

# 香溪河流域近60年来降雨量变化趋势及突变分析

刘惠英<sup>1</sup>, 任洪玉<sup>2</sup>, 张平仓<sup>2</sup>, 鲁向晖<sup>1</sup>, 张昕川<sup>3</sup>

(1. 南昌工程学院, 南昌 330099; 2. 长江科学院水土保持研究所, 武汉 430012; 3. 长江水资源保护科学研究所, 武汉 430000)

**摘要:**为研究香溪河流域多年降雨特征,以流域1952—2011年10个雨量站日降雨资料为基础,得到流域面雨量序列。分别采用线性回归、滑动平均、Mann-Kendall趋势检验、M-K突变检验、Sen's斜率估计和小波分析等方法,对流域60a来降水量的年、季变化趋势和突变进行了检验。结果表明:香溪河流域年降水量以0.66 mm/a速率减少;春、秋季节降水量呈下降趋势,下降速率分别为0.33、0.81 mm/a,冬季降水量轻微下降趋势,夏季降水量呈上升趋势,速率为0.5 mm/a;年均和四季变化均未通过5%的显著性检验。研究时段内,年降水量发生了三次突变,分别在1954年,1989年,2006年。夏季降雨突变发生时间与年突变发生时间一致;春、秋、冬三季降雨在60a内发生突变的时间分散、多变。

**关键词:**香溪河流域;降雨量;趋势分析;突变分析

**中图分类号:**TV125;TV121

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)04-0282-05

## Analysis of Characteristics of Variation and Abrupt Change of Precipitation in Xiangxi River Watershed over the Past 60 Years

LIU Huiying<sup>1</sup>, REN Hongyu<sup>2</sup>, ZHANG Pingcang<sup>2</sup>, LU Xianghui<sup>1</sup>, ZHANG Xinchuan<sup>3</sup>

(1. Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430012, China; 3. Yangtze River Water Resource Protection Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The change trend of precipitation over the past 60 years in the Xiangxi River watershed was investigated using observed time series data from ten available rain gauges. Based on the ways of non-parametric trend test (linear regression, moving average method, Sen's slope estimator and Mann-Kendall trend test), the change trend was analyzed. Mann-Kendall rank statistic test was also used to examine abrupt change for precipitation (using the 5% significance level). The results showed that precipitation had presented the decreasing trend at the rate of 0.66 mm per year in general. The precipitation in spring and autumn presented the decrease trend with the magnitude of 0.33, 0.81 mm per year, respectively; while the summer precipitation increased at the rate of 0.5 mm per year. The obvious abrupt change points of annual and summer precipitation happened in the year of 1954, 1989 and 2006. The abrupt change points in other three reasons are complex.

**Keywords:** Xiangxi River watershed; precipitation; trend analysis; abrupt change analysis

在全球变暖的大背景下,各地的降水等气候要素发生了显著的变化。相对于全球气温的持续升高,降水量的变化和区域分布有很大的不确定性,不同区域的降水特征亦有不同。研究区域降水的变化,能更准确地揭示气候变化对区域降水的影响<sup>[1]</sup>。近几十年来,因旱涝灾害造成的损失和影响也越来越严重,灾害不仅直接导致农业减产,而且其持续累积会使土地资源退化、水资源耗竭、生态环境受到破坏,制约可持续发展<sup>[2]</sup>。

三峡工程自2003年6月蓄水以来,通过跟踪监测

分析,发现库区水质总体良好,但香溪河、大宁河等部分支流库湾回水区段出现了春季藻华,引起了各方关注<sup>[3-5]</sup>。三峡库区支流面积约为水库总面积的三分之一,支流库湾水体水质变化对库区水体环境将产生直接的影响。因此,进行库区流域雨量变化趋势及突变性分析,对了解长江上游山地气候变化、揭示降水的历史演变规律及区域气候具有重要意义。能为进一步探讨长江流域水文气候变化特征及演变规律奠定基础,为长江流域水资源综合利用提供参考依据。

