

# 四川盆地降水量变化特征分析

奚圆圆<sup>b</sup>, 黄晓荣<sup>a,b</sup>, 李晶晶<sup>b</sup>, 高蔺云<sup>b</sup>, 马凯<sup>b</sup>

(四川大学 a.水力学与山区河流开发保护国家重点实验室; b.水利水电学院,成都 610065)

**摘要:**基于四川盆地内8个雨量站1954—2010年的月降水资料,运用降水集度、线性回归分析、滑动平均法、距平百分率、Kendall秩次相关法、小波分析、Mann-Kendall检验法以及滑动 $t$ 检验法,对四川盆地降水量年内分配情况、年和四季降水量变化趋势、周期及突变性进行了分析。结果表明,四川盆地降水量年内分配呈季节性变化;年及四季降水量均呈减少趋势,其中,年和秋季降水量减少趋势在95%置信区间内显著;年、秋季和冬季降水量变化周期较短,均小于10 a;春季和冬季降水量不存在明显的突变点,年和秋季降水量突变开始的时间分别为1985年和1997年,夏季存在2次突变,突变点分别为1979年和1997年。

**关键词:**四川盆地;降水量;趋势;周期;Mann-Kendall检验法

中图分类号: PV426

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.01.017

奚圆圆,黄晓荣,李晶晶,等.四川盆地降水量变化特征分析[J].灌溉排水学报,2017,36(1):95-101.

## 0 引言

全球气候变化改变了降水量的时空分布,降水量的时空变化导致旱涝等极端天气事件频发,进而诱导重大自然灾害的发生,严重制约区域社会经济的可持续发展<sup>[1]</sup>。了解降水量的变化特征对社会经济的发展有重要作用。近年来,许多学者对降水量的变化特征进行了分析。段文军等<sup>[2]</sup>利用漓江流域及周边地区25个降水观测点50 a的月降水资料,分析了漓江流域1960—2010年降水变化规律。曾小凡等<sup>[3]</sup>应用金沙江流域1961—2010年逐日降水资料,分析了金沙江流域降水的时空演变特征。施晨晓等<sup>[4]</sup>利用金沙江流域30个气象站46 a的降水资料,分析了降水量在年和四季中的变化及空间分布特征。陈超等<sup>[5]</sup>利用四川盆地1961—2007年月降水资料,分析了降水量的年际变化趋势;邵远坤等<sup>[6]</sup>利用四川盆地1958—2000年的降水资料,分析了年平均降水量的空间变化、降水异常特征以及暴雨发生频率的特征。在前人研究的基础上,采用四川盆地1954—2010年月降水资料,对年及四季降水量的变化趋势、周期以及突变性做了较全面的分析,应用降水集度法,分析了降水量的年内分配情况以及降水在时间序列上的波动性;应用基于ArcGIS平台的反距离权重空间插值法,绘制了多年平均降水量和降水集度及相应变差系数的空间变化图,使分析结果更准确、更清晰。以期为四川盆地降水量预测提供一定参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

四川盆地山地海拔多在1 000~3 000 m之间。盆地主要城市有中国中央直辖市重庆市以及四川省的成都、绵阳、泸州、南充、自贡、德阳、广元、遂宁、内江、乐山、宜宾、广安、达州、雅安、巴中、峨眉山、资阳等。盆地气候属于亚热带季风性湿润气候,但盆地大部分区域类似于温带海洋性气候。

采用中国气象科学数据共享服务网提供的四川盆地中雅安、峨眉山、宜宾、绵阳、遂宁、广元、巴中及达州8个站点月降水数据,数据时段为1954—2010年,8个气象站的位置分布较为均匀,对于四川盆地降水量

收稿日期:2016-05-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51579161);国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452701)

作者简介:奚圆圆(1991-),女,山东菏泽人。硕士研究生,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: xiyuanyuan526@163.com

通信作者:黄晓荣(1971-),男,重庆人。教授,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: hxiaorong@scu.edu.cn

分布特征具有一定的代表性。经计算,用泰森多边形法和算术平均法计算的四川盆地地面降水量的结果相差不大,兹应用算术平均法计算面降水量。季节的划分方式:3月到5月为春季,6月到8月为夏季,9月到11月为秋季,12月和次年的1月、2月为冬季。根据月降水量计算年和季降水量。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 降水集度

