

金沙江流域降水和径流时空演变的非一致性分析

张海荣^{1,2}, 周建中^{1,2}, 曾小凡^{1,2}, 叶磊^{1,2}, 孟长青^{1,2}

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 数字流域科学与技术湖北省重点实验室, 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要:基于金沙江流域 1966~2010 年降水和径流资料,采用单变量 Mann-Kendall(MK) 趋势分析法、突变检验法和多变量 MK 法对金沙江流域近几十年来的降水和径流变化进行了非一致性分析。结果表明:金沙江流域年降水和年径流整体呈上升趋势,特别是从 20 世纪 90 年代之后增大趋势较为明显。其中金沙江流域中游以上区域的年降水通过显著性检验,上升趋势较为明显,而各个水文站点的年径流均未通过显著性检验,仅存在微弱的上升趋势。中游攀枝花站集水区域的面平均年降水趋势存在突变点,在 1997 年之后显著增加,而其年径流则不存在突变点,其他站点面平均年降水和年径流趋势都不存在突变。此外,中游龙街站集水区域的面平均年降水和年径流通过多变量 MK 显著性检验,表明龙街站降水和径流联合变量呈显著增加趋势。

关键词:金沙江流域;多变量;非一致性分析;MK 检验

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)06-0090-07

1 引言

金沙江流域发源于青藏高原,是我国西南地区最大的江河之一,干流全长 3 496km,总落差 5 154m,流域面积约 47.32×10⁴km²,水资源和水能资源十分丰富。开展南水北调西线调水、引水滇中高原和川南丘陵区,实施金沙江下游的“长治”工程,是金沙江流域未来开发与治理的重要内容^[1]。但在全球及区域气候变暖的背景下,金沙江流域水循环的时空变化过程将发生改变,可能引起降水与水资源的时空分布不均^[2],加剧旱涝等水文极端事件的发生概率与强度。因此,在变化环境下研究金沙江流域的降水与径流变化趋势具有重要意义。

在以往的研究中,已有许多学者分别将降水和径流作为独立研究对象进行分析^[3-10],部分研究包含多个水文变量,但并没有充分揭示多种水文变量间的联合变化规律。然而,流域内的水文事件通常包含多个水文变量,水文变量间常常存在一定的相关性,如流域的降水与径流之间具有明显的相关关系,因此,需要联合

考虑多个水文变量间的相关变化趋势才能完整刻画水文事件的变化特征。近年来,对多个具有相关关系的水文变量进行联合分析,已是国内外水文学者的研究热点^[11-12]。

目前,针对降水和径流等单变量变化趋势分析,国内外多采用线性倾向估计、累积距平、滑动平均、二次平滑、三次样条函数、Mann-Kendall(MK)秩次相关分析以及小波分析等方法^[3,6-9]。研究表明,MK 检验法较其他方法更能有效表述水文气象时间序列的变化趋势^[13]。在单变量 MK 检验法基础上,Chebana 等于 2013 年成功引入水质研究领域的多变量 MK 趋势分析方法,研究年最大洪峰和年最大日洪量的联合变化趋势,以检验洪水过程的多要素变化规律^[14]。叶磊等对长江上游主要控制站点的年最大洪峰、年最大 7d 洪量进行联合变量 MK 趋势分析,结果表明多变量趋势分析能够综合检验出联合变量是否存在变化趋势^[15]。

为此,本文以金沙江流域为研究区,分别利用单变量 MK 趋势分析、突变检验及多变量 MK 趋势分析,

收稿日期:2014-12-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51239004);国家自然科学基金(51309105);华中科技大学中央高校基本科研业务费资助(2014QN233)

作者简介:张海荣(1990-),男,湖北宜昌人,博士研究生,主要从事气象预报及水文分析计算的研究。E-mail: zhr@hust.edu.cn

通讯作者:周建中(1959-),男,湖北武汉人,教授,主要从事水电能源科学研究。E-mail: jz.zhou@hust.edu.cn

研究金沙江流域降水和径流的单变量趋势、突变检验及多变量变化趋势等非一致性特征,解析金沙江流域水循环要素的时空变化规律,更好地为水资源调度提供决策支持,保障水电能源的可持续发展。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