收稿日期:2014-07-23

修回日期:2014-09-09

资助项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201301059);江西省土壤侵蚀与防治重点实验室开放基金(JXSB201303);江西省自然科学基金(20132BAB203032)

第一作者:刘惠英(1973—),女,陕西凤翔人,讲师,在读博士,主要从事坡面土壤侵蚀和流域水体监测方面研究。E-mail:jlfx7401@163.com

通信作者:张平仓(1961—),男,陕西渭南人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀方面研究。E-mail:zhangpc@mail.crsri.cn

## 1 区域概况

香溪河流域地处长江流域上游,发源于神农架南麓,系长江三峡大坝坝前第一条支流<sup>[6]</sup>,位于湖北省西北部,流域总面积 3 183 km<sup>2</sup>,自然落差 1 540 m,兴山站多年平均流量为 36.76 m<sup>3</sup>/s。兴山境内流长 78 km,秭归境内流 11.1 km,为峡谷型河流<sup>[7]</sup>。三条主要支流为古夫河、高岚河以及九冲河。香溪河有东西两个源头:东源于神农架林区螺马店,为东河;西源于大神农架山南的红河,为西河。东西两河流至响淮相汇为香溪河,由北向南纵贯兴山县全境,至游家河入秭归县后又汇屈平河之水,于香溪镇东注入长江,汇长江之水流入西陵峡,下泄至三峡大坝。

流域内有三峡水文分区 1 000~3 000 km<sup>2</sup> 区域代表站兴山水文站,该站降雨监测目前现存完整资料始于 1935 年,连续观测日降雨量始于 1951 年 12 月;径流监测始于 1958 年。测站位于香溪河畔的兴山县高阳镇,地理位置:东经 110°45′,北纬 31°13′,属二类精度国家重要站。

## 2 资料和方法

### 2.1 数据来源

本文所用 1952—2010 年降水数据来自长江水利委员会编撰的水文年鉴。雨量资料包括兴山站(1952—2011 年)、水果园站(1970—2011 年)、中阳垭站(1977—2011 年)、郑家坪站(1960—2011 年)、红花站(1976—2011 年)、九冲站(1960—2011 年)、南阳河站(1961—2011 年)、青山站(1970—2001 年)、水月寺站(1965—2011 年)、峡口站(1961—2011 年)、张官店站(2002—2011 年)的逐日实测雨量。青山站从 2002 年后停测,用邻近的张官店站代替。对原始降水数据进行处理,组成以 4—9 月为丰水期、10 月到次年 3 月为枯水期、3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月至次年 2 月为冬季的降水序列,分别对其平均值、最大值、最小值、变差系数等进行统计分析,得到流域面雨量特征量<sup>[8]</sup>。

### 2.2 数据处理方法

2.2.1 面雨量 流域面雨量的计算用泰森多边形法在 ArcGIS 10.0 平台下计算。由于兴山站建站时间早于其它气象站,为了得到与兴山站相同时间序列的降水数据,1952—1960 年缺测的数据以兴山站数据为基础直接进行线性回归插补;其余时段缺测数据按照站点邻近原则和站间雨量相关性大小采用多元线性回归进行插补。对插补数据进行一致性检验后最终确定水果园、中阳垭、郑家坪、红花、九冲、南阳河、青山站、水月寺和峡口 1952—2011 年的降水序列,进

而计算流域面雨量。

2.2.2 趋势分析方法 趋势分析分别采用线性回归和 Mann-Kendall 趋势检验两种方法。线性回归是一种最简单的表示趋势变化的方法。Mann-Kendall 趋势检验法<sup>[9-12]</sup>是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,适用于类型变量和顺序变量。被广泛应用于水文和气象要素时间序列的趋势变化。Mann-Kendall 在研究突变时不仅能明确突变发生的时间,还能检测突变发生的区域。