用降水集度表示降水年内分配差异性<sup>[7-8]</sup>。

$$PCI = 100 \sum_{i=1}^{12} p_i^2 / \left[ \sum_{i=1}^{12} p_i \right]^2, \quad (1)$$

式中: $p_i$ 为各站月降水量; $PCI$ 为降水集度。当 $PCI < 10$ 时,降水在年内分配较均衡;当 $10 \leq PCI \leq 20$ 时,降水呈季节性变化;当 $PCI > 20$ 时,降水逐月变化显著。

用降水量的变差系数( $CVR$ )和降水集度的变差系数( $CVPCI$ )反映降水在时间序列上的波动性,变差系数越大,序列变化越剧烈,序列越不稳定<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2.2 线性回归分析

降水量距平的线性回归方程的表达式<sup>[10]</sup>为:

$$P = ct + d, \quad (2)$$

式中: $p$ 为降水量距平; $c$ 为回归系数; $d$ 为常数; $t$ 为时间。当 $c > 0$ 时,降水量呈增加趋势;当 $c < 0$ 时,降水量呈减少趋势。

### 1.2.3 滑动平均法

滑动平均法可以很直观地显示看出序列的变化趋势<sup>[11]</sup>,其表达式为:

$$\hat{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i+j-1}, \quad j=1, 2, \dots, n-k+1, \quad (3)$$

式中: $k$ 为滑动长度; $n$ 为序列长度。

滑动平均的作用是消弱短于滑动长度的周期,使变化趋势更显著。但滑动平均后,新序列比原序列要短,导致二端的信息不能体现<sup>[1]</sup>。

### 1.2.4 距平百分率

通常用降水距平百分率反映某一年降水量偏离多年平均状态的程度<sup>[1]</sup>。距平百分率( $P_r$ )计算公式:

$$P_r = \frac{P_i - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中: $P_i$ 为第 $i$ 年的降水量(mm); $\bar{P}$ 为多年平均降水量(mm)。

可根据降水距平百分率划分年型,其划分标准为:当 $P_r > 25\%$ 时,为丰水年;当 $10\% < P_r \leq 25\%$ 时,为偏丰水年;当 $-10\% \leq P_r \leq 10\%$ 时,为平水年;当 $-25\% \leq P_r < -10\%$ 时,为偏枯水年;当 $P_r < -25\%$ 时,为枯水年。

### 1.2.5 Kendall 秩次相关法

$x_1, x_2, \dots, x_n$ 表示样本容量为 $n$ 的时间序列的变量,定义统计量 $s$ ,建立公式<sup>[12]</sup>,即:

$$s = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(x_k - x_j), \quad (5)$$

$$\text{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & x_k - x_j > 0 \\ 0 & x_k - x_j = 0 \\ -1 & x_k - x_j < 0 \end{cases}$$

式中: $x_k, x_j$ 分别是时间序列在 $k, j$ 时的序列值, $k > j$ 。

定义正态分布统计量<sup>[13]</sup>,即:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & s < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $\text{Var}(s)$ 为方差。对于给定的显著性水平 $\alpha$ ,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ ,表示时间序列在显著性水平 $\alpha$ 上有明显的上

升或下降趋势;反之不存在趋势。

### 1.2.6 小波分析

小波分析就是用基函数表示或逼近某一函数,基函数通常是具有震荡性并能够迅速衰减到0的一类函数<sup>[14]</sup>。基函数  $\Psi(t) \in L^2(R)$  且满足  $\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0$ 。

由  $\Psi(t)$  的伸缩和平移构成一簇函数系<sup>[15]</sup>,即:

$$\Psi(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left[\frac{t-b}{a}\right] \quad b \in R, a \in R, a \neq 0, \quad (7)$$

式中:  $\Psi(t)$  为子小波;  $a$  为尺度因子或称频率因子,反映小波周期长度;  $b$  为时间因子或平移因子,反映时间上的平移。

小波方差计算公式<sup>[16]</sup>为:

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

### 1.2.7 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法是一种对样本分布要求较低的非参数统计检验方法,此方法不会受少数异常值的干扰。

构造秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=1, 2, 3, \dots, n), \quad (9)$$

