cumulative runoff on the Tingjiang River Basin from 1965 to 2012

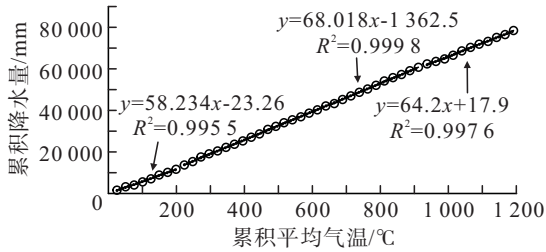


图 7 汀江流域累积降水量-累积平均气温线性关系 (1965—2012 年)

Figure 7 Linear relationships between cumulative air temperature and cumulative precipitation on the Tingjiang River Basin from 1965 to 2012

表 2 汀江流域累积径流量-年份的线性关系式斜率及其变化率 (1965—2012 年)

Table 2 The slope of the linear relationship between cumulative runoff and year and its change rate in Tingjiang Basin from 1965 to 2012

阶段	累积径流量-年份 线性关系式斜率/ ($\text{km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	B、C 阶段与 A 阶段比较		C 阶段与 B 阶段比较	
		关系式斜率变化量/ ($\text{km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	相对变化率/%	关系式斜率变化量/ ($\text{km}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	相对变化率/%
A	7.130 2	—	—	—	—
B	8.966 7	1.836 5	25.8	—	—
C	8.567 4	1.437 2	20.2	-3.99	-4.5

表 3 汀江流域累积降水量-累积平均气温的线性关系式斜率及其变化率 (1965—2012 年)

Table 3 The slope of the linear relationship between cumulative precipitation and accumulated mean temperature and its change rate in Tingjiang Basin from 1965 to 2012

阶段	累积降水量-累积 平均气温线性关系式 斜率/($\text{mm} \cdot \text{°C}^{-1}$)	B、C 阶段与 A 阶段比较		C 阶段与 B 阶段比较	
		关系式斜率变化量/ ($\text{mm} \cdot \text{°C}^{-1}$)	相对变化率/%	关系式斜率变化量/ ($\text{mm} \cdot \text{°C}^{-1}$)	相对变化率/%
A	58.23	—	—	—	—
B	68.01	9.78	16.8	—	—
C	64.20	5.97	10.2	-3.81	-5.6

表 4 气候变化和人类活动对汀江流域径流量变化的贡献率 (1965—2012 年)

Table 4 The contribution of precipitation and human activities to runoff change in Tingjiang Basin from 1965 to 2012

阶段	B、C 阶段与 A 阶段比较		C 阶段与 B 阶段比较	
	气候变化	人类活动	气候变化	人类活动
	$C_C/\%$	$C_H/\%$	$C_C/\%$	$C_H/\%$
A	—	—	—	—
B	65.1	34.9	—	—
C	50.5	49.5	124	-24

究其原因,人类活动的影响增大导致汀江流域径流量也处于增加的态势,主要是由于人类活动使流域内植被减少、水土流失、城镇化等,导致下垫面条件发生变化,地面不透水面积增加,流域内透水性

由表 2、表 3 可知, B 阶段与 A 阶段相比,累积径流量-年份线性关系式的斜率变化量为 $1.836 5 \text{ km}^3/\text{a}$,增加率为 25.8%,累积降水量-累积平均气温线性关系式的斜率变化量为 $9.78 \text{ mm}/\text{°C}$,增加率为 16.8%,由此根据式(3)、(4)可以得到气候变化和人类活动对汀江径流量增加的贡献率分别为 65.1%、34.9%(表 4);C 阶段与 A 阶段相比,累积径流量-年份线性关系式的斜率变化量为 $1.437 2 \text{ km}^3/\text{a}$,增加率为 20.2%,累积降水量-累积平均气温线性关系式的斜率变化量为 $5.97 \text{ mm}/\text{°C}$,增加率为 10.2%,由式(3)、(5)可以得到气候变化和人类活动对汀江径流量增加的贡献率分别为 50.5%、49.5%(表 4)。