2.2.3 Sen's 斜率估计 对于时间序列  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,通过计算倾斜度指标  $\beta$ ,得到单调趋势度量因子。通过下式计算得到:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right) \quad 1 < j < i < n \quad (1)$$

式中:Median——中位数函数。 $\beta > 0$  表示趋势上升,即变量随时间增大; $\beta < 0$  表示趋势下降,变量随时间下降<sup>[6,13]</sup>。

2.2.4 周期分析 小波函数是指具有震荡特性、且能够迅速衰减到零的一类函数,目前有很多小波函数可以选用,本文选用 Morlet 小波进行小波分析。通过计算不同时间尺度下的小波系数反映系统在该时间尺度下的变化特征。通过对小波系数进行分析,可以识别年降雨量时间序列的多时间尺度周期性和突变性<sup>[14-16]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 流域降雨量基本特征

香溪河流域属亚热带大陆性季风气候。春季雨水颇丰;夏季炎热雨量集中;秋季多阴雨,冬季多雨雪,多年降雨特征见表 1。流域多年平均面雨量为 1 052.43 mm,但降雨年际变化很大,在统计时限内最大和最小年降雨量比值达 2.23;降雨的 76.3%集中在丰水期,夏季降雨占了全年的 44%。

冬季降雨变化剧烈,变差系数为 0.49,冬季降雨变幅很大,最大降雨和最小降雨比值达 6.96;秋季变差系数次之,为 0.32,春夏两季降雨变差系数相对较小。最大月降水出现在 7 月,占全年降水量 15.65%,最小降水量出现在 1 月,占全年降水量的 1.8%。上述特征均表明该区域是一个旱、涝灾害频发的区域。

### 3.2 流域降雨量年代际特征

表 2 给出了流域 60 a 来面雨量变化的年代特征。总体看来,面雨量呈现一种波动性。1982—1991 年为降雨最多的时段,达到了 1 149.43 mm/a,时段夏季模比值更是达到了 1.17。1992—2001 年是最少的时段,只有 916.19 mm/a,同时发现这个时段的春、夏、秋三季降雨也是 60 a 中降雨最少的时段,但冬季降雨和别的时段相比却较多,模比达到 1.16。冬季模比虽然大于 1,但因冬季降雨在全年中所占比重最小(见表 1),年值所代表的时段仍然为降雨最小时段。

从各时段的模比值还可发现,春、夏、秋三季模比变化不大,但冬季变化最大,最小为 0.75,最大为 1.19,是所有模比值中的极值。此结果和前文多年平均冬季降雨的变差系数最大是一致的。

表 1 香溪河流域 1952—2011 年降雨量变化特征

特征值	全年	丰水期	枯水期	春季	夏季	秋季	冬季
多年均值/mm	1052.43	803.01	249.43	277.06	462.11	242.92	70.34
占百分比/%	—	76.30	23.70	26.33	43.91	23.08	6.68
变差系数	0.17	0.21	0.28	0.25	0.28	0.32	0.49
最大值/mm	1525.25	1240.55	423.67	437.51	746.28	533.45	169.36
最小值/mm	685.30	442.16	105.34	142.90	212.48	92.12	24.32

表 2 香溪河流域 1952—2011 年面雨量年代变化特征

时段	年值		春季		夏季		秋季		冬季	
	均值	模比	均值	模比	均值	模比	均值	模比	均值	模比
1952—1961	1035.28	0.98	283.37	1.02	444.21	0.96	223.76	0.92	83.94	1.19
1962—1971	1080.03	1.03	289.64	1.05	448.03	0.97	278.98	1.15	63.39	0.90
1972—1981	1053.36	1.00	294.98	1.06	442.35	0.96	263.20	1.08	52.84	0.75
1982—1991	1149.43	1.09	261.24	0.94	540.86	1.17	270.33	1.11	77.00	1.09
1992—2001	916.19	0.87	231.71	0.84	393.83	0.85	209.20	0.86	81.45	1.16
2002—2011	1080.30	1.03	301.42	1.09	503.37	1.09	212.08	0.87	63.44	0.90

