

三岔河上游近 50 年降水径流变化特征分析

张一鸣^{1,2}, 田雨², 雷晓辉², 宋万祯^{1,2}, 蒋云钟²

(1.天津大学建筑工程学院,天津 300072;

2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:为分析黔中水利枢纽工程的水源区——三岔河上游的水资源演变规律,利用常规线性回归和滑动平均法、Pettitt 法以及 Morlet 小波分析等方法,对该流域近 50 年降水和径流水资源要素进行趋势性、突变性和周期性等多维特征分析。研究表明:降水和径流整体减少或增加趋势不明显,但其丰枯年份交替频繁,起伏波动较大;突变检验结果显示该区水文序列均在 2003 年存在突变年份,且均为不显著性突变年份;Morlet 小波周期性分析可以看出研究区水文序列都存在一个 14a 左右的周期变化。上述分析成果一定程度上可为该区域水资源开发提供依据。

关键词:滑动平均法;Pettitt 法;Morlet 小波分析;趋势分析;突变分析;周期分析

中图分类号:TV122

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)05-0079-06

1 引言

水资源是基础性自然资源,同时也是保障一个国家和地区实现经济、社会和生态可持续发展的战略性资源^[1]。随着全球气候变化和人类活动影响的加剧,区域水资源情势发生了显著的时空变化,直接影响流域水资源的合理配置、开发与利用^[2]。近年来已有多位学者针对不同流域和地区的水资源要素的变化特征进行了一系列研究。王金星等^[3]利用统计学方法和 Mann-Kendall 非参数统计检验方法研究了近 50 年中国六大流域径流年内分配变化趋势。邴龙飞等^[4]利用复 Morlet 小波分析了长江和黄河源区汛期、枯期的径流周期。刘海涛等^[5]采用 Mann-Kendall、滑动 t 和 Yamamoto 法联合检测了和田河上游半个世纪以来降水量的突变事实。李远平等^[6]利用滑动 t 检验(MTT)和 Mann-Kendall 非参数检验分析对柴达木盆地近 50 年气温、降水突变和周期特征进行了分析。王杰等^[7]利用 SWAT 模型预估 IPCC 的 A1F1、B1 气候变化情景下昆明市松华坝水源区两上游径流变化。

黔中地区因其地处两江分水岭河源地带、岩溶强

烈发育的山区,山高谷深水源低,雨多水少不易蓄,坡陡土薄涵水弱,水资源开发利用难度极大,加上水资源时空分配不均,人均水资源量少,可利用水资源非常紧缺,缺水成为限制其发展的首要瓶颈。从乌江上游三岔河取水的黔中水利枢纽工程是为解决该地区经济发展用水而建设的大型长距离调水工程^[8-9]。

因此,本文选择对黔中水利枢纽工程的水源区——三岔河上游的降水和径流水资源要素的趋势变化、突变特征和周期规律展开研究,为预测把握未来研究区域内水资源变化规律提供依据,并为黔中水利枢纽工程的水资源调度和配置提供基础支撑。

2 研究区概况和数据资料

2.1 研究区概况

三岔河是长江重要支流乌江的正源,发源于贵州高原西部乌蒙山东麓,流经贵州毕节地区、六盘水市、安顺市。流经毕节地区、六盘水市、安顺市所辖的威宁、钟山、水城、纳雍、六枝、普定、平坝、织金、清镇等县(市)区,河流全长 325.6km,上游面积 7 264km²,涉及流域面积 21 272.5km²。三岔河上游位于 104°18'~106°18'E、

收稿日期:2015-07-17

基金项目:贵州省重大科技项目“黔中岩溶山区水资源可持续利用关键技术研究”(黔科合重大专项专题[2012]6013-6);中国水利水电科学研究院专项“国家智能水网工程框架设计”资助项目(资集 1222);国家 973 计划课题“梯级水库群风险预警与应急处置机理”(2013CB036406)

作者简介:张一鸣(1990-),女,河南周口人,硕士,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: Zyiming714@163.com.