本文选取金沙江流域伍道梁站、托托河站和曲麻莱站等 32 个观测气象站 1966~2010 年的年降水数据,攀枝花站、龙街站、乌东德站、白鹤滩站和向家坝站等 5 个水文控制站 1966~2010 年的年径流数据,进行金沙江流域降水和径流的单变量、多变量变化趋势分析。

其中,本文依据 DEM 数据将金沙江流域分成 5 个子单元,进而将气象站点划分到每个单元,为使流域的面平均降水计算更加准确,本研究将不位于某些子单元,但是非常接近该集水区域的气象观测站也计入该单元,计算该水文站集水区域的面平均降水。

本研究选取的水文站、气象站的地理位置和子单元划分见图 1。

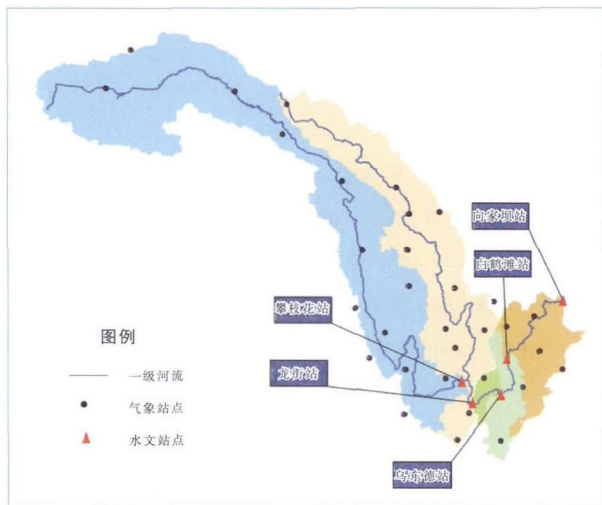


图 1 金沙江流域子单元划分及气象、水文站点分布

Fig.1 Location of the watershed, meteorological and hydrological stations in Jinsha River Basin

2.2 研究方法

2.2.1 单变量 MK 法

单变量 MK 检验法是由 Mann 和 Kendall 提出的非参数统计检验方法^[16-17],被世界气象组织推荐并已广泛使用,该方法不要求变量具有正态分布特征,不受趋势是否为线性的影响,也不受少数异常值的干扰,适

用于水文变量的趋势分析。

(1) 趋势分析。假定某水文变量时间序列为 X_1, X_2, \dots, X_n , MK 检验构造统计变量 S 定义如下:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (1)$$

式中: X_j 和 X_i 代表水文时间序列相应年份数据, N 代表序列长度, $\text{sgn}(X_j - X_i)$ 为阶跃函数,当 $X_j > X_i$ 时值为 1,当 $X_j < X_i$ 时值为 -1,当 $X_j = X_i$ 时值为 0。

Mann 和 Kendall 证明了 S 服从渐进正态分布,其期望和方差如下所示:

$$E(S) = 0 \quad (2)$$

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (3)$$

同时,按照下式构造统计变量 Z :

$$Z = \frac{S - E(S)}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad (4)$$

Z 服从标准正态分布,在双边趋势检验中,给定显著性水平 α ,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则认为水文序列存在显著的变化趋势。本文给定显著性水平 $\alpha=0.05$,单变量趋势分析的阈值为 1.96。

(2) 突变检验。对于具有 n 个样本量的时间序列 X_1, X_2, \dots, X_n ,构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k R_i \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

式中: R_i 表示 X_i 大于 X_j ($1 \leq j \leq i$) 的累积数。在时间序列随机独立的假设下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中:当 $k=1$ 时, $UF_1=0$ 。 $E(S_k)$, $\text{Var}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差,在 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立,且有相同连续分布时,它们可由下式算出:

$$E(S_k) = n(n+1)/4 \quad (7)$$

$$\text{Var}(S_k) = n(n-1)(2n+5)/72 \quad (8)$$

UF_k 为标准正态分布,它是按时间序列 X 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,若 $|UF_k| > U_\alpha$,则表明序列存在显著的趋势变化。

按时间序列 X 逆序 X_n, X_{n-1}, \dots, X_1 ,再重复上述过程,同时使 $UB_k = -UF_k$, $k=n, n-1, \dots, 1$,且当 $k=1$ 时, $UB_1=0$ 。

分析 UB_k 和 UF_k 曲线图,当它们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著。超过临界线的范围确

定为出现突变的时间区域。如果 UB_k 和 UF_k 两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

