



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.010

吴杰峰, 陈兴伟, 高路, 等. 人类活动对晋江流域径流演变影响的分析与定量评估[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 65-72, 79. WU Jiefeng, CHEN Xingwei, GAO Lu, et al. Quantitative assessment of runoff changes under the impact of human activities in the Jinjiang River basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 65-72, 79. (in Chinese)

# 人类活动对晋江流域径流演变影响的分析与定量评估

吴杰峰<sup>1</sup>, 陈兴伟<sup>1,2,3</sup>, 高路<sup>1,2,3</sup>, 陈莹<sup>1,2,3</sup>, 刘梅冰<sup>1,2,3</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007; 3. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

**摘要:** 为了进一步探讨人类活动对流域径流演变特征的影响, 以东南沿海晋江流域为例, 基于1960年-2010年逐月径流、降水数据, 应用 Mann Kendall 趋势分析法、差积曲线秩检验法和小波分析等方法, 分析了径流的变化趋势、突变和周期; 利用 SCRCQ 方法定量估算了气候变化和人类活动对石砬水文站年径流及年内分配特征变化的贡献率。结果表明: 在跨流域调水和山美水库调蓄等人类活动影响下, 石砬水文站年径流上升趋势较不受水库影响的安溪水文站明显, 年内径流变化幅度更趋于平稳。径流序列主要存在6~7 a、11~12 a 和 20~21 a 左右三个时间尺度的周期变化, 与流域年降水周期变化基本保持一致, 但20世纪80年代后石砬站周期变化与流域降水周期变化出现微弱差别。石砬站年径流序列在1982年发生变异, 而安溪站年径流序列未发现明显变异; 变异期内, 以山美水库为主的人类活动对石砬站年径流、年内不均匀系数和集中度变化的贡献率分别为67.17%、84.76%和71.16%。

**关键词:** 径流变化; 人类活动; SCRCQ 法; 大型水库; 晋江流域

**中图分类号:** P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0065-08

## Quantitative assessment of runoff changes under the impact of human activities in the Jinjiang River basin

WU Jiefeng<sup>1</sup>, CHEN Xingwei<sup>1,2,3</sup>, GAO Lu<sup>1,2,3</sup>, CHEN Ying<sup>1,2,3</sup>, LIU Meibing<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China; 3. State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** In order to further explore the impact of human activities on the variation characteristics of runoffs, taking the Jinjiang River Basin in southeast coastal region of China as the study area, this paper studied the variation tendency, abrupt and periodic changes of the runoff, using the Mann Kendall nonparametric test, Curve Rank test, and wavelet analysis method, based on the monthly runoff and precipitation data from 1960 to 2010. The Slop Changing Ratio of Cumulative Quantity method (SCRCQ) was employed to quantitatively assess the contribution of climate change and human activities to the variations of the annual runoff and seasonal distribution characteristics at Shilong hydrological station. The results showed that, under the influences of the inter-basin water diversion project and Shanmei reservoir's regulation, the increasing tendency of the annual runoff at Shilong station was more prominent than that at Anxi station, which was not influenced by the reservoir; and the monthly runoff variations at Shilong station were more gentle. There were significant periodic variations of the annual and inter-annual runoff series at the three scales of 6~7 a, 11~12 a and 20~21 a. They were basically consistent with the annual and inter-annual precipitation in the basin. However, a slight discrepancy occurred between the periodic runoff variations at Shilong station and periodic precipitation variations in the basin after the 1980s. There was an abrupt change in 1982 in the annual runoff series at Shi

收稿日期: 2016-05-22 修回日期: 2016-07-14 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 福建省高校产学研合作科技重大项目 (2015Y4002)

Funds: Province University Industry Cooperation of Major Science and Technology Project (2015Y4002)

作者简介: 吴杰峰(1991-), 男, 安徽阜阳人, 主要从事水文学与水资源方面的研究。E-mail: Jiefengwu987@163.com

通讯作者: 陈兴伟(1963-), 男, 福建福鼎人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源与水环境研究。E-mail: cxwchen215@163.com

long station, but not at Anxi station. During the period of variation, the human activities as mainly represented by Shanmeireser reservoir contributed to 67.17% of the annual runoff variation, 84.76% of the annual unevenness coefficient variation, and 71.16% of the concentration degree variation at Shilong hydrological station.

**Key words:** runoff variation; human activities; SCRCQ; large reservoir; Jinjiang River Basin

河川径流变化均不同程度地受气候变化和人类活动双重因素共同的影响<sup>[1]</sup>。几十年来,城市化、土地利用变化及水库、大坝的修建,不断改变着降水的地表再分配过程和流域径流过程,对土壤侵蚀<sup>[2,3]</sup>、旱涝灾害<sup>[4]</sup>及水资源安全与管理<sup>[5]</sup>等产生了重要影响,相关研究也产生了大量成果。学者对气候变化和人类活动在长江流域<sup>[6]</sup>、黄河流域<sup>[7,8]</sup>、松花江流域<sup>[9]</sup>、珠江流域<sup>[10,11]</sup>等流域及其支流引起的径流变化进行了深入的分析,研究表明,人类活动对年径流变化的贡献率介于30%~90%。目前,定量评估气候变化和人类活动对流域水文过程影响的研究方法,主要包括水文模型模拟法和数理统计分析法。水文模型模拟法具有较好的物理机制,对分析自然条件下流域径流过程具有不可替代功能,如气候变化、土地利用/土地覆被变化等,然而水库、灌溉等人为因素考虑不足,若对模型模拟结果不进行合理验证,评估结果可能产生较大偏差<sup>[7]</sup>。而大型水利工程作为主要的人类活动,在满足人类相关需求的同时,也改变了流域水文过程,导致水文序列显著变异及年内分配结构变化<sup>[12]</sup>。通常采用数理统计分析法,如气候-水文过程特征参数法(回归模型、BP神经网络模型等),通过建立气候参数与地表水文参数关系模型,量化人类活动对水文过程的影响<sup>[13]</sup>。