26°10'~27°00'N 之间,为亚热带季风性湿润气候区,气候湿润温和、雨量充沛。上游径流主要由降水补给,径流的时空变化与降水的时空变化基本一致,年际变化小而年内分配不均匀,洪枯流量间变化较大。

2.2 数据资料

降雨数据取自上游内 12 个雨量站,采用泰森多边形法计算三岔河上游面降水量;径流数据来源于三岔河上的阳长水文站和向阳水文站 1963~2012 年的实测日径流量资料。阳长水文站是乌江源三岔河上的省级重要水文站,上游面积为 2 696 km²,向阳水文站上游面积为 850 km²(见图 1)。



图 1 三岔河上游水系及观测断面示意图

Fig.1 The observed sections and river system of the Sanchahe River upstream

3 研究方法

3.1 Pettitt 法突变性分析

对时间序列相关变量进行突变分析的方法很多,本文采用 Pettitt 突变检验方法对研究区降水、蒸发和径流长时间序列中的突变现象进行分析,该方法不仅能够判断出突变点的位置及数量,还能判断突变点是否在统计意义上显著^[10]。

定义统计量 $U_{t,N}$:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_t - x_j) \quad (1)$$

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

式中: x_i, x_j 为进行假设检验的随机变量; t 为时间序列中某一样本的排序号; N 为数据系列的长度; $U_{t,N}$ 将根据第一个样本序列超过第二个样本序列次数的统计组成新的序列。Pettitt 法原假设 H_0 为序列不存在突变

点。若 t 时刻满足:

$$K_{t,N} = \text{Max} |U_{t,N}| \quad 1 \leq t \leq N \quad (3)$$

则 t 点处为突变点,同时计算突变点的显著性水平 P :

$$P = 2 \exp\{-6(K_{t,N})^2 / (N^3 + N^2)\} \quad (4)$$

如果 P 小于给定的显著性水平(本文给定的显著性水平为 0.05),则认为检验出的突变点在统计意义上是显著的。

3.2 Morlet 小波函数周期性分析

小波分析方法具有多分辨分析的特点,在时频域都具有表征信号局部特征的能力,可以对信号进行多尺度细化分析,得到各个频率随时间的变化及不同频率间的关系,因此广泛应用于水文时间序列规律的分析^[11]。

复数小波比实型小波能够更真实反映水文序列的各尺度周期性的大小以及这些周期在时域中的分布。复数小波变换系数的模表示特征时间尺度信号的强弱,实部表示不同时间的强弱和位相两个方面信息。因此,本文选用复数小波 Morlet 对研究区水文数据序列进行周期性分析。

Morlet 基本小波函数形式如下:

$$\psi(t) = e^{-t^2/2} e^{i\omega t} \quad (5)$$

将基本小波函数 $\psi(t)$ 经伸缩和平移后得:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0 \quad (6)$$

称 $\psi_{a,b}(t)$ 为连续小波函数,式中: a 为尺度收缩因子; b 为时间平移因子。

对于 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 其连续小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle \quad (7)$$

式中: a, b, t 均为连续变量,且 $a \neq 0$; $\langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle$ 为内积运算; $\overline{\psi(t)}$ 为 $\psi(t)$ 的复共轭。

将所有关于尺度 a 的小波系数的平方进行积分,即为小波方差,计算公式为:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (8)$$

小波方差 $\text{Var}(a)$ 表示尺度 a 波动的强弱和能量的大小。

4 结果分析和讨论

4.1 趋势性分析

根据图 2(A) 中降水量序列变化曲线,研究区多年

平均降水量为 1 002.12mm, 整体呈微弱增加趋势, 其增加率为 1.26mm/10a, 相关系数为 0.014, 在统计意义上不显著。从距平曲线来看, 有 24 年的降水量高于平均值, 即偏丰年占 48%, 且 50 年来丰枯年份不断波动, 交错起伏。从降水量 5a 滑动平均曲线可以看出研究区降水量经历了一个“平-增-减-增-减”的变化过程。在 20 世纪 60~70 年代变化平缓, 80 年代前期增加, 80 年代后期减少, 90 年代增加明显, 近 10 年来又处于减少阶段。总体上看来多年平均变化趋势不明显, 因此需要对研究区降水量进行周期性分析来预测未来降水变化趋势。