注:模比值=年段均值/多年均值。

3.3 流域年降雨量变化趋势

对 1952—2011 年香溪河流域年面雨量序列,分别采用 M-K 趋势检验、Sen’s 斜率估计和线性回归三种方法计算流域各时段的统计值  $Z, \beta, b$ ,并取 95%置信度进行显著性检验,结果见表 3。表明,三种方法均表明香溪河流域年降水量呈减少趋势,降水量多年平均减少幅度为 0.6~0.7 mm/a,但都没有通过显著性水平  $\alpha=0.05$  的检验。说明流域年降雨虽然总体趋势在减少,但是并不显著。

不管是线性回归还是 5 a 滑动平均,年降雨量都呈现下降趋势,这和 M-K 趋势统计值的结果一致(图 1a)。从 5 a 滑动平均图上发现,降雨量有几次明显的上升过程:1966—1969 年,1976—1982 年,1999—2002 年;下降过程:1956—1959 年,1969—1976 年,1987—1993 年,2002—2006 年;其中 1967—1971 年的 5 a 平均降雨量最大,为 1286.35 mm,1997—2001 年 5 a 平均降雨量最少,为 969.31 mm。流域年降水量总体减少趋势下,变化呈波动性。

表 3 香溪河流域面雨量 3 种趋势分析方法统计参数

时段	$Z$	$\beta/$ (mm·a <sup>-1</sup> )	$b/$ (mm·a <sup>-1</sup> )	显著性	趋势
年均	-0.62	-0.63	-0.66	不显著	↓
春季	-1.09	-0.53	-0.33	不显著	↓
夏季	0.67	0.48	0.56	不显著	↑
秋季	-1.65	-0.72	-0.81	不显著	↓
冬季	0.35	0.08	-0.08	不显著	↑

3.4 季降雨趋势变化

根据流域气候特征进行四季划分后,用 M-K 检验法<sup>[9-12]</sup>得出的流域季降水量的统计值见表 3。发现:春、秋季节的  $Z$  值为负值,表明这两个季节流域

降水量呈下降趋势;夏、冬两季  $Z$  值接近为正,这两季多年来降雨为上升态势。因各季统计值  $Z$  的绝对值均小于 1.96,表明变化降趋势不显著。

(1) 春季降水量呈下降趋势,降水量减少幅度为 0.33 mm/a。春季平均降水量为 277.06 mm,年最大降水 437.51 mm(1959 年),最小降水为 142.90 mm(2000 年)。对于 5 a 滑动平均值来说,1966—1970 年的春季平均降水量最大(333.19 mm),1997—2001 年的春季平均降水量最小(210.27 mm)(图 1b)。

(2) 夏季降水量呈增加态势。线形趋势和 Sen’s 斜率估计值都在 0.5 mm/a 左右。5 a 滑动平均图显示 1980—1984 年是夏季降雨最多的 5 a,1973—1977 年是夏季降雨最小的 5 a。1978—1984 年是一个降雨明显增加的时段,而 1985—1992 年是降雨明显减小时段(图 1c)。

(3) 秋季降水在四季中下降趋势最明显,减少速率为 0.81 mm/a,从 20 世纪 80 年代开始至今降水量一直呈下降趋势,并且 20 世纪 80 年代的下降最为明显。从 1988 年开始年降雨低于多年秋季均值(图 1d)。

(4) 冬季降水量变化最小,变化趋势基本水平。但冬季降雨量年际变化大,在整个 60 a 中呈现明显的“两谷一峰”。但是线形趋势分析和 Sen’s 斜率估计值两种方法得到的年变化趋势不同(图 1e)。

3.5 降雨量突变分析

3.5.1 年突变 从 M-K 突变分析图上  $UF_k$  和  $UB_k$  的交点(图 2)表明年降雨量在 1954 年,1989 年,2006 年发生了突变,但因在临界值范围以内<sup>[9]</sup>突变并不显著。1989 年的突变也可以从 5 a 滑动平均图上看到。流域年降雨的稳定上升态势从 1970 年开始一直持续