晋江流域位于中国著名侨乡东南沿海泉州市,也是福建省经济最发达的地区之一,但地表水资源较缺乏。以2012年为例,泉州市GDP总量占全省总量的1/4,而地表水资源拥有量仅为全省的8.0%<sup>[1]</sup>,与经济社会发展的需要严重不符。以大型山美水库和龙门滩引水工程为主的水利工程建设,有力支撑了区域用水需求,也显著改变了地表水文过程。已有研究初步揭示了该流域径流的年际变化及年内分配结构特征<sup>[14]</sup>,但对变化的影响因素分析不够,更未进行量化评价。本文拟利用流域内受到大型水库影响的石砬水文站和未受影响的安溪水文站的1960年-2010年逐月径流数据,以及相应三个气象站的降水数据,通过比较分析,探讨在大型水利工程等人类活动影响下,该流域径流序列年际、

年内的演变特征,并利用累积量斜率变化率比较方法(Slop Changing Ratio of Cumulative Quantity, SCRCQ)<sup>[9]</sup>定量估算以山美水库为主的人类活动对流域径流变化的贡献率。

## 1 研究区概况

晋江流域位于东南沿海经济快速增长的福建省泉州市(图1),流域面积5629 km<sup>2</sup>,有东溪、西溪两大支流,其中西溪流域面积为3101 km<sup>2</sup>。两溪汇流于下游石砬水文站,本文以石砬水文站以上流域为研究区,控制流域面积5042 km<sup>2</sup>。气候属于南亚热带湿润气候,年平均气温20℃~21℃,季风气候显著,降水丰沛,但时空分布不均,降水变率大<sup>[15]</sup>。流域内主要土壤类型有红壤、砖红壤性红壤、水稻土和黄壤。土地利用类型以林地、园地和耕地为主,占89.82%<sup>[16]</sup>。地貌类型以中山、低山丘陵为主,地势险峻,河流深切,山地开发强度大。特殊的地形、地貌和气候条件,流域内水土流失、旱涝灾害及地质灾害问题严重<sup>[17,18]</sup>。

山美水库位于东溪中游,1972年建成投入运营,1979年-1982年进行保坝扩蓄工程,防洪库容由1.31亿m<sup>3</sup>增至2.6亿m<sup>3</sup>。水库集水面积1023 km<sup>2</sup>,总库容6.55亿m<sup>3</sup>,其中调节库容4.53亿m<sup>3</sup>,具有多年调节功能,是晋江流域目前唯一的一座集灌溉、发电、供水等多功能于一体的大型水库。在汛期,山美水库起到防洪调度、保护下游200多万人口生命财产安全的作用;在枯水期,通过合理调度向下游输水,保障下游400多万人口的生产生活用水需求,被誉为泉州市人民的“生命库”和“泉州的生态调节器”。此外,位于东溪上游的龙门滩引水工程于1989年建成,坝址以上集水面积360 km<sup>2</sup>,年引水量4.06亿m<sup>3</sup>,该工程跨越闽江和晋江两大水系,将闽江上游大樟溪干流水引入东溪支流上游的湖洋溪,并流入山美水库,是一项跨流域调水、梯级发电及供水的综合性水利工程。

<sup>1</sup> 《2012年福建省水资源公报》,福建省水利厅水利管理处,福州,2013。《2012年中国水资源公报》,中华人民共和国水利部,北京,2013

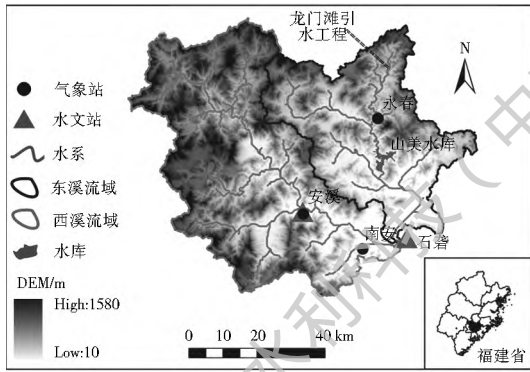


图1 研究区水文气象站点位置  
Fig. 1 Location of the study area and the hydrological and meteorological stations

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

水文数据主要为石碇、安溪水文站 1960 年-2010 年逐月径流数据,其中安溪水文站位于晋江流域主要支流之一的西溪;石碇水文站位于两大支流汇流的干流,其径流过程受到位于另一主要支流东溪龙门滩引水工程与山美水库的影响。气象数据为南安、安溪、永春三个气象站 1960 年-2010 年逐月降水数据。此外,还有 1990 年-2010 年龙门滩月均引水量数据。数据完整性好,无缺测数据,分别来源于福建省水资源勘测局和福建省气象局。其中面状降水数据采取算术平均求得。根据气象学中常用的四季分类方法,视 3 月-5 月为春季、6 月-8 月为夏季、9 月-11 月为秋季、12 月-次年 2 月为冬季。

### 2.2 研究方法

为了分析流域径流演变特征与定量评估人类活动影响,采用站点对比分析法,并应用 Mann-Kendall 趋势分析法、差积曲线秩检验法和小波分析法等,分析径流的变化趋势、突变和周期;利用 SCRCQ 法估算人类活动对径流变化的贡献率。

#### 2.2.1 Mann-Kendall (M-K)

Mann-Kendall (M-K) 非参数检验法是目前常用的检验变量演变趋势的方法,对于水文、气象要素等非正态分布的变量趋势检验简便有效,且受变量异常值干扰较少,但对临界值之外的变异状况的检验不敏感<sup>[19,20]</sup>,本文采用该方法分析流域降水、径流的演变趋势。假设有一时间序列变量  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ ,  $n$  为变量序列长度, M-K 定义检验统计量  $S$  如下<sup>[21]</sup>:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(\alpha_j - \alpha_i) \quad (1)$$

$$\text{其中 } \text{sgn}(\alpha_j - \alpha_i) = \begin{cases} 1 & \alpha_j - \alpha_i > 0 \\ 0 & \alpha_j - \alpha_i = 0 \\ -1 & \alpha_j - \alpha_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_j$  和  $\alpha_i$  分别为时间序列中第  $j$  和  $i$  对应的变量值,且  $i > j$ 。其均值和方差为

$$\begin{cases} E(S) = 0 \\ \text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \end{cases} \quad (3)$$