能和滞水性能变差,下渗减少,从而引起流域内径流量的增加^[20]:(1)20 世纪七八十年代,汀江流域城市化进程加快,经济发展,人口增加,住宅和粮食问题日益突出,以及缺乏科学的指导,出现不合理的土地利用方式,1980—2010 年流域土地利用方式发生较大变化,建筑用地增加 238.03 km^2 ,草地面积减少 34.38 km^2 ,林地面积减少 34.38 km^2 ,水域面积增多 57.25 km^2 (数据来自地理空间数据云 <https://www.gscloud.cn/>)。流域内植被覆盖度下降,不透水面积增加,水土流失严重,使流域径流量增加。(2)汀江流域多山地,人们不合理的耕作方式(粗放坡地耕种)加剧了水土流失,导致汇入河流径流量增多。如农民在 25° 以上的陡坡开荒,且顺坡做成旱田,时种时荒。虽然近年来,区域内大于 25° 坡耕地基本退耕

还林,但由于整个区域内属于山多地少、人多地缺矛盾较为突出的地区,且原有的耕作习惯短时间内无法改变,仍存在较多的坡耕地种植旱粮等经济作物^[21]。(3)汀江流域有5个主要县区存在不同程度的崩岗侵蚀,共有崩岗2 677个,占福建省崩岗个数的40%,平均密度达0.297个/km²,是全省平均值的5.5倍,汀江流域土地面积占福建省土地面积的7%,而崩岗总面积达2 086.86 hm²,占福建省崩岗总面积的79%,其中以长汀、上杭两县最为严重^[22]。

C阶段与B阶段相比,累积径流量-年份线性关系式的斜率变化量为-0.399 a/km³,减少率为4.5%,累积降水量-累积平均气温线性关系式的斜率变化量为-3.81 mm/°C,减少率为5.6%,累积降水量-累积平均气温线性关系式的斜率减少率大于累积径流量-年份线性关系式的斜率减少率,气候变化和人类活动对于径流量变化的贡献率为124%、-24%。

C阶段与B阶段相比,是假设B阶段为基准期,该时段径流量变化只受到气候变化的影响,C阶段受到气候变化和人类活动的双重影响。通过式(3)、(5)计算可知,气候变化的贡献率超过了100%,所以说这个假设是不成立的,累积径流量-年份线性关系式的斜率变化率下降的幅度小于累积降水量-累积平均气温线性关系式的斜率变化率的下降幅度。究其原因,2002年以后一些大型水利工程的投入使用对径流起到一定影响^[23]。如2002年永定县境内汀江干流棉花滩峡谷河段中部棉花滩水电站通过检查验收投入使用,坝址以上控制流域面积7 907 km²,水库正常蓄水位173.0 m,死水位146.0 m,调节库容11.22亿m³,校核洪水位177.8 m,相应的总库容20.35亿m³^[24]。水利工程的建设对径流量起到了调蓄作用,使累积径流量-年份线性关系式的斜率变化率下降的幅度小于累积降水量-累积平均气温线性关系式的斜率变化率的下降幅度。

4 结论与讨论

本文基于汀江流域控制站(溪口站)1965—2012年日均径流量实测数据及长汀、上杭、永定气象站逐日降水量、逐日气温数据,采用数理统计方法和改进后的累积量斜率变化率比较法揭示了汀江流域近半个世纪以来径流量变化的趋势及主要影响因素的贡献率,主要结论如下:

(1)1965—2012年汀江流域径流量变化波动较大,呈现下降—上升—下降的趋势,其中1971—

1980年径流量相对于60年代增加21.8%,2001—2012年径流量相对于90年代减少了11.9%。降水量总体呈现微弱上升的趋势,在1971—1980、2001—2012年波动较大:1971—1980年相对于1965—1970年增加6.55%,2001—2012年相对于1991—2000年减少4.82%。平均气温总体呈现上升的趋势。

(2)汀江流域突变年份为1972年和2001年,1965—1972年这个阶段看做基准期(A阶段),径流量主要受到气候变化的影响。1973—2001年为第2个阶段(B阶段),2002—2012为第3个阶段(C阶段),B、C阶段径流量主要受到气候变化和人类活动的双重影响。B、C阶段相对于A阶段径流量变化率分别为25.8%、20.2%,降水-平均气温变化率分别为16.8%、10.2%,气候变化对径流量变化的贡献率分别为65.1%、50.5%,人类活动对径流量变化的贡献率分别为34.9%、49.5%,这与林凯荣等^[25]采用改进的SCS模型将气候变化和人类活动对东江流域(湿热地区)径流量影响的贡献进行分解研究得到各子流域中气候变化和人类活动对径流影响分量相当的结论相一致。研究结果表明,人类活动对径流量变化的影响在不断增强,即将超过气候变化对径流量的影响程度,因此需高度重视该流域的水资源利用。