到 1996 年,而后开始下降,1996 年是上升转为下降的趋势转折点;1996 年至今降雨量一直呈下降趋势。

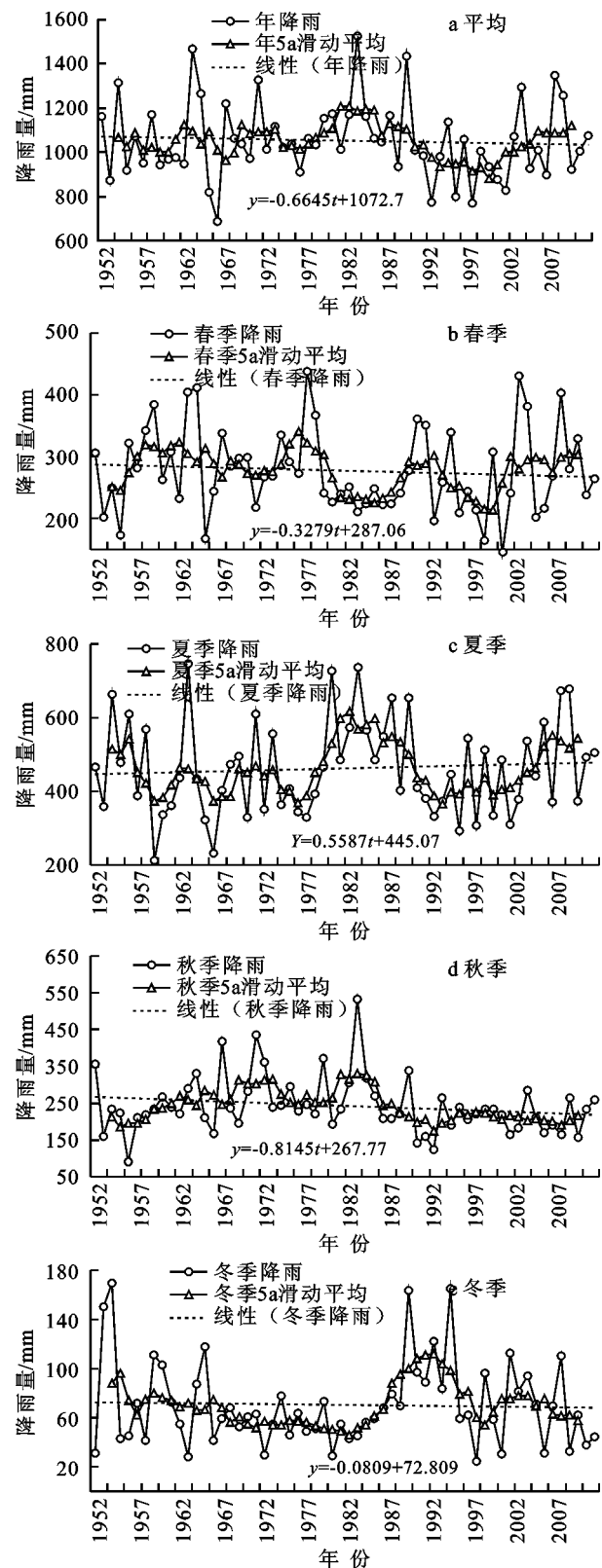


图 1 香溪河流域降水趋势分析

3.5.2 季降雨量突变分析 (1) 春季降水量在 1955 年、1979 年、2007 年发生了突变,从 1956 年开始一直到 1981 年春季降雨处于上升趋势,从 1982 年开始至今又逐步下降(图 2b)。

(2) 夏季降水量在 60 a 间共发生了 4 次的突变: 1954 年,1978 年,1989 年,2006 年。1957—1980 年呈下降趋势,1982—1997 年一直处于上升趋势,2000 年后至今是先下降后上升趋势,以 2005 年为界(图 2c)。