则标准统计量为

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Z$  为一个正态分布统计量;  $\text{var}(S)$  为  $S$  的方差。在给定置信水平  $\delta$  上,如果  $|Z| \geq Z_{1-\delta/2}$  则拒绝原假设,即在  $\delta$  置信水平上,变量在时间序列中处于上升或下降趋势。通常  $|Z| \geq 1.65, 1.96, 2.38$  时,表示分别通过了置信度 0.1、0.05、0.01 的显著水平检验。

此外,本文采用差积曲线秩检验联合识别法<sup>[22]</sup>初步识别变量在时间序列中可能的变异点,再根据秩检验法对每个可能变异点进行精确检验。为了结果便于呈现,采用  $z$  score 方法对差积曲线序列进行标准化处理,得到标准化后的差积曲线序列值  $\phi$ 。

#### 2.2.2 SCRCQ

SCRCQ 分析法<sup>[8]</sup>的原理是如果径流量变化只受降水量因素的影响,则降水量和径流量随年份的累积曲线斜率应该是同倍比变化的。将变量所有影响因素的总和定义为 1,根据各影响因素随时间累积的斜率变化率占变量累积斜率变化率的比值来推求其对变量的影响程度。假设长时间径流序列存在突变点,变异点前为气候变化和人类活动影响较小时期,变异点后为气候变化和人类活动影响较大时期,通过变异点前后时期的变量累积量与年份关系的斜率变化率,推求气候变化和人类活动对径流序列的贡献。基准期和变异期的降水量为  $P$ ,累积降水量与年份线性方程的斜率分别为  $K_{Pa}, K_{Pb}$  (mm/a),斜率变化率为  $S_P = (K_{Pb} - K_{Pa})/K_{Pa}$ ;蒸散发为  $E$ ,变异点前后的累积蒸散发与年份线性方程的斜率分别为  $K_{Ea}, K_{Eb}$  (mm/a),斜率变化率为  $S_E = (K_{Eb} - K_{Ea})/K_{Ea}$ ;径流量为  $R$ ,变异点前后的累积径流量与年份线性方程的斜率分别为  $K_{Ra}, K_{Rb}$ ,斜率变化率为  $S_R = (K_{Rb} - K_{Ra})/K_{Ra}$ 。则基于基准期,变异期内降水对径流量变化的贡献率( $C_P$ ,单位为%)为:  $C_P = 100 \times S_P/S_R$ ,同样蒸散发对径流量的贡献率( $C_E$ ,单位为%)为:  $C_E = 100 \times S_E/S_R$ ,相应的人类活动对径流量变化的贡献率( $C_H$ ,单位为%)为:

$$C_H = 100 - C_P - C_E$$

由于长时间的蒸散发资料难以获取,且相关研究表明<sup>[23]</sup>,在气候因子中,降水量是影响径流量的最主要因子,而蒸散发影响较小,因此本文暂不对蒸散发进行分析。通过评估人类活动因子对径流变化的贡献率,旨在为流域的水资源合理管理和生态环境的可持续发展提供参考。

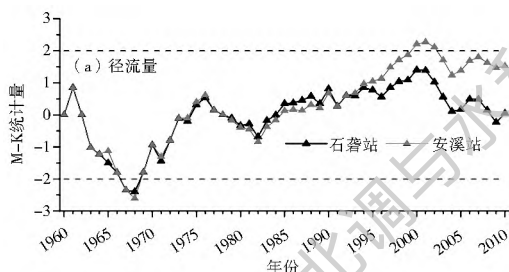
### 2.2.3 小波分析法

小波分析法<sup>[24]</sup>能够在时域和频域上揭示变量在时间序列中信号的细微变化,对反映水文、气象要素多时间尺度特征提供了一种较好的分析工具。本文采用 Morlet 连续复小波变换来反映变量时间序列的震荡周期,为消除序列两端产生的“边界效应”,对序列两端进行了延伸处理。通过 Matlab 7.0 小波分析工具分别提取变量的小波系数值及主周期小波系数值,分析变量的多时间尺度变化特征。

## 3 结果分析

### 3.1 径流序列年际演变特征

图 2 给出了近 51 a 来晋江下游石砬站年径流总量及降雨量的过程线。可以看出,流域径流总量



与降水量峰值基本一一对应,二者具有较好的一致性,表明整体上晋江流域的径流量大小与降雨量多少具有密切的关系。

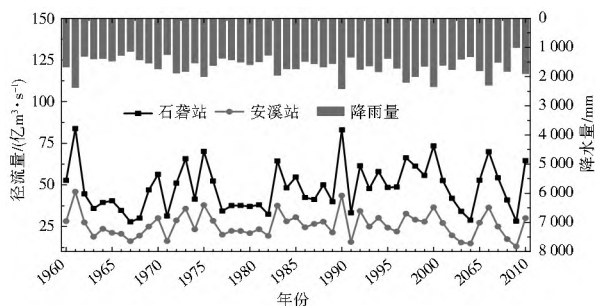


图 2 1960 年-2010 年石砬站逐年径流量及降水量过程线

Fig. 2 Annual runoff and precipitation chart of Shilong hydrological station during 1960-2010

由公式(1)至式(4)得到 1960 年-2010 年间年径流 M-K 趋势检验结果(图 3(a))。可知,石砬站和安溪站年径流呈下降-上升-下降-上升-下降阶段性变化特征,整体呈微弱上升趋势,M-K 趋势检验值分别为 1.53 和 0.05,石砬站上升趋势较安溪站明显,但均未通过显著水平检验。图 3(a)也可以看出,20 世纪 80 年代前两个水文站的径流序列呈同步变化趋势,20 世纪 80 年代后非同步性明显。