其中  $r_i = \begin{cases} +1 & \text{当 } x_i > x_j \quad (j=1, 2, 3, \dots, i) \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$ 。

$s_k$  的均值 ( $E$ ) 与方差 ( $Var$ ) 分别为:

$$E = k(k-1)/4, \quad (10)$$

$$\text{Var} = k(k-1)(2k+5)/72. \quad (11)$$

定义统计量 ( $UF$ ):

$$UF = \frac{[s_k - E]}{\sqrt{\text{Var}}} \quad (k=1, 2, \dots, n). \quad (12)$$

统计量  $UB$  可根据时间序列  $x$  的逆序计算得出,绘制  $UF$  和  $UB$  曲线。如果  $UF$  和  $UB$  二条曲线在临界线之间出现交点,那么交点所对应的时刻便是突变开始的时刻<sup>[17]</sup>。采用 0.05 显著性水平,其临界值为  $\pm 1.96$ 。

### 1.2.8 滑动 $t$ 检验法

滑动  $t$  检验法是一种检验序列突变性的方法,是按某一基准点  $t$  将序列分为基准点前和基准点后 2 个子序列。计算统计量<sup>[11-18]</sup>,即:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \quad (13)$$

$$s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}, \quad (14)$$

式中:  $n_1$  和  $n_2$  分别为 2 子序列长度;  $\bar{x}_1$  和  $\bar{x}_2$  分别为 2 子序列的均值;  $s_1^2$  和  $s_2^2$  分别为 2 子序列的方差。

## 2 结果与分析

### 2.1 降水空间变化

用降水集度法分析四川盆地降水系列,并应用基于 ArcGIS 平台的反距离权重空间插值法绘制相关参数的空间分布图(图 1)。1954—2010 年,四川盆地平均年降水量 1 214.3 mm,由图 1(a)可以看出,绵阳、遂宁一带形成降水量最低极值区,降水量由此向西南方向呈递增趋势,至峨眉山地区,年降水量高达 1 790 mm。由  $CVR$  分布图(图 1(b))可知,各地降水年际间变化程度不大,变幅为 17%~26%,绵阳地区相对较高为 26%。由图 1(c)可知,降水集度的空间分布差异较明显,西部地区降水集度相对较大,东部地区相对较小,整个四

川盆地降水集度变化范围为12~16。因此,四川盆地年内降水分布呈季节性变化( $11 < PCI < 20$ )。年际间降水各月分配差异的变化小于降水量的年际变化(图1(d)),变幅为14%~22%,这可能是由于一个地区的气候变化是一个长期的过程,已形成的规律如果要发生变化也要很长的时间才能表现出来。降水集度变化率空间变化与降水集度空间变化类似,西部变幅大,东部变幅小,绵阳、广元地区形成最高极值区。