(3) 秋季降水量突变发生在 1990 年,1992 年,1995 年。1955—1975 年的降水量统计值均超过了临界线,说明此时段秋季降水量增加趋势显著,从 1960 年开始到 1990 年秋季降水一直呈上升趋势,1993 年之后下降趋势越来越明显(图 2d)。

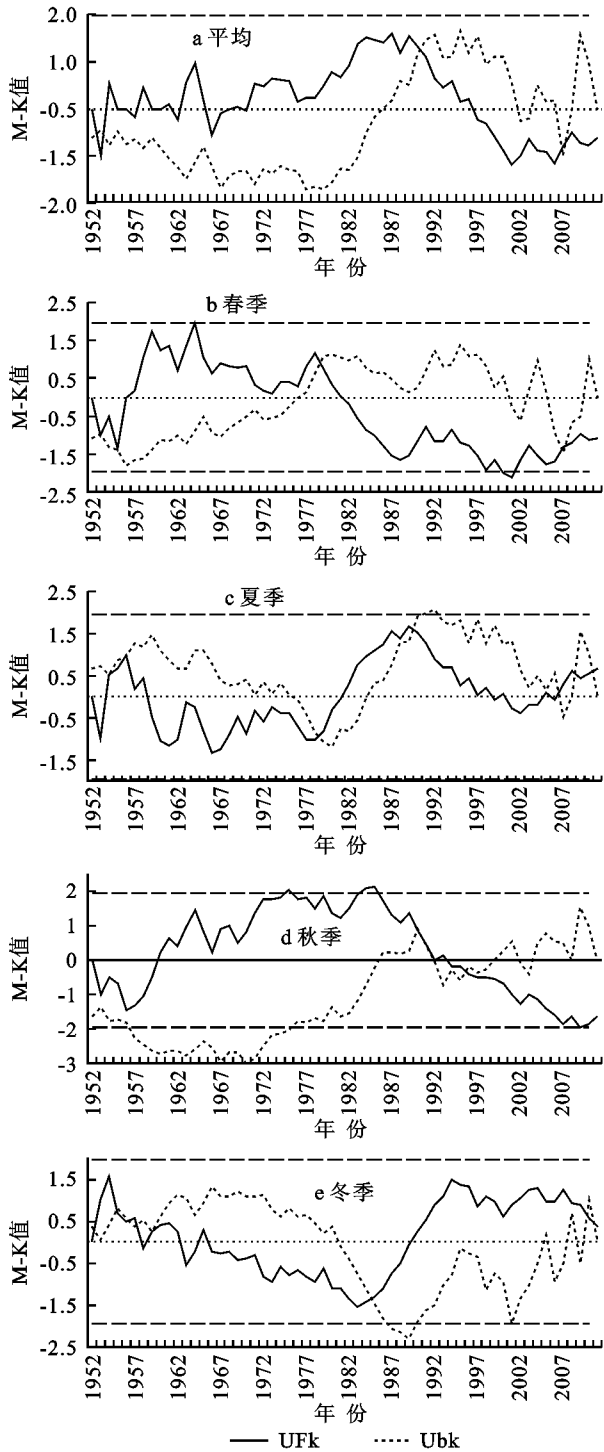


图 2 香溪河流域降水量突变点检验分析

(4) 冬季突变发生在 1958 年, 1984 年, 2009 年。总趋势为 1965—1989 年呈减小, 从 1990 年至今为增大趋势(图 2e)。

### 3.6 降水量的周期分析

选用 Morlet 复小波对流域 1952—2011 年降水量序列实行一维连续小波变换, 并绘制小波方差图(图 3)。由图 3 分析表明, 香溪河流域近 60 a 降水量具有显著的周期性变化, 第 1、2 周期相同, 分别是 41 a, 25 a, 即香溪河流域降水存在 41 a, 25 a 的变化周期(图 2e)。