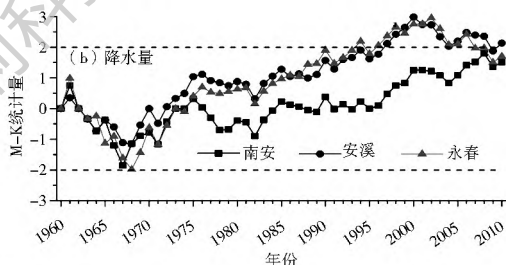


图 3 晋江流域年均径流、年均降水的 M-K 检验结果

Fig. 3 M-K test results of annual average runoff and precipitation in the Jinjiang River Basin

石砬、安溪站年径流的变化表现为不同时间尺度的震荡周期。图 4(a)、图 4(c)显示了石砬、安溪站年径流序列在不同时间尺度下随时间偏湿-偏枯交替变化的特征,两个水文站主周期变化基本保持一致,主要存在 6~7 a、11~12 a 和 20~21 a 三个主要震荡周期,其中 20~21 a 左右的震荡周期最强,是石砬、安溪站的第一主周期,其次是 11~12 a 和 6~7 a。而 20 世纪 80 年代后两个站点震荡周期出现微弱差别,尤其是 20~21 a 左右的震荡周期。从主周期小波系数变化过程来看,20~21 a 左右的震荡周期在整个时间序列中正在逐渐减弱,小波系数值处于高峰阶段,表明在 20~21 a 左右时间尺度上,将进入偏枯时期;11~12 a 左右的震荡周期正在逐渐加强,小波系数值处于低谷阶段,表明在 11~12 a 时间尺度上,将进入偏湿期;而 6~7 a 左右的

震荡周期在时间序列中变化不明显,小波系数值处于上升期,表明现阶段正处于湿润期。该结论与陈莹等<sup>[25]</sup>利用经验模态分解方法(EMD)在与晋江流域相似地理特征的闽江流域研究结论较一致。

### 3.2 径流序列年内演变特征

表 2 为利用公式(1)至式(4)对石砬、安溪站年内径流变化趋势检验结果。可知,两个站点径流减少的月份集中在 5 月-7 月份;径流增加的月份集中在 9 月-次年 4 月份,其中石砬站增加趋势显著,除 10 月份外,均通过 0.05 显著水平检验,11 月-次年 2 月份通过 0.01 显著水平检验,而安溪站均未通过显著水平检验。就季节而言,夏季呈减少趋势,其它季节呈上升趋势。年内径流不均匀系数( $C_v$ )和集中度( $RCD$ )可以用来反映河川径流的年内分配状况, $C_v$ 值和  $RCD$  值越大,表明年内丰枯变化越剧

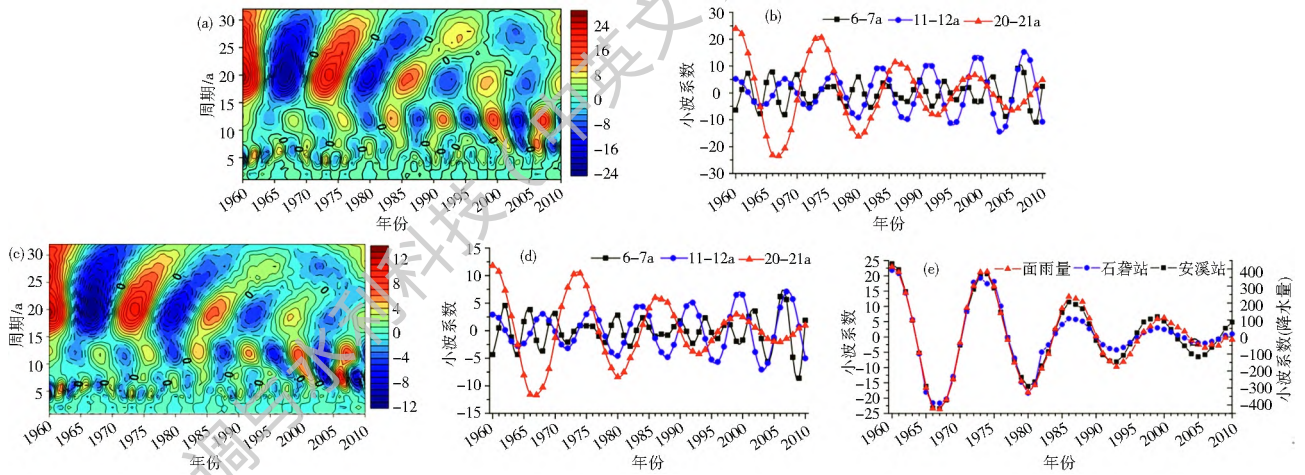


图4 径流序列小波系数(a) (c)和主周期小波过程线(b) (d); (a) (b) 石砬站, (c) (d) 安溪站, (e) 径流量与降水量的 20~ 21 a 主周期小波系数变化对比

Fig.4 Wavelet coefficient isograms (a) (c) and dominant period wavelet charts (b) (d) of the runoff series; (a) (b) Shilong station, (c) (d) Anxi station; (e) Comparison between the variations of 20~ 21 a dominant period wavelet coefficients of runoff and precipitation

烈<sup>[11]</sup>。流域径流和降水的年内  $C_v$ 、 $RCD$  变化趋势线表明(图 5(a)(b)), 1960 年- 2010 年间两个站点年内  $C_v$  值、 $RCD$  值均呈下降趋势, 年内变化幅度趋于平坦, 其中石砬站下降速度较安溪站明显。