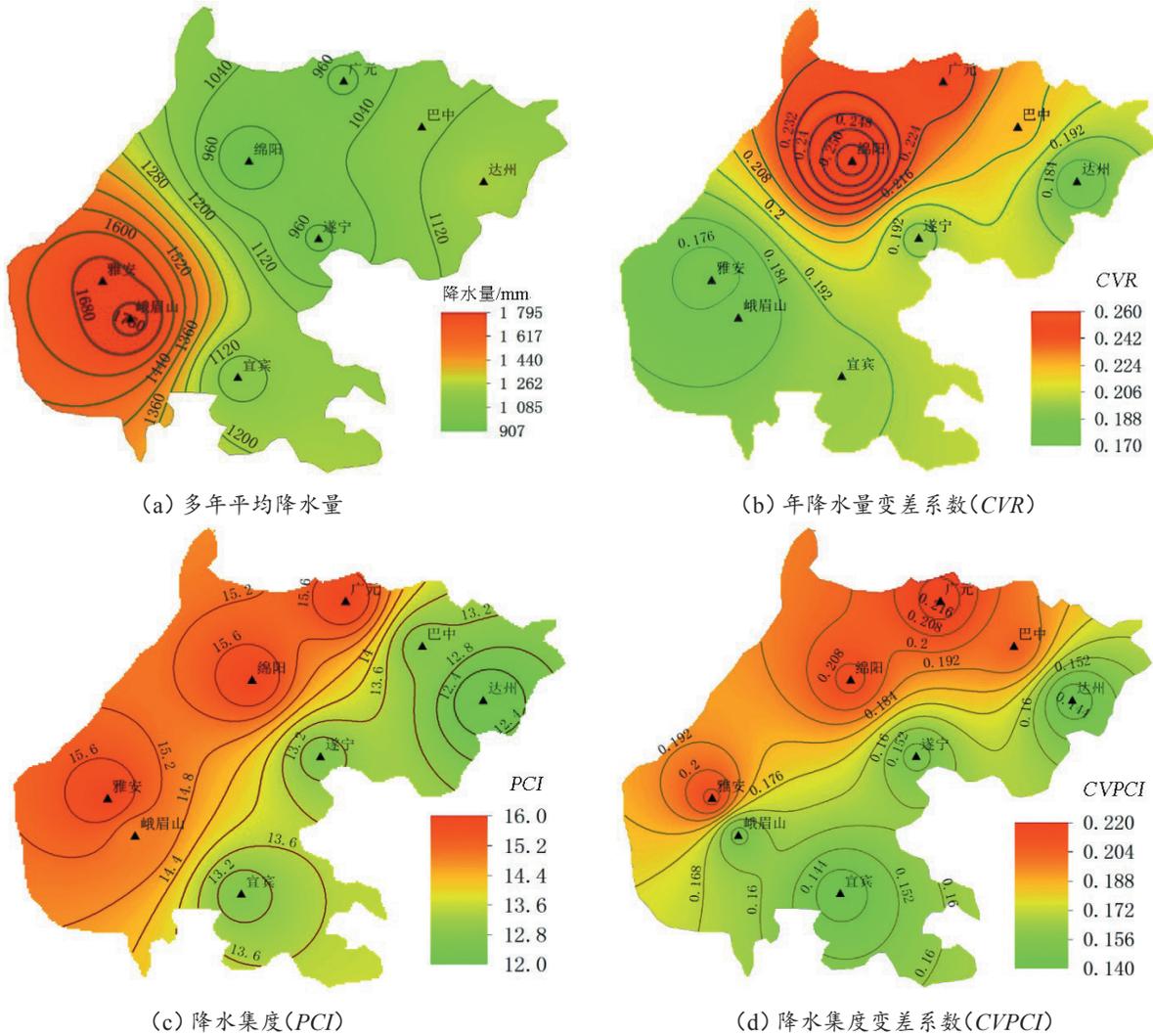


图1 四川盆地降水特征参数等值线

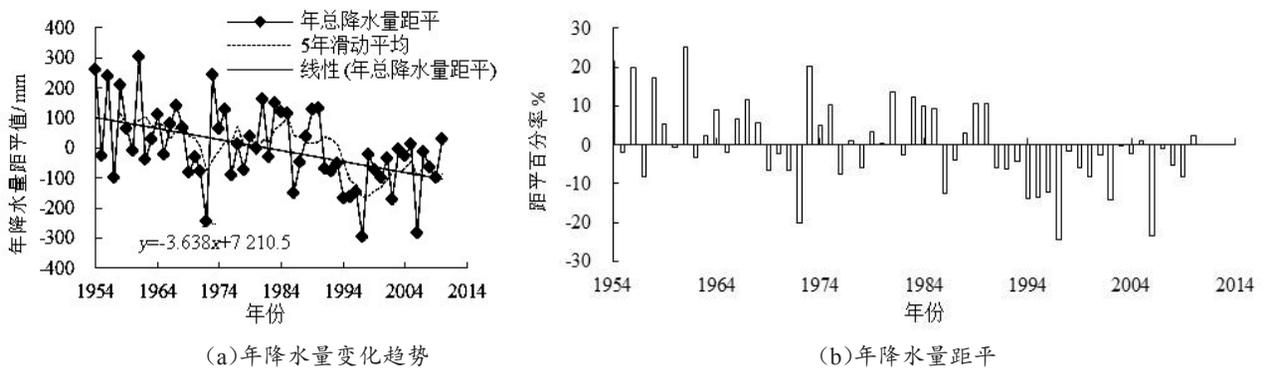


图2 四川盆地年降水量变化

## 2.2 降水在时间上的变化趋势

### 2.2.1 年降水量变化情况

由图2(a)可知,1954—2010年,四川盆地年降水量呈递减趋势,平均每10 a减少36.38 mm。多年平均降水量为1 214 mm,低于平均值年份有32 a,占总年数的56%。由表1可知,年降水量的Z值为-3.13,则年