为保障突变检验的有效性,本研究再配以滑动 t 检验法来检验突变点,这两种方法在统计学上具有一定程度的互补性^[18-19]。对于时间序列 X 设置一基准点,基准点前后两端子序列 X_1 和 X_2 的样本分别为 n_1 和 n_2 ,两段子序列平均值为 \bar{X}_1 和 \bar{X}_2 ,方差为 S_1 和 S_2 。定义统计量:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S\sqrt{1/n_1 + 1/n_2}} \quad (9)$$

其中:

$$S = \sqrt{\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (10)$$

给定显著性水平 α ,若 $|t| < t_\alpha$,则认为基准点前后的两子序列均值无显著差异,否则认为在基准点时刻出现了突变,本研究中样本长度选择 $n_1 = n_2 = 5$ 。有关该方法的更多介绍详见参考文献[18-19]。

2.2.2 多变量 MK 法

多变量 MK 法是在单变量 MK 法的基础上发展而来,由 Lettenmaier 首次给出完整的计算方法^[20],并由 Chebana 等在 2013 年将其首次引入到水文领域^[14]。多变量 MK 法简介如下:

首先按照式(1)对每个单个变量计算 S_i ,并将所有变量组成一个向量如下

$$S = [S_1, S_2, \dots, S_d] \quad (11)$$

式中: d 代表变量个数。 S 服从期望为 0,协方差矩阵为 C_M 的渐进 d 元正态分布。协方差矩阵 $C_M = (c_{u,v})_{u,v=1,\dots,d}$,其中 $c_{u,v} = \text{cov}(S_u, S_v)$ 。协方差矩阵按照如下公式计算:

$$\hat{c}_{u,v} = \frac{t_{u,v} + r_{u,v}}{3} \quad \text{当 } u \neq v \quad (12)$$

式中:

$$t_{u,v} = \sum_{1 \leq i < j \leq N} \text{sgn}((X_j^u - X_i^u)(X_j^v - X_i^v))$$

$$r_{u,v} = \sum_{i,j,k=1}^N \text{sgn}((X_k^u - X_i^u)(X_k^v - X_i^v)) \quad (13)$$

当 $u=v$ 时,方差计算参照单变量 MK 检验的公式(3)。

(1)协方差逆检验(The Covariance Inversion Test)。Dietz 和 Killeen 首次提出多变量 MK 检验的扩展形

式^[21],被 Lettenmaier 称为协方差逆检验^[20]。 C_M^{-1} 代表协方差矩阵 C_M 的逆,当 C_M 不是满秩矩阵,则代表广义逆矩阵。统计公式如下:

$$D = SC_M^{-1}S^T \quad (14)$$

D 服从渐进 $\chi^2(q)$ 分布,其中 q 代表矩阵 C_M 的秩。给定显著性水平 α , D 的值超过 $\chi^2(q)$ 分布的阈值则认为联合多变量存在显著的变化趋势。

(2)协方差和检验(The Covariance Sum Test)。Hirsch 和 Slack 提出和公式(14)类似的多变量 MK 检验扩展形式^[22],适合检验多元相关变量的趋势分析,来源于 Hirsch 等在 1982 年提出的季节性 MK 检验^[22]。Lettenmaier 将其称为协方差和检验^[19]。统计公式如下:

$$H = S_1 + S_2 + \dots + S_d \quad (15)$$

统计量 H 服从渐进正态分布,其期望为 0,方差为:

$$\text{Var}(H) = \sum_{u=1}^d S_u + 2 \sum_{v=1, u=1}^{d,v-1} c_{u,v} \quad (16)$$

式中: $c_{u,v} = \text{cov}(S_u, S_v)$ 见公式(8)。按照单变量 MK 检验,构造出标准正态分布检验量,在给定显著性水平 α ,如果计算值超过给定阈值则认为多变量存在显著的变化趋势。

3 实例分析

本文首先采用单变量 Mann-Kendall 趋势分析及突变检验法检测降水和径流的变化趋势,然后引入多变量 Mann-Kendall 检验方法,对降水和径流联合变量的协方差逆检验、协方差和检验进行研究,以判断联合变量是否存在变化趋势。

3.1 单变量 MK 分析

3.1.1 变化趋势分析

金沙江流域攀枝花站、龙街站、乌东德站、白鹤滩站和向家坝站等 5 个水文站点集水区域的面平均年降水和水文站年径流 1966~2010 年变化如图 2 所示,可以看出,1966~2010 年 5 个子单元的面平均年降水和水文站年径流都呈一定程度的上升趋势。