表 1 各月份径流与降水的 M-K 趋势检验结果

Tab.1 M-K trend test for monthly runoff and precipitation

季节	月份	石砬站	安溪站	降水量
春季	3	1.64	0.54	0.63
	4	1.91	0.91	1.15
	5	- 1.61	- 0.61	- 0.73
夏季	6	- 2.29	- 2.06	- 0.44
	7	- 0.76	- 0.36	0.56
	8	1.51	0.74	1.31
秋季	9	2.13	1.52	1.22
	10	1.54	0.63	0.13
	11	2.71	0.48	0.24
冬季	12	3.32	1.88	0.61
	1	3.03	1.13	1.00
	2	3.22	1.33	1.33

同样表现出 6~ 7 a、11~ 12 a 和 20~ 21 a 左右三个时间尺度的震荡周期。限于篇幅, 只列举了石砬和安溪站夏季和冬季小波变换系数的时频分布(图 6)。可以看出, 20 世纪 80 年代后, 两个站点在 20~ 21 a 左右时间尺度的震荡周期表现出微弱差异, 冬季较夏季明显。

### 3.3 径流序列突变检验

上述结果表明, 石砬和安溪站年际、年内径流演变特征有所不同。进一步采用差积曲线- 秩检验法, 对石砬和安溪站近 51 a 的长时间径流序列进行变异检验, 结果见图 7(a)。

图 7(a) 石砬、安溪站标准化差积曲线序列分别于 1971 年、1976 年、1982 年和 2001 年出现拐点。根据差积曲线原理, 初定 1971 年、1976 年、1982 年和 2001 年是变异点, 然后通过秩检验法进行精确检验。表 2 的秩检验结果表明, 石砬站仅有 1982 年秩统计量  $|U|$  大于 1.96, 检验结果为显著, 确定 1982 年为该序列的变异点, 而其它年份均不显著, 安溪站也都未通过检验。因此, 可将 1982 年作为石砬站径流序列的变异点。

两个站点年内径流震荡周期与年径流震荡周期

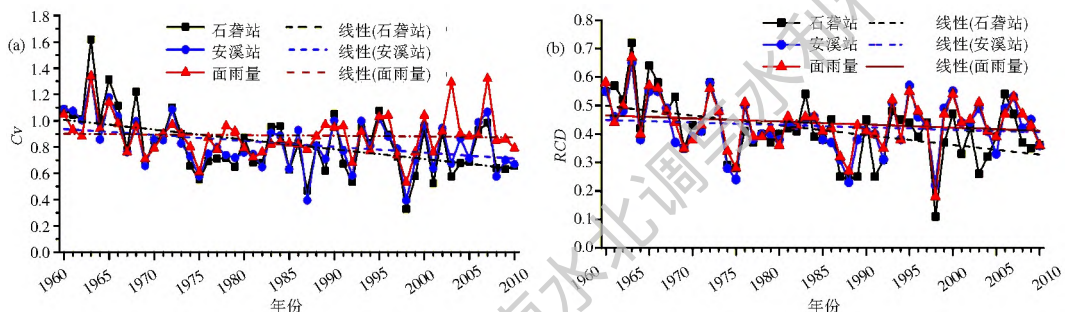


图 5 径流量与降水量年内变化趋势

Fig.5 Inter-annual variation tendency of runoff and precipitation



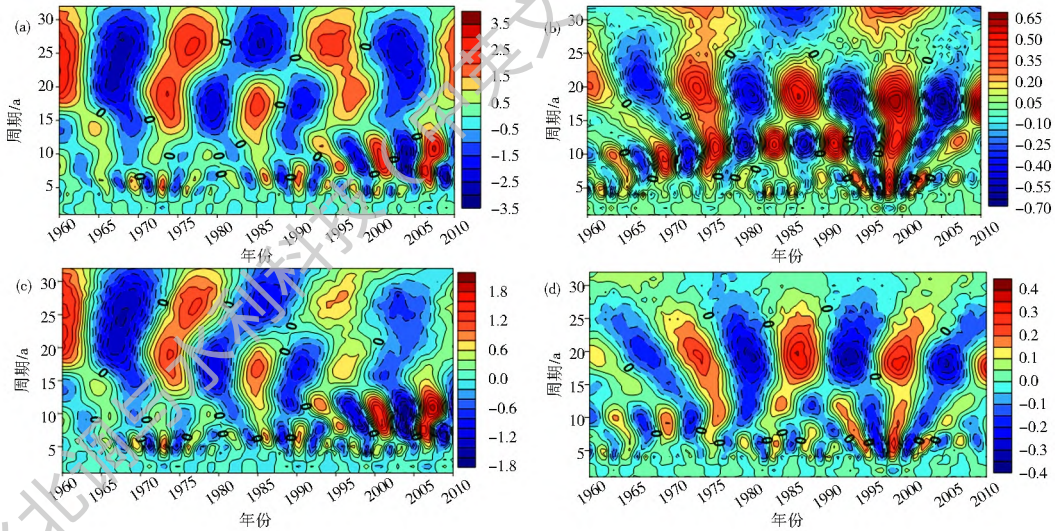


图 6 夏季 (a) (c) 和冬季 (b) (d) 径流序列小波系数; (a) (b) 石砬站, (c) (d) 安溪站

Fig. 6 Wavelet coefficients of runoff series in summer (a) (c) and winter (b) (d); (a) (b) Shilong station, (c) (d) Anxi station

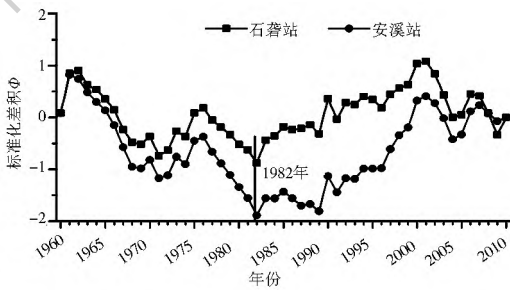


图 7 径流序列突变分析结果

Fig. 7 Abrupt change of runoff series

表 2 变异点分析结果

Tab. 2 Change point analysis

站点	可能变异点	统计量	显著性	是否变异
石砬站	1971 年	0.47	不显著	否
	1976 年	0.31	不显著	否
	1982 年	1.98	显著	是
	2001 年	0.77	不显著	否
安溪站	1971 年	0.63	不显著	否
	1976 年	0.17	不显著	否
	1982 年	0.97	不显著	否
	2001 年	0.06	不显著	否