根据图 2(B)和(C)中径流量序列变化曲线图, 研究区近 50 年径流量总体呈略微减小趋势, 两个水文站的变化特征基本一致。阳长站多年平均流量为 41.27m³/s, 向阳站多年平均流量为 15.60 m³/s。分析距平曲线可知, 两水文站有 26 年的径流距平值为正, 偏丰和偏枯年份分别占总时间序列的 52%和 48%。从 5a 滑动平均曲线可以看出研究区径流量经历了一个“减-增-减-增-减”的变化过程。在 20 世纪 60~70 年代缓慢减少, 80 年代前期增加, 80 年代后期明显减少, 90 年代增加明显, 近 10 年来又处于减少阶段。

4.2 突变性分析

表 1 为三岔河上游降水和径流序列 Pettitt 突变分析的结果, 可以看出, 三岔河上游降水和径流序列的突变年份均发生在 2003 年, 而且均是突变减少的年份, 降水量、阳长站径流量和向阳站径流量在突变前后分别下降了 6.55%、17.7%、15.02%。这与许多学者在西南地区的研究结果一致, 例如, 李韵婕等^[12]在研究 1960~2010 年中国西南地区气象干旱事件时, 发现的 2003 年贵州发生严重伏旱, 向辽元等^[13]研究近 55 年中国大陆地区降水突变区域特征时, 发现西南地区降水在 2003 年出现减少突变。同时, 由表 1 结果可以看出, 三岔河上游降水、阳长和向阳站径流序列虽然在 2003 年出现了突变点, 但突变点的显著性水平 *P* 分别为 0.347、0.249、0.335, 均大于 0.05, 因此这三个水文序列在 2003 年突变不显著, 即三岔河上游近 50 年的降水和径流没有检测出显著的突变年份。

4.3 周期性分析

为了进一步识别三岔河上游水文序列的周期成分及其在时域上的分布, 本文选用在时域和频域局部性都较好的 Morlet 小波函数对研究区的年平均降水和径流序列进行周期性分析。