降水量在95%置信区间内减少趋势显著。只有达县站年降水量的Z值大于0(即年降水量呈增加趋势),其他站年降水量的Z值均小于0(即年降水量呈减少趋势),其中绵阳、宜宾和峨眉山站年降水量减少趋势在95%置信区间内显著。图2(b)显示,1990年以前四川盆地年降水量有一定波动,1990年以后有90%的年份距平值为负值,说明1990年后降水量偏少。距平百分率介于-25%~25%,说明降水量主要在偏枯、平水和偏丰之间变化。

表1 各站降水量的Z值

时段	绵阳	宜宾	广元	达县	遂宁	峨眉山	雅安	巴中	平均
年	-2.18	-3.85	-1.43	0.68	-0.96	-4.10	-1.60	-0.41	-3.13
春季	-0.87	-2.35	-0.70	1.54	-1.70	-1.16	-0.06	-0.46	-1.18
夏季	-2.13	-2.55	-0.80	1.54	0.87	-2.77	-0.85	0.94	-1.48
秋季	-0.36	-2.48	0.45	-1.18	-3.45	-3.00	-1.62	-1.95	-2.47
冬季	0.10	-2.09	-1.25	1.31	-1.22	-2.84	-0.23	1.42	-0.65

### 2.2.2 季降水量变化情况

由图3及表1可知,四川盆地四季降水量均呈下降趋势,且秋季降水量下降趋势在95%置信区间内显著。春季、夏季、秋季、冬季降水量下降值分别为3.48、18.69、13.38、0.94 mm/10 a。各站点中只有绵阳站的冬季、广元站的秋季、达县站的春季、夏季和冬季、遂宁站的夏季、巴中站的夏季和冬季降水量的Z值为正值,即降水量呈增加趋势,但增加趋势在95%置信区间内并不显著。其他降水量的Z值均为负值,即降水量呈减少趋势,且绵阳站的夏季、宜宾站的四季、遂宁站的秋季、峨眉山站的夏季、秋季和冬季降水量减少趋势在95%置信区间内显著。由季降水量距平曲线可知,距平值为负的年份占总年份的比例分别为:春季59.6%、夏季49.1%、秋季56.1%、冬季49.1%。春季距平值为负的年份占总年份的比例最高,但其趋势线斜率及降水量的Z值的绝对值却小于夏季和秋季,说明春季与夏季和秋季相比其相对较小的负距平值较多。从5 a滑动距平曲线可以看出,四季降水量都存在一定的波动性,春季波动相对较小。