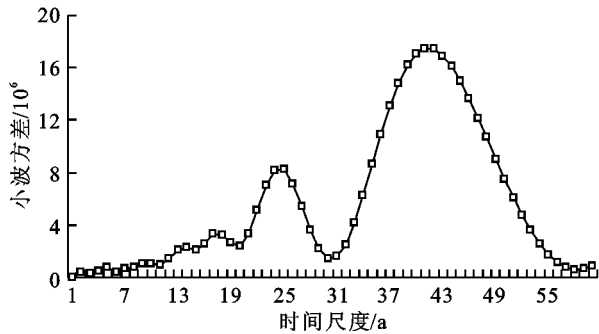


图3 香溪河流域 1952—2011 年流域年降水量小波方差

## 4 结论

(1) 60 a 来流域年均降雨量为 1052.43 mm, 流域降雨以 0.66 mm/a 减少。年降水的 44% 集中在夏季, 冬季只占 6.68%, 变差系数以冬季最高达 0.49, 秋、夏、春季依次减小。年降水总量和春、秋、冬三季降雨量均呈减小趋势, 但变化不显著; 只有夏季降雨呈增加趋势。

(2) 年降雨 3 次突变发生的时间和夏季降雨突变时间发生一致, 并且两者变化趋势一样, 表明夏季降雨决定了全年降雨的特征; 春秋两季降雨在 60 a 内都呈现先增后减的趋势, 发生突变的时间分散、多变; 冬季降雨突变频繁, 有明显的“两峰一谷”存在。降水要素所表现出来的变化特征是单纯的气象水文周期性的表现, 还是由于气候变化的影响, 尚有待深入研究。

(3) 年降雨量和各季降雨量变化虽不显著, 但多年变差系数较大, 降雨年内和年际分布不均, 流域是在 7—9 月用水高峰时段可利用水资源量相对减少, 加剧供水用水矛盾, 导致该流域旱、涝灾害发生机率增大, 给流域内的水利工程的调度和用水企业用水增加了难度。因此实施科学水量调度, 合理配置流域水资源在空间和时间分布, 提高水资源利用率, 是解决流域用水的根本方法。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Impacts, adaptation, and vulnerability: Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA, Climate Change, 2001.
- [2] 商彦蕊. 农业旱灾研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(4): 101-105.
- [3] 欧阳丽, 诸葛亦斯, 刘德富. 三峡水库香溪河库湾水环境容量研究[J]. 人民长江, 2008, 39(20): 12-14.
- [4] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 等. 香溪河流域水体环境因子研究[J]. 生态科学, 2007, 26(3): 199-207.
- [5] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生生态研究的进展与展望[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 169-177.
- [6] 张革, 刘德富, 宋林旭等. 香溪河流域降雨侵蚀力特征及简易算法初步研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 7-12.
- [7] 刘惠英, 丁文峰, 张平仓. 香溪河流域 1965—2010 年径流的变化趋势及突变分析[J]. 长江科学院院报学, 2014, 31(4): 12-16.
- [8] 邱临静, 郑粉莉, 尹润生. 1952—2008 年延河流域降水与径流的变化趋势分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 49-54.
- [9] 魏凤英编著. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [10] Yue S, Hashino M. Long term trends of annual and monthly precipitation in Japan [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(3): 587-596.
- [11] Tabari H, Hosseinzadeh Talaei P. Temporal variability of precipitation over Iran: 1966—2005 [J]. Journal of Hydrology, 2011, 396: 313-320.
- [12] Milan Gocic, Slavisa Trajkovic. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia [J]. Global and Planetary Change, 2013, 100: 172-182.
- [13] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation [J]. Journal of Hydrology 2003, 279(2/3): 144-150.
- [14] 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.
- [15] 段文明, 穆兴民, 高鹏, 等. 嘉陵江流域近 50a 降水量演变规律分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 97-101.
- [16] 熊亚兰, 王昌全, 张科利, 等. 北盘江流域降雨量和径流量年际变化研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 30-34.