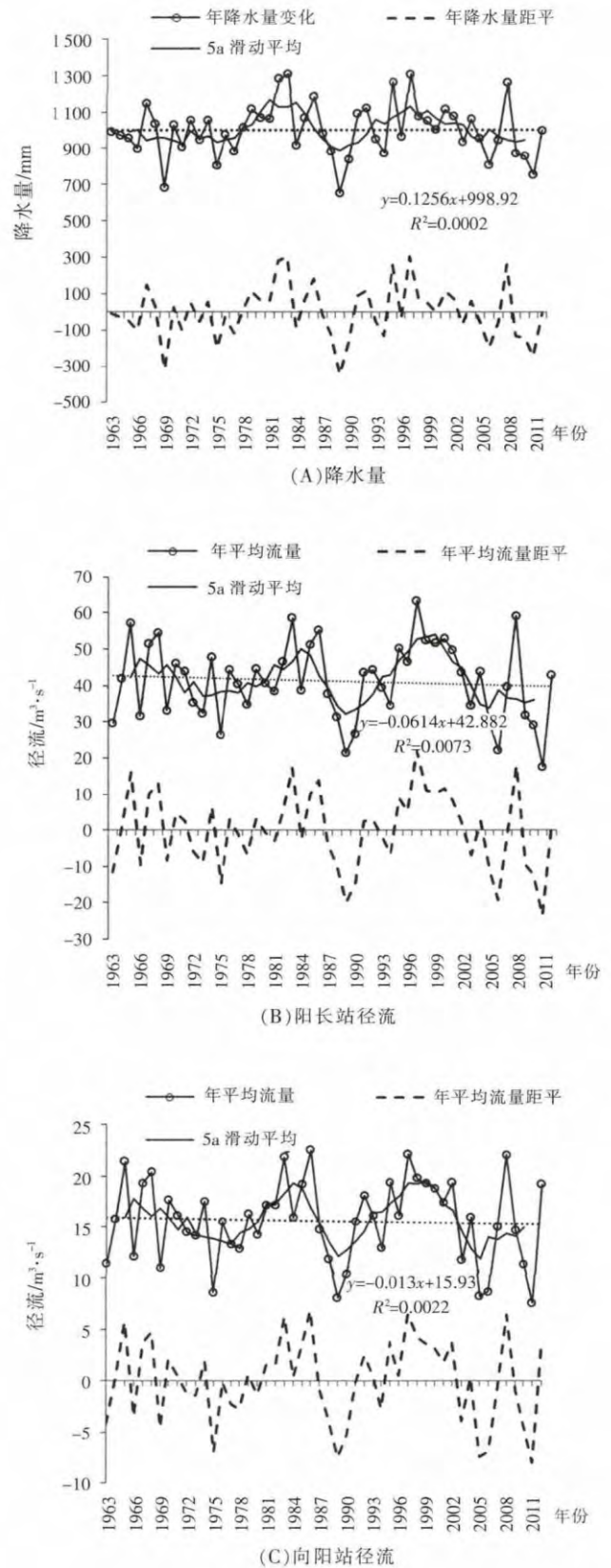


图2 降水径流变化及其滑动平均曲线

Fig.2 The variation and moving average of the annual precipitation and runoff

表1 降水和径流序列Pettitt突变分析结果

Table1 Pettitt mutation analysis of the precipitation and runoff series

水文序列	K_t	t	P	突变前后变化率/%
降水	150	2003	0.347	-6.55
阳长径流	172	2003	0.249	-17.70
向阳径流	126	2003	0.335	-15.02

注:突变前后变化率=(突变后均值-突变前均值)/突变前均值

4.3.1 降水序列周期性分析

图3显示了三岔河上游降水量近50年来不同时间尺度上的周期性震荡特征,可以看出研究区降水量总体上呈现小尺度嵌套在大尺度下的特征。其中13~14a和37~38a两个时间尺度降水量震荡特征最为显著。在13~14a的时间尺度下,正负相位震荡变化最为明显,降水经历了多-少-多-少-多-少的6个循环交替,其中在1971~1979年、1988~1995年、2005~2012年各时段为负相位,为枯水年;而1980~1987年、1996~2004年各时段为正相位,为丰水年。在37~38a左右的长周期震荡时段内,降水经历了少-多-少的3个循环交替,其中1983~2002年为丰水年,1963~1979年和2003~2012位枯水年份。截至2012年,上述两个时间尺度下的降水量偏少等值线均未封闭,预示着研究区内的年降水量均值仍将继续减少,因此未来几年内,按最强震荡尺度14a的周期特征推算,研究区的降水量减少趋势将持续到2018年左右。

小波方差反映了波动的能量随尺度的分布,通过

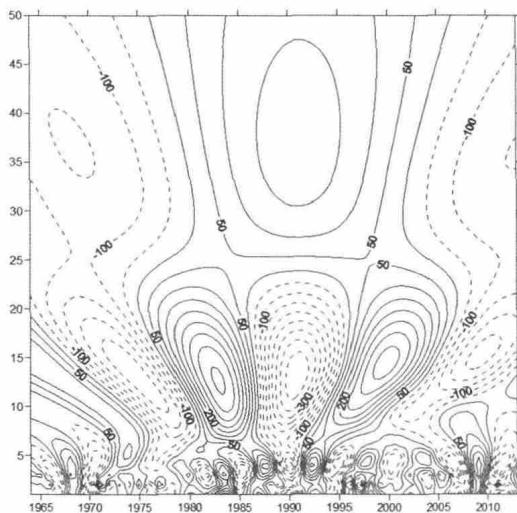


图3 降水序列小波变换实部

Fig.3 The real part of wavelet coefficient of the annual precipitation

小波方差变化曲线可以确定降水序列存在的主要时间尺度(主周期)。从降水序列小波方差变化曲线(图4所示)可以看出降水序列存在4a的小周期、14a的中周期和37a的大周期。其中最大峰值对应着14a左右的时间尺度,说明14a左右的周期震荡最强,是研究区降水量变化的主周期;其次37a为次周期。