分别对上述 5 个子单元的面平均年降水和水文站年径流进行单变量 MK 趋势分析。计算结果如图 3 所示,5 个子单元的面平均年降水和水文站年径流的 MK 检验值都大于 0,表明 5 个子单元的面平均年降水和水文站年径流都存在不同程度的增大趋势。其中,龙街站、乌东德站和白鹤滩站集水区域的面平均年降水的 Z 值超过了阈值 1.96,表明这 3 个子单元面平均年降水存在显著的增大趋势,而攀枝花站和向家

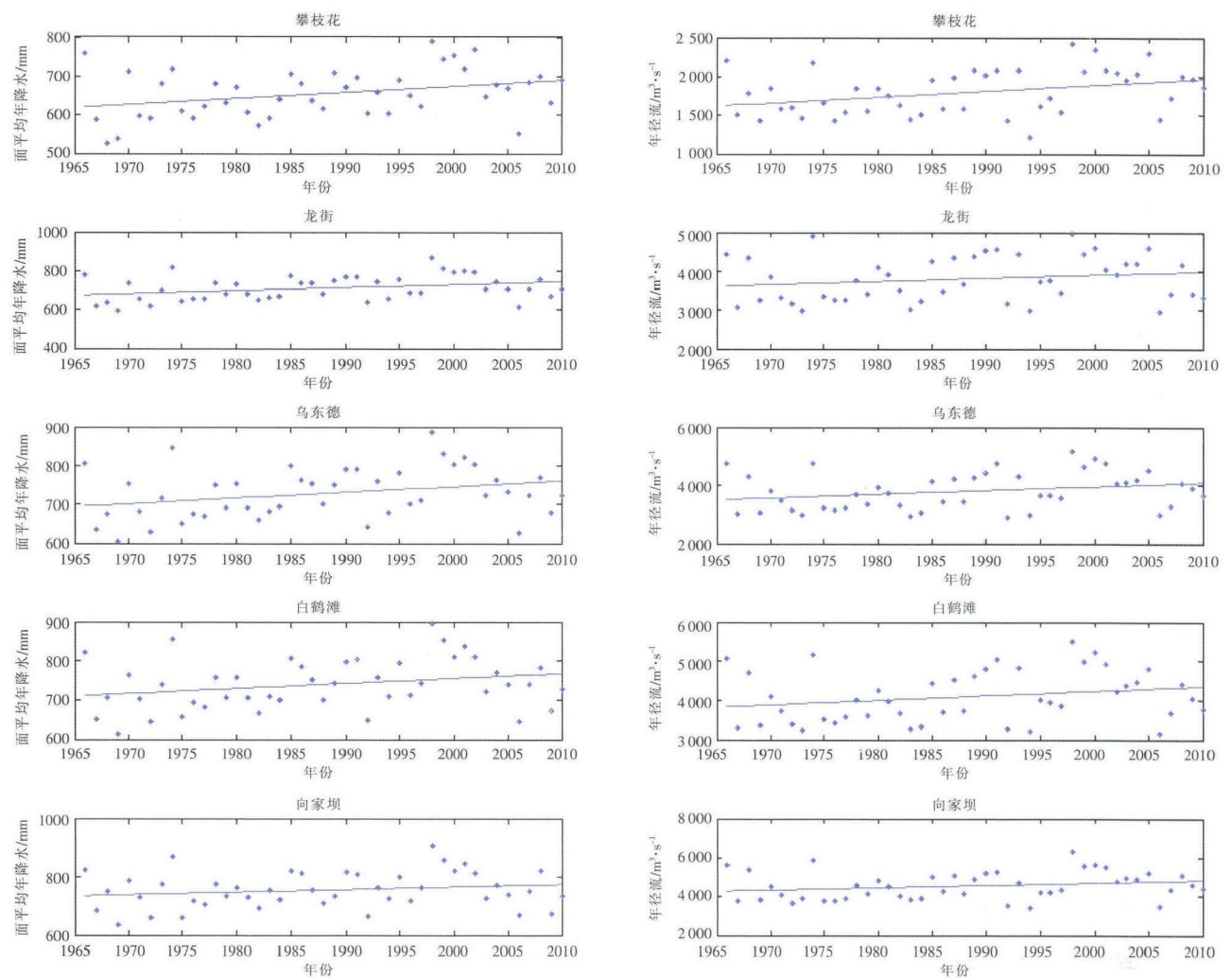


图 2 1966~2010 年各站点面平均年降水和年径流散点图

Fig.2 The scatterplots of the annual precipitation and runoff as well as linear regression line of the different stations from 1966 to 2010