本文对气候变化和人类活动对径流量变化的影响主要采用了改进后的累积量斜率变化率比较法,但只进行了局部改进,在研究气候变化对径流量变化的贡献率时,气候变化主要考虑了降水量和平均气温的变化(水热变化),并没有考虑蒸发对径流量变化的影响,如何将降水量、平均气温、蒸发量对径流量影响结合起来,是今后开展定量研究需要进一步攻克的地方。目前径流量变化的定量研究方法主要分为统计分析法和水文模型模拟法,所以在之后的研究中采用水文模型模拟法^[26-28]从形成机理上对径流量变化进行定量研究,对2种方法的研究结果进行对比是检验其合理性的方法之一。

参考文献:

- [1] 卢晓宁,洪佳,王玲玲.近50年来黄河入海水沙的多时间尺度特性分析[J].水土保持研究,2015,22(1): 115-122.
LU X N, HONG J, WANG L L. Multiple time-scale characteristics variations of runoff and sediment loading of yellow river to sea in recent 50 years[J]. Research on

- Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 115-122.
- [2] 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.
- LIU Y F, SUN H, YUAN Z H. Multitime scale features of runoff and sediment discharge on wavelet analysis at Hejin Station of Fenhe River Basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(6): 764-770.
- [3] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304.
- CHEN Y N, LI Z, FANG Y T, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 69(9): 1295-1304.
- [4] 吴创收, 杨世伦, 黄世昌, 等. 1954-2011年间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.
- WU C S, YANG S L, HUANG S C, et al. Multi-scale variability of water discharge and sediment load in the Pearl River during 1954-2011 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 69(3): 422-432.
- [5] 任惠茹, 李国胜, 崔林林, 等. 近60年来黄河入海水沙通量变化的阶段性与多尺度特征[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 619-631.
- REN H R, LI S G, CUI L L, et al. Phases and periodic changes of water discharge and sediment load from the Yellow River to the Bohai Sea during 1950-2011 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 69(5): 619-631.
- [6] 胡光伟, 毛德华, 李正最, 等. 荆江三口60a来入湖水沙变化规律及其驱动力分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 129-142.
- HU G W, MAO D H, LI Z Z, et al. Characteristics and driving factors of runoff and sediment changes fluxes into the Dongting Lake from three outlets in Jingjiang River during past 60 years [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(1): 129-142.
- [7] LEGESSE D, VALLET-COULOMB C, GASSE F. Hydrological response of a catchment to climate and landuse changes in Tropical Africa case study South Central Ethiopia [J]. Journal of Hydrology, 2003, 275(1): 67-85.
- [8] 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.
- WANG S J, YAN Y X, YAN M, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin; application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 388-397.
- [9] 王随继, 李玲, 颜明. 气候和人类活动对黄河中游区间接流量变化的贡献率[J]. 地理研究, 2013, 32(3): 395-402.
- WANG S J, LI L, YAN M. The contributions of climate change and human activities to the runoff yield changes in the middle Yellow River Basin [J]. Geographical Research, 2013, 32(3): 395-402.
- [10] 王彦君, 王随继, 苏腾. 1955-2010年松花江流域不同区段径流量变化影响因素定量评估[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 65-75.
- WANG Y J, WANG S J, SU T. Quantification of impacts of precipitation and human activities on runoff changes in different sections of Songhua River during 1955-2010 [J]. Progress in Geography, 2014, 33(1): 65-75.
- [11] 张晓娅, 杨世伦. 流域气候变化和人类活动对长江径流量影响的辨识(1956~2011)[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(12): 1729-1739.
- ZHANG X Y, YANG S L. Climatic and anthropogenic impacts on water discharge in the Yangtze River over the last 56 years (1956-2011) [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2014, 23(12): 1729-1739.
- [12] 王彦君, 王随继, 苏腾. 降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 304-314.
- WANG Y J, WANG S J, SU T, et al. Contributions of precipitation and human activities to runoff change in the Songhua River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(2): 304-314.
- [13] 马龙, 刘廷玺, 马丽, 等. 气候变化和人类活动对辽河中上游径流变化的贡献[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2): 470-479.
- MA L, LIU T X, MA L, et al. The effect of climate change and human activities on the runoff in the upper and middle reaches of the Liaohe River Inner Mongolia [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(2): 470-479.
- [14] 邱临静, 郑粉莉, 尹润生, 等. 降水变化和人类活动对延河流域径流影响的定量评估[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(5): 357-362.
- QIU L J, ZHENG F L, YIN R S, et al. Quantification of impacts of precipitation change and human activities on streamflow in the Yanhe River Basin [J]. Advances in