4.3.2 径流序列周期性分析

图5和图7分别为三岔河上游阳长和向阳水文站径流量不同时间尺度上的周期性震荡特征。从图中可以看出两个水文站的周期性变化特征也基本一致,都是在12~14a时间尺度下的震荡特征最为强烈,主要表现在1991~1996年期间,径流经历了多-少-多-少-多-少的6个循环交替,即序列正负相位交替出现,其中1965~1972年、1981~1987年、1996~2003年各时段为正相位,表示径流偏多;而1973~1980年、1988~1995年、2004~2012年各时段为负相位,表示径流偏少;突变点发生在1969年、1977年、1985年、1992年、2000年和2009年。截至2012年,在上述时间尺度下,径流量偏少等值线均未封闭,预示着研究区内的年径流量均值仍将继续减少。

从两个水文站径流序列的小波方差变化曲线(图6和图8所示)可以看出径流量存在14a左右的周期,其小波方差极值最为显著,为主周期。

5 结论

本文利用常规线性回归和滑动平均法、Pettitt法以及Morlet小波分析等方法对三岔河上游近50年的

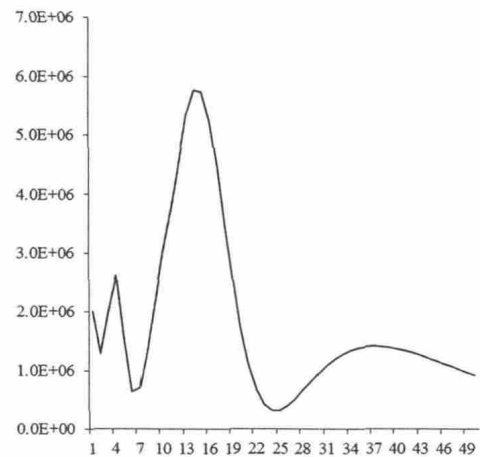


图4 降水序列小波方差图

Fig.4 The wavelet square module spectrum of the annual precipitation

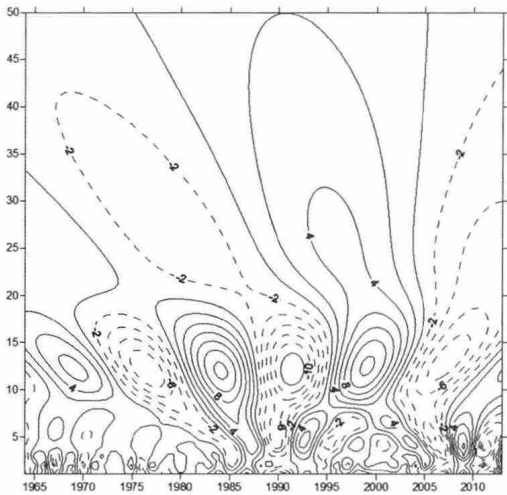


图 5 阳长站径流小波变换实部

Fig.5 The real part of wavelet coefficient of the annual precipitation at the Yangchang station

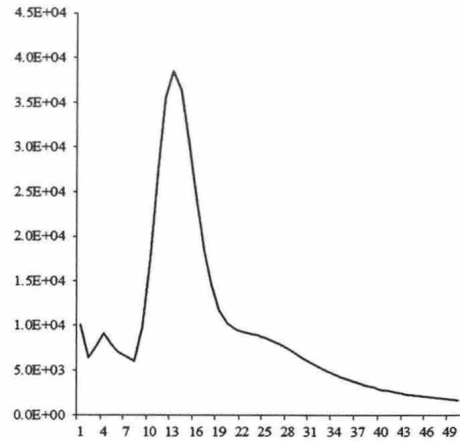


图 6 阳长站径流小波方差图

Fig.6 The wavelet square module spectrum of the annual precipitation at the Yangchang station

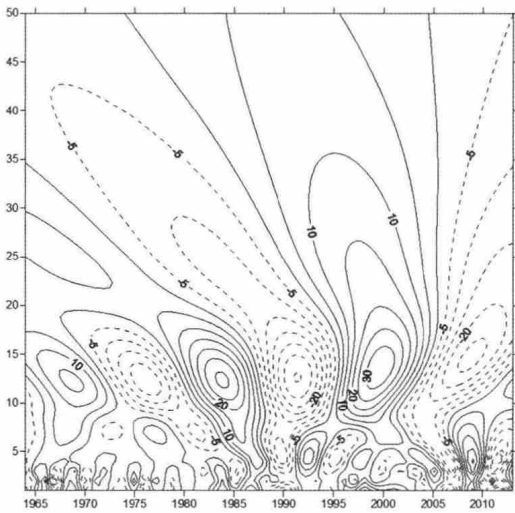


图 7 向阳站径流小波变换实部

Fig.7 The real part of wavelet coefficient of the annual precipitation at the Xiangyang station