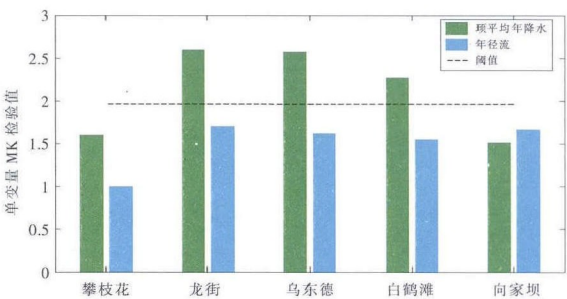


图 3 各站点面平均年降水和年径流单变量 MK 趋势分析值

Fig.3 The results of the univariate MK tendency test for the different stations

坝站集水区域的面平均年降水的增大趋势则不太明显。同时,5 个站点的年径流的 Z 值都没有超过阈值 1.96, 表明这 5 个站点集水区域的年径流虽然都有增

大的趋势,但是增大趋势不显著。

3.1.2 突变检验

(1)面平均年降水。运用 2.2.1 介绍的 MK 突变检验方法,对 5 个站点集水区域的面平均年降水进行突变检验,作出相应的 UF 和 UB 曲线图如图 4 所示。

从图 4 可知,攀枝花站集水区域的面平均年降水在 20 世纪 60 年代中期上升,70 年代波动下降,然后保持平稳,在 90 年代回归上升趋势,2005 年显著升高,超过 0.05 置信度。 UF 、 UB 交于 1971、1995、1997、1999 年,进一步用滑动 t 检验分析,得到 1992 和 1997 年为突变年,综合 MK 突变检验与滑动 t 检验可知,攀枝花站集水区域面平均年降水在 1997 年发生突变,从 1997 年之后开始显著增大。

龙街站、乌东德站、白鹤滩站、向家坝站 4 个站点

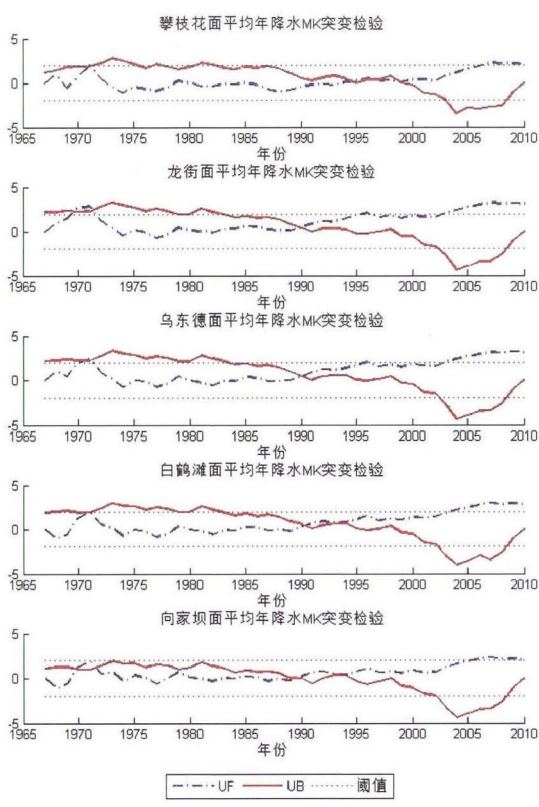


图4 各站点面平均年降水 MK 突变检验

Fig.4 The results of the univariate MK mutation test in the different stations' annual precipitation

集水区域的面平均年降水 UF 、 UB 曲线图较为类似,从它们的 UF 曲线可以看出,4 个站点集水区域的面平均年降水在 20 世纪 60 年代上升,70 年代略有下降,80 年代之后回归上升趋势。 UF 、 UB 交于 1969~1972 年、1989~1993 年之间,采用 t 检验去除非气候突变点的干扰,结果无任何突变年存在,说明这 4 个站点的面平均年降水量没有突变增加。