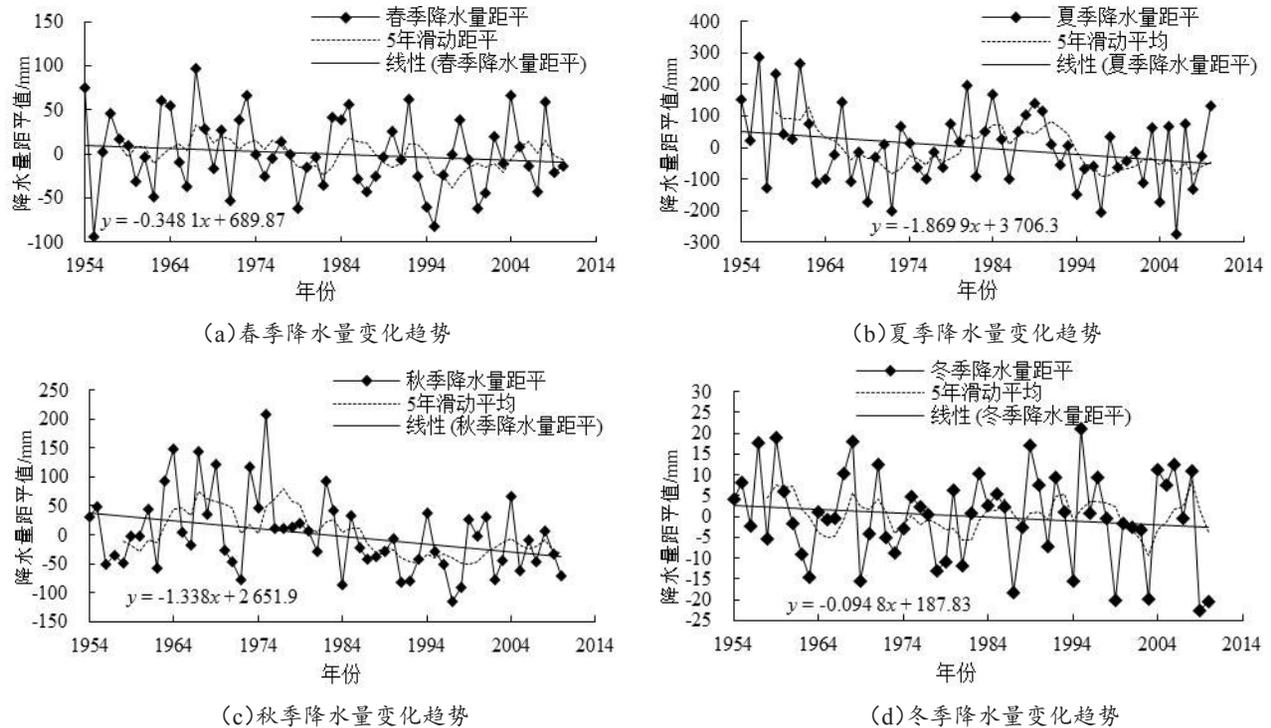


图3 四川盆地季降水量变化趋势

### 2.3 降水周期及突变性分析

采用小波分析法和方差外推法对四川盆地年和四季的降水周期进行分析,其结果见表2。由表2可知,2种方法计算结果相差不大,可以认为年降水量存在5~7 a的周期,春季和夏季降水量周期较长,分别为20 a和28~32 a,秋季降水量周期较短,为3~6 a,冬季降水量周期为10 a。

由图4(a)可知,1954—2010年,年降水量UF曲线均位于0刻线以下,且1990年后急剧下降,在1995年

以后低于临界线,说明年降水量呈下降趋势,这与年降水量趋势分析一致,且于1995年后在95%置信区间内下降趋势显著。年降水量 $UF$ 和 $UB$ 曲线相交于1985年,即1985年为年降水量突变点。从图4(b)可知, $UF$ 曲线在1954—

表2 周期统计表 a

计算方法	年	春季	夏季	秋季	冬季
小波分析	7	20	32	6	10
方差外推	5	20	28	3	10

2010年基本均位于0刻线以下,且未超过临界线,这与趋势分析中春季降水量呈下降趋势但下降趋势在95%置信区间内并不显著以及春季降水量5年滑动距平曲线相对较平缓一致。春季降水量 $UF$ 和 $UB$ 曲线相交于1955、1960、1962、1965、1971及1973年,由于1962年以前系列较短参考性不强,因此用滑动 $t$ 检验法计算1965、1971、1973年 $t$ 值,取 $n_1=n_2=10$ , $t$ 绝对值分别为0.50、0.75和1.55均小于2.10,则春季降水量不存在明显突变点。由图4(c)可知,夏季降水量在1972年和1977年下降趋势在95%置信区间内显著,突变开始的时间可能为1979年和1990年。经计算1979和1990年的 $t$ 绝对值为2.57和2.79均大于2.10,则夏季降水量经历了2次突变,突变点分别为1979和1990年。秋季降水量的 $UF$ 和 $UB$ 曲线相交于1986年(图4(d)),则秋季降水量突变时间为1986年。 $UF$ 曲线于1997年后低于临界值-1.96,则1997年后秋季降水量下降趋势在95%置信区间内显著。由图4(e)可知,冬季降水量可能存在的突变点为1968、1981、1987、1996和2002年,经计算 $t$ 绝对值分别为0.79、0.74、1.05、0.38和0.27,均小于2.10,即冬季降水量不存在明显突变点。