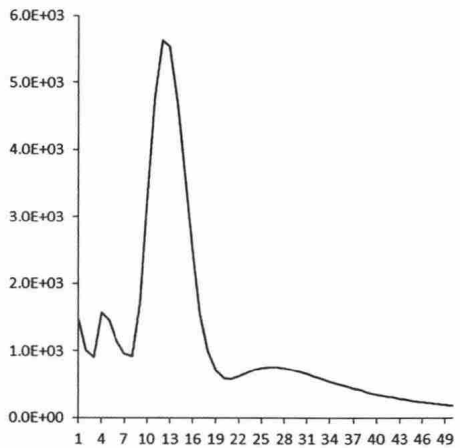


图 8 向阳站径流小波方差图

Fig.8 The wavelet square module spectrum of the annual precipitation at the Xiangyang station

降水和径流序列进行趋势性、突变性和周期性等多维变化特征分析。得到了如下结论:

(1)1963~2012 年,三岔河上游降水呈略微增加趋势,径流呈略微减小趋势。其中降水量增加率为 1.26mm/10a,相关系数为 0.014;阳长径流量减少率为 0.614m³/s/10a,相关系数为 0.085;向阳径流量减少率为 0.13m³/s/10a,相关系数为 0.047,在统计意义上均不显著。对于年代变化而言,降水和径流量均经历多个增加-减少的震荡特征。

(2)Pettitt 突变检验结果表明研究区各个水文序列数据均在 2003 年存在突变年份,但均为不显著性突

变,说明近 50 年三岔河上游降水和径流变化(上升或下降)幅度没有达到显著的突变水平。

(3)Morlet 小波分析结果显示研究区降水序列存在一个 13~14a 的主周期和 37a 次周期;径流序列只存在一个 14a 左右的主周期。可以看出该区的水文事件都存在一个 14a 左右的共同周期,这与张荣等^[14]在研究近 60 年西南地区降水异常的气候特征时,发现的降水变化以 14a 周期最为显著结果一致。根据周期检验结果,截止到 2012 年降水和径流偏少等值线均未封闭,预示着研究区内的降水和径流量仍将继续减少,按 14a 周期特征推算,研究区的降水和径流量减

少趋势将持续到 2018 年左右。

参考文献:

- [1] 胡海英, 黄国如, 黄华茂. 辽河上游铁岭站径流变化及其影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2013,4(2):98-102. (HU Haiying, HUANG Guoru, HUANG Huamao. Variation of runoff at Tieling station of Liaohe river basin and its influence factors [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,4(2):98-102. (in Chinese))
- [2] 张士锋, 华东, 孟秀敬. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析[J]. 地理学报, 2011,66(1):13-24. (ZHANG Shifeng, HUA Dong, MENG Xiujing. Variation of climate and its driving runoff in Sanjiangyuan [J]. Journal of Geographical, 2011,66(1):13-24. (in Chinese))
- [3] 王金星, 张建云, 李岩, 等. 近 50 年来中国六大上游径流年内分配变化趋势[J]. 水科学进展, 2008,19(5):656-661. (WANG Jinxing, ZHANG Jianyun, LI Yan, et al. Variation trends of runoffs seasonal distribution of the six larger basins in China over the past 50 years [J]. Advances in Water Science, 2008,19(5):656-661. (in Chinese))
- [4] 邴龙飞, 邵全琴, 刘纪远, 等. 基于小波分析的长江和黄河源区汛期、枯水期径流特征[J]. 地理科学, 2011,31(2):232-238. (BING Longfei, SHAO Quanqin, LIU Jiyan, et al. Runoff characteristic in flood and dry seasons in source regions of Changjiang River and Huanghe River based on wavelet analysis [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011,31(2):232-238. (in Chinese))
- [5] 刘海涛, 张向军, 郭全水. 和田河上游半世纪来气温、降水突变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010,24(1):58-62. (LIU Haitao, ZHANG Xiangjun, GUO Quanshui. Mutation analysis of the temperature and precipitation in Hetian River upstream half a century [J]. Resources and Environment in Arid Areas, 2010,24(1):58-62. (in Chinese))
- [6] 李远平, 杨太保. 柴达木盆地气温、降水突变与周期特征分析[J]. 地理与地理信息科学, 2010,23(3):105-108. (LI Yuanping, YANG Taibao. Mutation and cycle characteristics analysis of the temperature and precipitation in Chaidamu basin [J]. Geography and Geographic Information Science, 2010,23(3):105-108. (in Chinese))
- [7] 王杰, 黄英, 段琪彩, 等. 变化情形下昆明市松华坝水源区径流变化研究[J]. 水文, 2013,33(5):64-69. (WANG Jie, HUANG Ying, DUAN Qicai, et al. Runoff variation under change scenarios in Songhuaba water source area of Kunming City [J]. Journal of China Hydrology, 2013,33(5):64-69. (in Chinese))
- [8] 孟碟. 黔中水利枢纽工程水资源调配与经济核算研究[D]. 天津: 天津大学, 2013. (MENG Die. Qianzhong Water Project Study of Water Transfer and Economic Accounting [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [9] 杨秀才. 黔中水利枢纽工程存在的问题及运行管理对策[J]. 现代农业科技, 2010,(20):273-274. (YANG Xiucui. The problems and management countermeasures of Qianzhong water project engineering [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2010,(20):273-274. (in Chinese))
- [10] 拜存有, 苏莹, 郭旭新. 流域水文过程变点分析研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2010,21(1):83-86. (BAI Cunyou, SU Ying, GUO Xuxin. Review of mutation analysis of watershed hydrological process [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010,21(1):83-86. (in Chinese))
- [11] Percival D B, Andrew T W. Wavelet Methods for Time Series Analysis [M]. Cambridge: Press of Cambridge University, 2000.
- [12] 李韵婕, 任福民, 李忆平, 等. 1960-2010 年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析[J]. 气象学报, 2014,72(2):266-276. (LI Yunjie, REN Fumin, LI Yiping, ect. A study of the characteristics of the southwestern China regional meteorological drought events during 1960-2010 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014,72(2):266-276. (in Chinese))
- [13] 向辽元, 陈星, 黎翠红, 等. 近 55 年中国大陆地区降水突变的区域特征[J]. 暴雨灾害, 2007,26(2):149-153. (XIANG Liaoyuan, CHEN Xing, LI Cuihong, et al. The regional features of abrupt precipitation change in China in recent 55 years [J]. Torrential Rain and Disasters, 2007,26(2):149-153. (in Chinese))
- [14] 张荣, 庞晶, 覃军. 近 60 年西南地区降水异常的气候特征分析[J]. 安徽农业科学, 2012,40(30):14873-14875. (ZHANG Rong, PANG Jing, QIN Jun. Analysis on climatic characteristics of the precipitation anomaly in southwest China in recent 60 years [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2012,40(30):14873-14875. (in Chinese))

Change Characteristics of Water Resources in Sanchahe Upstream over Past 50 Years

ZHANG Yiming^{1,2}, TIAN Yu², LEI Xiaohui², SONG Wanzhen^{1,2}, JIANG Yunzhong²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to analyze the evolution of water resources in the Sanchahe upstream, the water source area of the Qianzhong Hydraulic Project, the conventional linear regression, moving average method, Pettitt method and Morlet wavelet analysis method were used to find out the trend, mutability and periodic multidimensional characteristics of the precipitation and runoff from 1963 to 2012. The results show that the overall changing trends of precipitation and runoff are not obvious, but the wet and dry years alternate frequently. Mutation test results show that all of the hydrological sequences have a mutation in the year 2003, but not significant. According to the Morlet wavelet analysis, all of the hydrological sequences can be found a change periodic about 14 years.

Key words: moving average; Pettitt; Morlet wavelet; trend analysis; mutation analysis; period analysis