### 3.4 径流演变归因分析

#### 3.4.1 定性讨论

径流变化的影响因素主要分为气候变化和人类活动两方面。降水作为气候变化下的敏感性因子是影响径流变化的最直接因素。晋江流域三个主要气象站(南安站、安溪站和永春站)的降水总体上有上升,其中安溪、永春气象站通过 0.05 显著水平检验。从图 3(b) 看出,三个气象站年平降水与年径流 M-K 曲线变化十分相似,阶段性演变特征较接近,即石

砬、安溪站年径流的演变整体受降水变化影响明显。晋江流域的人类活动主要包括土地利用变化和水利工程建设。Lin 等<sup>[9]</sup>通过流域 1985 年和 2006 年两期土地利用数据,应用 SWAT 模型模拟分析土地利用变化的洪枯径流响应。结果表明,由于林地的减少、建设用地的增加,在相同的降水条件下,年径流略有增加,增幅为 2.3%~3.3%。表明土地利用对径流系列的影响与径流系列的变化趋势是相符合的。

但两个水文站的径流变化与流域降水变化也存在一定的差异。图 4(e) 显示了流域降水量主周期变化(20~21 a)与安溪站基本同步,20 世纪 80 年代后与石砬站非同步明显。3.2 节内容结果表明,安溪站年内径流变化与流域降水的年内变化基本一致,石砬站不一致明显。在相同的气候背景和相似的土地利用变化条件下,石砬站年际、年内径流演变与流域降水演变的差异幅度较安溪站大,可初步推测石砬站的径流受人类活动的其他干扰较大所致,即与大型水利工程建设有关。多年调节的山美水库的建成,包括 1979 年-1982 年保坝扩蓄工程的竣工,对石砬站径流的年际尤其是年内的变化,产生比较大的影响。而 1989 年建成的龙门滩引水工程,将闽江水系大漳溪干流的径流,跨流域引入晋江水系东溪上游的湖洋溪,进入山美水库统一调蓄,对于石砬站径流年际和年内的平稳变化影响显著。图 8 可以看出,龙门滩工程月均引水量增加明显(图 8(a)),且安溪站年径流占石砬站年径流的百分比下降趋势显著(图 8(b))。可见,石砬站径流系列的变化与以山美水库为主的人类活动密切相关。

综上,晋江流域石砬站和安溪站的径流演变受降水和人类活动的综合影响,其中安溪站主要与降水和

土地利用变化有关,而石砬站是降水、土地利用变化、龙门滩引水工程及山美水库调蓄作用的综合结果。

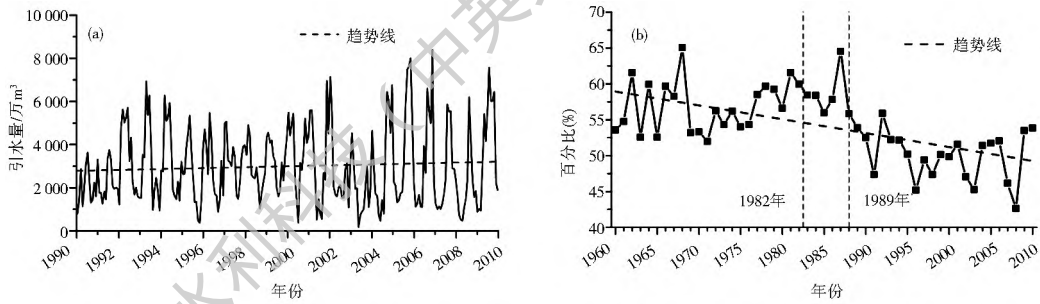


图 8 1990 年-2010 年龙门滩月均引水量(a),安溪站年径流占石砬站年径流百分比(b)

Fig. 8 Average monthly water diversion of Longmen Tan during 1990-2010 (a), ratio of annual runoff at Anxi station to annual runoff at Shilong station (b)

### 3.4.2 石砬水文站的定量分析

为进一步分解气候变化和以山美水库为主的人类活动对石砬站径流的影响,采用 SCRCQ 方法进行定量估算。将 1982 年作为石砬站径流序列有无水库影响的分界点,其中 1960 年-1982 年为无水库影响期,1983 年-2010 年为水库影响期,对两个时期的年份累积变量(径流、降水、 $C_v$  和  $RCD$ )进行线性回归分析,表 3 中的拟合方程中  $x$  为时间序列变量“年份”, $y$  为相应于  $x$  的累积变量值。表 3 看出,各累积变量与年份的拟合方程相关系数较高,均大于 0.99,  $F$  统计量均通过显著性检验,表明可以用于定量评估人类活动对石砬站年际及年内径流分配特征变化的贡献率大小<sup>[8]</sup>。

根据表 3 中年累积降水、累积降水  $C_v$  和累积降水  $RCD$  及其分别与年份拟合方程的相关系数,结合 2.2.2 节中的 SCRCQ 计算步骤得到,以山美水库为主的人类活动对年径流、年内径流  $C_v$  及  $RCD$  变化的贡献分别为 67.17%、84.76% 和 71.16%,远较气候变化为大。需要指出的是,分解出的人类活动不仅包含了水利工程的调水、蓄水的贡献,也包含了土地利用/土地覆被变化及其它人类活动的贡献等。由于各因素间相互作用十分复杂,目前无可靠方法对其逐一分解。但总体上看,人类活动中的龙门滩引水工程和山美水库调蓄影响(统称为山美水库)显然较土地利用的影响为大。

表 3 石砬站年份与累积径流、降水之间的时间关系

Tab. 3 The temporal relations between year and cumulative runoff and precipitation at Shilong station