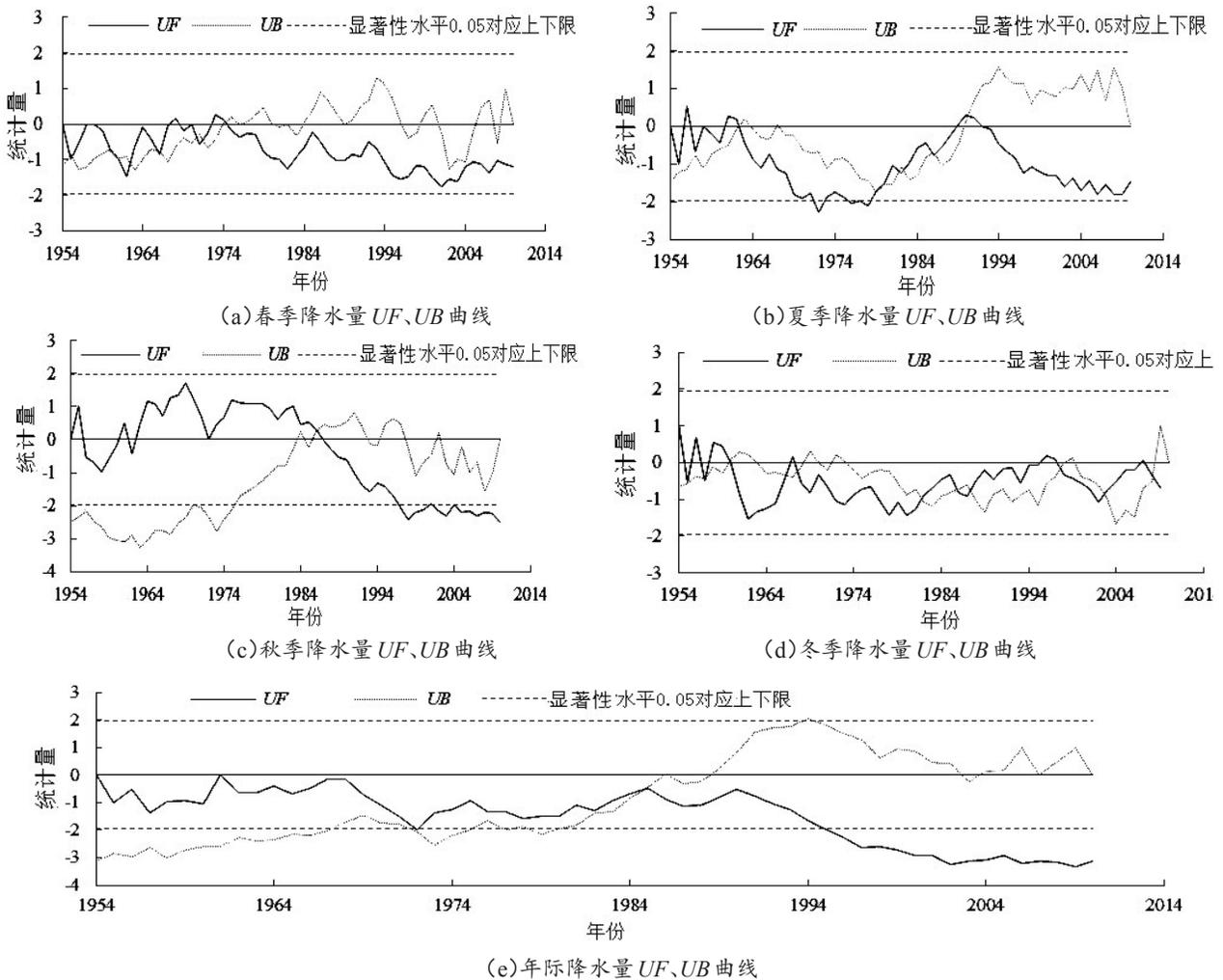


图4 四川盆地降水量M-K检验方法统计变化图

### 3 结论

1)四川盆地多年平均降水量在空间分布上南多北少,年际间变化不大,但南部小于北部。年内降水分布较均匀( $PCI < 20$ ),年际间降水各月分配差异不大。

2)1954—2010年四川盆地年及四季降水量均呈下降趋势,其中,年和秋季降水量下降趋势在95%置信区间内显著。各站点中绵阳站的年和夏季、宜宾站的年和四季、遂宁站的秋季、峨眉山站的年、夏季、秋季和