(2)年径流。同理,对攀枝花站、龙街站、乌东德站、白鹤滩站和向家坝站等 5 个站点的年径流进行 MK 突变检验 (图略),5 个站点的年径流从 20 世纪 60 年代上升,到 70 年代开始下降,然后到 20 世纪 90 年代回归上升趋势,5 个站点的 UF 和 UB 的交点从 3 个到 5 个不等,采用 t 检验去除非气候突变点的影响,结果无任何突变点存在,说明攀枝花站、龙街站、乌东德站、白鹤滩站和向家坝站等 5 个站点的年径流没有突变增加趋势。

3.2 多变量 MK 分析

将每个站点集水区域的面平均年降水和年径流组成联合变量,利用 2.2.2 介绍的多变量 MK 法的 CIT 检

验和 CST 检验对 5 个站点的联合变量进行多变量趋势分析,以综合检测一个站点降水与径流的联合变量变化趋势。给定显著性水平 $\alpha=0.05$,当统计量的绝对值大于阈值时,表明联合变量存在显著的变化趋势。计算结果见表 1,超过相应阈值的结果加粗表示。

从表 1 可知,CIT 检验和 CST 检验都超过阈值的

表1 多变量MK检验结果

Table1 The results of the multivariate MK testing

站点	CIT	阈值	CST	阈值
攀枝花	5.78	5.99	2.39	1.96
龙街	6.14	5.99	2.04	1.96
乌东德	5.25	5.99	2.13	1.96
白鹤滩	3.67	5.99	1.91	1.96
向家坝	4.09	5.99	1.66	1.96

站点只有龙街站,说明龙街站的降水和径流联合变量有显著增加趋势,子流域的降水、径流一致增大,在运用历史数据进行降水-径流建模时,不能简单沿用传统的一致性分析方法,需要考虑降雨、径流逐渐增大的特性。

CIT 检验和 CST 检验都没有超过相应阈值的站点有白鹤滩站和向家坝站,说明白鹤滩站和向家坝站的降水和径流联合变量没有显著变化趋势,在进行降水-径流建模时可以采用一致性分析方法,同时,分析降水和径流变化趋势不一致的原因可能与人类活动有关。人类的工业、农业、生活用水不但会影响流域原有的水量平衡,相应的农田水利、垦殖等活动也会改变流域下垫面情况^[24],同时,随着金沙江下游干流河段的梯级水电开发,向家坝、溪洛渡电站的建成势必会对流域产汇流特性产生较大影响,以上因素都会导致白鹤滩和向家坝的降水和径流联合变化趋势不同步,这也与单变量 MK 分析的结果一致,虽然白鹤滩的降水呈显著增大趋势,但是其径流变化趋势不太显著。

CIT 检验没有超过阈值,而 CST 检验超过阈值的站点有攀枝花站和乌东德站,因此在研究两站水文要素变化趋势时需结合单变量 MK 法分析结果。在单变量 MK 分析中,虽然乌东德站的降水通过了显著性检验,呈增大趋势,但是其径流并没有显著的变化趋势,同时,攀枝花站的降水和径流都没有通过显著性检验,结合单变量 MK 法和多变量 MK 法的分析结果,两

站的降水、径流变化相关性较小,两者的联合变量没有显著的变化趋势,在进行降水-径流建模时可以采用一致性分析方法。

4 结论

通过对 20 世纪 60 年代以来的金沙江流域降水量和径流量变化趋势进行分析,得到以下结论:

(1)金沙江流域年降水量总体呈上升趋势,5 个站点中龙街站、乌东德站和白鹤滩站集水区域的面平均年降雨通过了单变量 MK 显著性检验,表明年降水量的上升趋势较为明显。金沙江流域的年径流总体也呈上升趋势,但都没有通过单变量 MK 显著性检验,这也与王顺久^[6]、赵文焕^[25]等人的研究结论一致,与李春辉^[26]的研究结果对比,说明我国西南地区降水径流并不像西北干旱地区那样呈明显下降趋势。

(2)在金沙江流域年降水量和年径流的突变分析上,只有攀枝花站集水区域的面平均年降水从 1997 年开始显著增大,其他站点集水区域的面平均年降水和年径流都没有突变点存在,但是可以得出金沙江流域的降水和径流从 20 世纪 90 年代之后普遍呈明显的增大趋势的结论。陈媛等采用滑动平均法和 MK 检验法分析金沙江流域的径流变化特性,也得出金沙江流域呈不显著的增大趋势,并在 1966 年和 1997 年径流发生突变的结论^[27]。