累积变量	无水库影响时期(1960年-1982年)			水库影响时期(1983年-2010年)		
	拟合方程	相关系数 $R^2$	$F$ 统计量	拟合方程	相关系数 $R^2$	$F$ 统计量
累积降水量	$y = 1581.1x - 3.6E + 6$	0.998 52	18 935	$y = 1792x - 3.5E + 6$	0.999 44	35 999
累积降水 $C_v$	$y = 0.8583x - 1712.3$	0.997 24	8 865	$y = 0.8744x - 1741.5$	0.998 94	24 401
累积降水 $RCD$	$y = 0.4415x - 864.45$	0.996 87	6 678	$y = 0.4281x - 838.13$	0.998 62	18 881
累积径流量	$y = 44.08x - 86331$	0.995 85	5 045	$y = 52.31x - 100000$	0.998 65	19 183
累积径流 $C_v$	$y = 0.8828x - 1728$	0.987 88	1 722	$y = 0.7455x - 1456$	0.998 93	24 185
累积径流 $RCD$	$y = 0.4473x - 875.58$	0.992 99	2 702	$y = 0.3666x - 716.01$	0.998 33	15 512

## 4 结论

(1) 晋江流域两个水文站年径流整体呈微弱上升趋势,其中石砬水文站上升趋势较安溪水文站明显,且在 1982 年发生变异,而安溪水文站年径流序列未发生变异;年内径流趋于平坦,径流减少的月份集中在 5 月-7 月份,增加的月份为 8 月-次年 4 月份,其中石砬水文站年内演变趋势较安溪水文站显著。

序列存在 6~7 a、11~12 a 和 20~21 a 三个明显的震荡周期,其中 20~21 a 的周期性最强;小波变换系数的时频分布在 20 世纪 80 年代前与流域降水序列的时频分布基本保持一致,但 20 世纪 80 年代后,石砬水文站表现出微弱差别。

(3) 石砬水文站和安溪水文站的径流演变受降水和人类活动的综合影响,其中安溪水文站主要与降水和土地利用变化有关,而石砬水文站是降水、土地利用变化、龙门滩跨流域引水工程及山美水库调蓄作用的综合结果,以山美水库为主的人类活动,对

(2) 小波分析表明,石砬和安溪水文站年径流的

石砬水文站年径流、年内径流  $C_v$  和  $RCD$  变化的贡献率分别为 67.17%、84.76% 和 71.16%。

#### 参考文献(References):

- [1] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Stationarity is dead: Whither water management [J]. *Science*, 2008, 319 (5863): 573-574. DOI: 10.1126/science.1151915
- [2] 樊哲文, 黄灵光, 钱海燕, 等. 鄱阳湖流域土地利用变化的土壤侵蚀效应[J]. *资源科学*, 2009, 31(10): 1787-1792. (FAN Zhe wen, HUANG Ling guang, QIAN Hai yan, et al. Soil erosion effects driven by land use changes over the Poyang lake basin [J]. *Resources Science*, 2009, 31(10): 1787-1792. (in Chinese))
- [3] 蔺鹏飞, 张晓萍, 刘二佳, 等. 黄土高原典型流域水沙关系对退耕还林(草)的响应[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 1-6. (LIN Peng fei, ZHANG Xiao ping, LIU Er jia, et al. Responses of the water and sediment behavior to vegetation restoration in typical catchments on the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 1-6. (in Chinese)). DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2015.01.001
- [4] 陈维杰. 水土流失与旱涝灾害[J]. *北京林业大学学报: 社会科学版*, 2006, 5(S1): 69-71. (CHEN Wei jie. Soil and water erosion and drought and waterlogging disasters [J]. *Journal of Beijing Forestry University: Social Sciences*, 2006, 5(S1): 69-71. (in Chinese)). DOI: 10.13931/j.cnki.bjfu.2006.s1.015
- [5] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 262-269. (XIA Jun, ZHU Yi zhong. The measurement of water resources security: a study and challenge on water resources carrying capacity [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 262-269. (in Chinese))
- [6] Zhao Y, Zou X, Gao J, et al. Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea: A case study of the Yangtze River, China [J]. *The Science of the total environment*, 2015, 536: 803-812. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.119
- [7] 丁爱中, 赵银军, 郝弟, 等. 永定河流域径流变化特征及影响因素分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(1): 17-22. (DING Ai zhong, ZHAO Yin jun, HAO Di, et al. Analysis of variation characteristics of runoff and their influencing factors in the Yongding River basin [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(1): 17-22. (in Chinese)). DOI: 10.3724/SP.J.1021.2013.01017
- [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 Sui ji, YAN Yui xia, YAN Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of Huangfuchuan drainage basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 388-397. (in Chinese))
- [9] 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 Yai jun, WANG Sui ji, SU Teng. Contributions of precipitation and human activities to runoff change in the Songhua river basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 304-314. (in Chinese))
- [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. (LIN Kai rong, HE Yar hu, CHEN Xiao hong. 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. (in Chinese)). DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.11.001
- [11] 涂新军, 陈晓宏, 张强, 等. 东江径流年内分配特征及影响因素贡献分解[J]. *水科学进展*, 2012, 23(4): 494-501. (TU Xin jun, CHEN Xiao hong, ZHANG Qiang, et al. Streamflow annual distribution and its influencing factors in Dongjiang river, South China [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(4): 494-501. (in Chinese)). DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2012.04.0116
- [12] 毕彦杰, 赵勇, 肖伟华, 等. 气候变化和水库运行对径流影响的定量研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(1): 29-33. (BI Yan jie, ZHAO Yong, XIAO Wei hua, et al. Quantitative research on the effects of climate change and human activity on runoff [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(1): 29-33. (in Chinese)). DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2015.01.007
- [13] 张正浩, 张强, 邓晓宇, 等. 东江流域水利工程对流域地表水文过程影响模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(4): 684-695. (ZHANG Zheng hao, ZHANG Qiang, DENG Xiao yu, et al. Hydrological effects of water reservoirs on fluvial hydrological processes for the east river basin using statistical modeling technique [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4): 684-695. (in Chinese))
- [14] 谢菲, 孙小舟. 晋江流域径流演变规律研究[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(5): 1471-1473. (XIE Fei, SUN Xiao zhou. Study on the evolution rule of runoff in Jinjiang river basin [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(5): 1471-1473. (in Chinese)). DOI: 10.13989/J.CNKI.05176611.2014.05.027
- [15] 鹿世瑾, 王岩. 福建气候 [M]. 北京: 气象出版社, 2012: 155-156, 173-174. (LU Shi jin, WANG Yan. The climate of Fujian [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012: 155-156, 173-174. (in Chinese))
- [16] Lin B, Chen X, Yao H, et al. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 55-63. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.05.031
- [17] 王林, 陈兴伟. 退化山地生态系统植被恢复水文效应的 SWAT 模拟[J]. *山地学报*, 2008, 26(1): 71-75. (Wang Lin, Chen Xing wei. Simulation of hydrological effects on vegetation restoration of degraded mountain ecosystem with SWAT model [J]. *Mountain Research*, 2008, 26(1): 71-75. (in Chinese)). DOI: 10.16089/j.cnki.10082786.2008.01.009