- Climate Change Research, 2011, 7(5): 357-362.
- [15] 夏智宏, 刘敏, 王苗, 等. 1990s 以来气候变化和人类活动对洪湖流域径流影响的定量辨识[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4): 515-521.
- XIA Z H, LIU M, WANG M, et al. Quantitative identification of the impact of climate change and human activity on runoff in Lake Honghu Basin since 1990s[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(4): 515-521.
- [16] 邱宇. 汀江流域水环境安全评估[J]. 环境科学研究, 2013, 26(2): 152-159.
- QIU Y. The evaluation of the Tingjiang River Basin water environment safety [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(2): 152-159.
- [17] 周素萍, 张兴奇. 汀江上游水沙变化特征分析[J]. 水文, 2010, 30(2): 89-92.
- ZHOU S P, ZHANG X Q. Characteristics analysis of runoff and sediment in upper reach of Tingjiang River [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(2): 89-92.
- [18] 王海龙. 基于小波分析的汀江水沙通量变化规律研究[J]. 泥沙研究, 2012(2): 61-67.
- WANG H L. Characteristics of water discharge and sediment load variability of Tingjiang River by wavelet analysis [J]. Journal of Sediment Research, 2012(2): 61-67.
- [19] RAN L S, WANG S J, FAN X L. Channel change at toudaoguai station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(2): 231-247.
- [20] 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.
- LI Y, CHENG X H, WANG Z L. A tentative discussion on the impact of human activities on the variability of runoff series of the Beijing River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(6): 910-915.
- [21] 李守中, 余丽凡, 邹怡静, 等. 长汀侵蚀退化地区生态恢复过程中植被多样性与土壤肥力的变化研究[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(19): 49-51; 81.
- LI S Z, YU L F, ZOU Y J, et al. Changes of vegetation diversity and soil fertility during the ecological restoration process in an eroded area of Changting County [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2008, 14(19): 49-51; 81.
- [22] 朱颂茜. 汀江流域水土流失现状及特点分析[J]. 亚热带水土保持, 2005, 17(1): 44-47.
- [23] 李宇. 梅江、汀江调峰影响河段设计水位的推算及航道整治研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- LI Y. Study on the influence of Meijiang and Dingjiang reckoning and waterway regulation reach peak water level design [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [24] 夏让欣. 福建山区水利建设的调查与思考[J]. 中国水利, 2002(9): 110-111.
- [25] 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.
- LIN K R, HE Y H, CHEN X H. Identifying the quantitative effect of climate change and human activity on runoff in the Dongjiang River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(11): 1312-1321.
- [26] 赵阳, 余新晓, 郑江坤, 等. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 252-260.
- ZHAO Y, YU X X, ZHENG J K, et al. Quantitative effects of climate variations and land-use changes on annual streamflow in Chaobai River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 252-260.
- [27] 袁宇志, 张正栋, 蒙金华. 基于 SWAT 模型的流溪河流域土地利用与气候变化对径流的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 989-998.
- YUAN Y Z, ZHANG Z D, MENG J H. Impact of changes in land use and climate on the runoff in Liuxihe Watershed based on SWAT model [J]. Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 989-998.
- [28] 邓晓宇, 张强, 孙鹏, 等. 气候变化和人类活动对信江流域径流影响模拟[J]. 热带地理, 2014, 34(3): 293-301.
- DENG X Y, ZHANG Q, SUN P, et al. Assessment of impacts of climate change and human activities on runoff with HSPF for the Xinjiang River Basin [J]. Tropical Geography, 2014, 34(3): 293-301.

【中文责编: 庄晓琼 英文审校: 叶颀】