(3)对金沙江流域 5 个站点进行多变量 MK 分析,发现龙街站的联合变量(面平均年降水和年径流)存在显著的增大趋势,表明龙街站的降水和径流这一气象水文事件存在显著的增大趋势,而在单变量分析中,并没有发现龙街站的年径流存在显著的增大趋势。这也进一步表明,采用多变量 MK 趋势检验方法能够揭示降水和径流的联合变化规律,有助于完整刻画水文事件的变化特征。

参考文献:

- [1] 徐长江, 范可旭, 肖天国. 金沙江流域径流特征及变化趋势分析[J]. 人民长江, 2010,41(7):10-14. (XU Changjiang, FAN Kexu, XIAO Tianguo. Runoff characteristics and variation tendency of Jinsha River basin [J]. Yangtze River, 2010,41(7):10-14. (in Chinese))
- [2] Bates B, Kundzewicz Z W, Wu S, et al. Climate change and water [M]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008.
- [3] 王兆礼, 陈晓宏, 张灵, 等. 近 40 年来珠江流域降水量的时空演变特征 [J]. 水文, 2006,26(2):71-75. (WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, ZHANG Ling, LI Yan. Spatio-temporal change characteristics of precipitation in the Pearl River basin in recent 40 years [J]. Journal of China Hydrology, 2006,26:71-75. (in Chinese))
- [4] 陆志华, 夏自强, 于岚岚, 等. 松花江流域年降水和四季降水变化特征分析[J]. 水文, 2012,32(2):62-71. (LU Zhihua, XIA Ziqiang, YU Lanlan, WANG Jingcai. Variation of characteristics of annual precipitation and seasonal precipitation in Songhuajiang River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(2):62-71. (in Chinese))
- [5] 孙甲岚, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 长江流域上游气温、降水及径流变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2012,30(5):1-4. (SUN Jialan, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Variation trend analysis of meteorological variables and runoff in upper reaches of Yangtze River [J]. Water Resources and Power, 2012,30(5):1-4. (in Chinese))
- [6] 王顺久. 长江上游川江段气温、降水及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2009,(7):1142-1149. (WANG Shunjiu. Changing pattern of the temperature, precipitation and runoff in Chuanjiang section of the Yangtze River [J]. Resources Science, 2009,(7):1142-1149. (in Chinese))
- [7] 王艳君, 姜彤, 施雅风. 长江上游流域 1961-2000 年气候及径流变化趋势[J]. 冰川冻土, 2005,27(5):709-714. (WANG Yanjun, JIANG Tong, SHI Yafeng. Changing trends of climate and runoff over the upper reaches of the Yangtze River in 1961-2000 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005,27(5):709-714. (in Chinese))
- [8] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006,25(1):27-34. (XU Zongxue, ZHANG Nan. Long-term trend of precipitation in the Yellow River basin during the past 50 years [J]. Geographical Research, 2006,25(1):27-34. (in Chinese))
- [9] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵, 等. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2004,23(2):238-244. (ZUO Hongchao, LU Shihua, HU Yinqiao. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years [J]. Plateau Meteorology, 2004,23(2):238-244. (in Chinese))
- [10] 曾小凡, 翟建青, 姜彤, 等. 长江流域年降水量的空间特征和演变规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008,(6):727-732. (ZENG Xiaofan, ZHAI Jianqing, JIANG Tong, et al. Spatial characteristics and evolutionary trends of annual precipitation in the Yangtze River basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008,(6):727-732. (in Chinese))
- [11] Favre A, El Adlouni S, Perreault L, et al. Multivariate hydrological frequency analysis using copulas [J]. Water Resources Research, 2004,40(1).
- [12] 郭生练, 闫宝伟, 肖义, 等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. 水文, 2008,28(3):1-7. (GUO Shenglian, YAN Baowei, XIAO Yi, et al. Multivariate hydrological analysis and estimation [J]. Journal of China Hydrology, 2008,28(3):1-7. (in Chinese))
- [13] 郑杰元. 气候变化影响下区域水文要素变化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011. (ZHENG Jieyuan. Research of Variations of Regional Hydrologic and Meteorologic Elements on Global Climate Change [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese))