冬季降水量在95%置信区间内下降趋势显著。

3)四川盆地年、秋季和冬季降水量变化周期较短,均低于10 a,春季和夏季降水量变化周期较长分别为20 a和28~32 a。

4)年降水量突变开始的时间为1985年,春季和冬季降水量不存在明显的突变时间,夏季降水量经历了2次突变,突变开始的时间分别为1979年和1990年,秋季降水量突变开始的时间为1997年。

#### 参考文献:

- [1] 肖鹏嵩,代俊峰,王娜. 广西降雨量变化趋势分析[J]. 节水灌溉, 2013(2):38-40.
- [2] 段文军,王金叶,张立杰,等. 1960~2010年漓江流域降水变化特征研究[J]. 水文, 2014, 34(5):88-93.
- [3] 曾小凡,叶磊,翟建青,等. 1961~2010年金沙江流域降水时空演变特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3):402-407.
- [4] 施晨晓,韩琳. 金沙江流域年与季气候特征统计分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2014, 29(4):424-433.
- [5] 陈超,庞艳梅,张玉芳. 近50年来四川盆地气候变化特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(9):115-120.
- [6] 邵远坤,沈桐立,游泳,等. 四川盆地近40年来的降水特征分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2005, 27(6):749-752.
- [7] LUÍS M D, RAVENTÓS J, GONZÁLEZ-HIDALGO J C, et al. Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia (east Spain)[J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(12):1 451-1 469.
- [8] 徐利岗,周宏飞,梁川,等. 中国北方荒漠区降水多时间尺度变异性研究[J]. 水利学报, 2009, 40(8):1 002-1 011.
- [9] 段亚雯,朱克云,马柱国,等. 中国区域1961~2010年降水集中指数(PCI)的变化及月分配特征[J]. 大气科学, 2014, 38(6):1 124-1 136.
- [10] 刘和平,王秀颖,梁凤国,等. 辽西北地区45年来降水量变化趋势及其空间差异[J]. 水电能源科学, 2014(3):5-9.
- [11] 赵云,胡彩虹,胡珊. 汾河和沁河流域入黄径流锐减事实分析[J]. 水电能源科学, 2012(3): 31-34.
- [12] 代俊峰,王娜,杜君,等. 广西降雨量时空变异规律[J]. 水电能源科学, 2013(6): 6-9.
- [13] 霍正文,陈文,凡炳文. 近54年定西市降水趋势及突变分析[J]. 水文, 2012, 32(3): 88-92.
- [14] 王文圣,丁晶,向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 515-520.
- [15] 佟长福,史海滨,包小庆,等. 基于小波分析理论组合模型的农业需水量预测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 93-98.
- [16] 张艳艳,钟德钰,吴保生. 黄河平滩流量的多时间尺度现象[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 302-309.
- [17] 贺振,贺俊平. 1960年至2012年黄河流域极端降水时空变化[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 490-501.
- [18] 徐丽梅,郭英,刘敏,等. 1957年至2008年海河流域气温变化趋势和突变分析[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 995-1 001.

## Analysis of Variation Characteristics of Precipitation in Sichuan Basin

XI Yuanyuan<sup>b</sup>, HUANG Xiaorong<sup>a,b</sup>, LI Jingjing<sup>b</sup>, GAO Linyun<sup>b</sup>, MA Kai<sup>b</sup>

(a. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering;

b. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Based on the data of monthly mean precipitation recorded at 8 weather stations in Sichuan basin from 1954 to 2010, the characteristics of the change in precipitation were analyzed by precipitation concentration index, linear regressive method, moving average curve, anomaly percent, Kendall rank test method, Morlet wavelet analysis, Mann-Kendall rank statistic method and moving t statistic method. The results indicated that the annual distribution of precipitation was regular in a certain degree with the seasonal changes. The fluctuation of annual and the four seasons precipitation exhibited a tendency of decreasing, precipitation in annual and autumn decreased significantly at 0.05 significant level. The major period was less than 10 years in annual, autumn and winter rainfall. 1958 and 1997 were the abrupt precipitation in annual and autumn. The two abrupt of summer precipitation were 1979 and 1997.

**Key words:** Sichuan basin; precipitation; tendency; period; Mann-Kendall rank statistic method

责任编辑:白芳芳