(下转第79页)



- gorithm for parameter estimation of Muskingum routing model [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 45 (8): 118-123. (in Chinese)
- [7] 包为民. 水文预报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (BAO Wei min. Hydrological Forecast[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese))
- [8] 齐春英, 刘克岩. 沿程渗漏河道的洪水流量演算模型[J]. 水文, 1997, 17(6): 27-30. (QI Chunying, LIU Keyan. Flood flow routing model for river course with or way seepage[J]. Journal Of China Hydrology, 1997, 17(6): 27-30. (in Chinese))
- [9] 李匡, 付力, 胡宇丰, 等. 马斯京根法参数 C<sub>0</sub>、C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 取值范围的确定[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 43-45. (LI Kuang, FU Li, HU Yufeng, et al. Determination of the value ranges of parameters C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub>, and C<sub>2</sub> of Muskingum Method [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 43-45. (in Chinese))
- [10] 林凯荣, 郭生练, 张文华. 基于霍顿下渗能力曲线的流量过程线连续分割方法研究[J]. 水文, 2008, 28(1): 10-14. (LIN Kai rong, GUO Shenglian, ZHANG Wenhua. A continuous hydrograph separation method based on Horton infiltration capacity curve[J]. Journal Of China Hydrology, 2008, 28(1): 10-14. (in Chinese))
- [11] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (RUI Xiaofang. Principle of hydrology [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004. (in Chinese))
- [12] 王蕊, 夏军, 张文华. 一种新的概念性水文模型及其应用研究[J]. 水文, 2009, 29(2): 1-6. (WANG Rui, XIA Jun, ZHANG Weirhua. A new conceptual hydrological model and its application[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(2): 1-6. (in Chinese))
- [13] Saltelli A, Chan K, Scott E M. Sensitivity Analysis[M]. Wiley, New York(Eds.), 2000.
- [14] GB/T 22482-2008, 水文情报预报规范[S]. (GB/T 22482-2008, Standards for hydrological information and hydrological forecasting[S]. (in Chinese))
- [15] 魏兆珍. 海河流域下垫面要素变化及其对洪水的影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2013. (WEI Zhaozhen. Study on the underlying surface change of Haihe River Basin and its impacts on flood[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [16] 赵志贡, 王卫东. 马斯京根法流量演算系数的分析研究[J]. 东北水利水电, 2006, 24(7): 21-23. (ZHAO Zhigong, WANG Weidong. Study on discharge calculation coefficient with Muskingum method[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2006, (24) 7: 21-23. (in Chinese))
- [17] 章四龙. 洪水预报系统关键技术研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (ZHANG Si long. Key technology research and practice of the flood forecasting system [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese))

(上接第 72 页)

- [18] 吴杰峰, 陈兴伟, 高路, 等. 基于标准化径流指数的区域水文干旱指数构建与识别[J]. 山地学报, 2016, 34(3): 282-289. (WU Jiefeng, CHEN Xingwei, GAO Lu, et al. Construction and recognition of regional hydrological drought index based on standardized runoff index [J]. Mountain Research, 2016, 34(3): 282-289. (in Chinese)). DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008-2786. 000129
- [19] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13: 245-259
- [20] Kendall M G. Rank correlation measures [M]. London: Charles Griffin, 1976: 110-120
- [21] 黄婕, 王跃峰, 高路, 等. 1960-2010 年福建省不同等级降水时空变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 17-23. (HUANG Jie, WANG Yuefeng, GAO Lu, et al. Temporal-spatial characteristics of different rainfall levels in Fujian province from 1960 to 2010 [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(2): 17-23. (in Chinese)).
- [22] 于延胜, 陈兴伟. 水文序列变异的差积曲线-秩检验联合识别法在闽江流域的应用——以竹岐站年径流序列为例[J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1717-1721. (YU Yansheng, CHEN Xingwei. Difference curve rank test method for detecting the change point in hydrological time series [J]. Resources Science, 2009, 31(10): 1717-1721. (in Chinese))
- [23] 张调风, 朱西德, 王永剑, 等. 气候变化和人类活动对湟水流域径流影响的定量评估[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2256-2262. (ZHANG Diaofeng, ZHU Xi de, WANG Yongjian, et al. The impact of climate variability and human activity on runoff changes in the Huangshui River basin [J]. Resources Science, 2014, 36(11): 2256-2262. (in Chinese))
- [24] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (WANG Wen sheng, DING Jing, LI Yueqing. Hydrological wavelet analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [25] 陈莹, 陈兴伟, 尹义星. 1960-2010 年闽江流域径流演变特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1401-1411. (CHEN Ying, CHEN Xingwei, YIN Yixing. Characteristics of runoff changes in the Minjiang river basin from 1960 to 2006 [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(8): 1401-1411. (in Chinese))