- [14] Chebana F, Ouarda T, Duong T C. Testing for multivariate trends in hydrologic frequency analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,486:519–530.
- [15] 叶磊,周建中,曾小凡,等. 水文多变量趋势分析的应用研究[J]. 水文, 2014,(6):6. (YE Lei, ZHOU Jianzhong, ZENG Xiaofan, et al. Application of hydrological multivariate trend analysis [J]. *Journal of China Hydrology*, 2014,(6):6. (in Chinese))
- [16] Kendall M G. Rank correlation methods [Z]. 1948.
- [17] Mann H B. Non-parametric test against trend [J]. *Econometrika*, 1945,13:245–259.
- [18] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992,16(4):482–493. (FU Congbin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992,16(4):482–493. (in Chinese))
- [19] 梁丽乔,李丽娟. 洮儿河流域蒸发时空格局及其演变机制研究[A]. 中国地理学会. 中国地理学会百年庆典学术论文摘要集[C]. 北京: 中国科学院, 2008. (LIANG Liqiao, LI Lijuan. The evapotranspiration and its evolution mechanism of temporal pattern in Zhaoer River basin [A]. The Geographical Society of China. Abstracts of Papers of Geographical Society of China Centennial [C]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2008. (in Chinese))
- [20] Lettenmaier D P. Multivariate nonparametric tests for trend in water quality [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1988,24(3):505–512.
- [21] Dietz E J, Killeen T J. A nonparametric multivariate test for monotone trend with pharmaceutical applications [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1981,76(373):169–174.
- [22] Hirsch R M, Slack J R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence [J]. *Water Resources Research*, 1984,20(6):727–732.
- [23] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. *Water resources research*, 1982,18(1):107–121.
- [24] 石教智,陈晓宏,吴甜. 东江流域降雨径流变化趋势及其原因分析[J]. 水电能源科学, 2005,23(5):8–10. (SHI Jiaozhi, CHEN Xiaohong, WU Tian. Study on rainfall and runoff change tendency and its causes in East River vally [J]. *Water Resources and Power*, 2005,23(5):8–10. (in Chinese))
- [25] 赵文焕,高袁. 金沙江流域径流年代际变化特性分析[J]. 人民长江, 2011,(6):98–100. (ZHAO Wenhuan, GAO Yuan. Analysis on annual and decadal runoff variation characteristics of Jinsha River basin[J]. *Yangtze River*, 2011,(6):98–100. (in Chinese))
- [26] 李春晖,杨志峰. 黄河流域分区天然径流量趋势性与持续性特征[J]. 水文, 2005,25(1):13–17. (LI Chunhui, YANG Zhifeng. Tendency and persistence of natural runoff in the Yellow River basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2005,25 (1):13–17. (in Chinese))
- [27] 陈媛,王顺久,王国庆,等. 金沙江流域径流变化特性分析[J]. 高原山地气象研究, 2010,(2):26–30. (CHEN Yuan, WANG Shunjiu, WANG Guoqing, et al. Runoff variation characteristics analysis on Jinsha River [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2010,(2):26–30. (in Chinese))

Inconsistency Analysis of Spatial and Temporal Evolution of Precipitation and Runoff in Jinshajiang River Basin

ZHANG Hairong^{1,2}, ZHOU Jianzhong^{1,2}, ZENG Xiaofan^{1,2}, YE Lei^{1,2}, MENG Changqing^{1,2}

(1.College of Hydropower & Information Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;2. Hubei Key Laboratory of Digital Valley Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the annual precipitation and runoff data from 1966 to 2010, this paper analyzed the inconsistency of precipitation and runoff in the Jinshajiang River Basin by using univariate Mann-Kendall test and multivariate Mann-Kendall test. The results show that there's an increasing trend in the annual precipitation and runoff in the Jinshajiang River Basin, especially from the 1990s. The precipitation in the middle reaches of the Jinshajiang River Basin shows an obvious upward tendency by passing the MK significance test. The mutation point appears in the precipitation at the Panzhuhua Station, which results in an obvious increase after 1997. There's not any other mutation points in both precipitation and runoff at the other stations. In addition, by passing the multivariate MK significance test, the joint variables of the Longjie Station's precipitation and runoff show a significant increase, while the other stations fail the test.

Key words: Jinshajiang River Basin; multivariate; inconsistency analysis; MK test