

近 60 年无为县降水变化趋势研究

奚立平¹, 吴海鹰², 蔡文庆¹

(1. 安徽水利水电职业技术学院, 合肥 231603; 2. 无为县气象局, 安徽 芜湖 238300)

摘要:为了揭示无为县降水的变化趋势和规律,服务于水资源管理、生态建设等方面,采用线性倾向性估计、Mann-Kendall 突变检测、小波分析等方法,对无为县 1957—2016 年降水资料进行了分析。结果表明:无为县年、夏季和冬季的降水量呈上升趋势,春季和秋季的降水量呈下降趋势;年降水日数呈下降趋势,四季降水日数与其降水量保持相同的变化趋势;年和四季的平均降水强度均呈上升趋势;年平均降水强度的上升主导了年降水量的上升趋势,春季和秋季的降水日数的下降主导了春、秋两季降水量的下降趋势,夏季和冬季的降水日数和平均降水强度的上升共同主导了夏、冬两季降水量的上升趋势;年降水量没有发生突变,春季、夏季、秋季和冬季的降水量分别在 1993 年、1979 年、1985 年、1987 年发生突变;年和四季降水量存在丰枯交替的多周期变化规律,目前均处于偏多阶段并将持续较长时间;年、春季、夏季和秋季的降水量与相应时段的平均气温存在一定的负相关关系,而冬季的降水量与其平均气温则存在一定的正相关关系。

关键词:降水量;变化趋势;线性倾向性估计;Mann-Kendall 突变检测;小波分析;相关分析

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0209-06

Study on Change Trend of Precipitation in Wuwei County in Recent 60 Years

XI Liping¹, WU Haiying², CAI Wenqing¹

(1. Anhui Water Conservancy Technical College, Hefei 231603, China;

2. Meteorological Bureau of Wuwei County, Wuhu, Anhui 238300, China)

Abstract: To reveal the trend and pattern of the precipitation in Wuwei County for the purpose of resource management and ecological construction, we utilized linear tendency estimation, Mann-Kendall mutation detection, and wavelet analysis and other methods to analyze the precipitation information in Wuwei County from 1957 to 2016. The results demonstrated that: based on precipitation in Wuwei County, there was an uptrend in summer and winter, and a downtrend in spring and autumn; for annual precipitation, there was an uptrend. The annual precipitation days showed a downward trend, and the precipitation days in the four seasons were the same as precipitation amounts in the four seasons. The annual and seasonal average precipitation intensities showed the upward trend. The annual and seasonal precipitation intensities increased year by year. The declining number of precipitation days in spring and autumn dominated the downtrend of precipitation in these two seasons. The growing number of precipitation days as well as the average precipitation intensity resulted in the uptrend of precipitation in summer and winter. There was no significant change in annual precipitation, while major changes in precipitation happened in spring in 1993, in summer in 1979, in autumn 1985, and in winter in 1987. The annual precipitation and each season precipitation had the cyclical variation pattern of abundant and dry alternation. At present, annual and seasonal rainfall amounts are all in the rich stages and will last for a long time. There is a negative correlation between annual precipitation, spring, summer, and autumn precipitation, and the corresponding average temperatures. There is a positive correlation between winter precipitation and average temperature.

Keywords: precipitation; variation tendency; linear tendency estimation; Mann-Kendall mutation detection; wavelet analysis; correlation analysis

学者们在降水的变化趋势研究方面,取得了不少成果,如杨萍等采用 Mann-Kendall 突变检验和滑动 T 检验等方法研究了青海湖地区近 47 a 降水变化趋势和突变,韩璐等采用气候趋势系数、Mann-Whitney-Pettit 等方法分析了辽宁省近 50 a 来气温和降水的突变特征,韩丹等利用 R/S 分析、Mann-Kendall 检验和小波变换等方法对安徽省 1961—2007 年降水的线性趋势、突变和周期进行了分析,江俊杰等分析了 1959—2007 年安徽省降水时空变化特征,认为年降水量自南至北显著递减,王秋龙对安徽省近 50 余年降水量时空变化特征进行了研究,表明省内各区域降水存在较大的差异。可以看出,目前对于降水变化趋势的研究主要集中在降水量的趋势性和突变检验方面^[1-13],对降水量和气温的相关性研究相对较少^[14],从降水日数、降水强度、周期、突变以及气温等多方面综合研究降水变化趋势则相对缺乏。另外,针对安徽省降水变化趋势的研究主要侧重于省域范围的整体性研究,而对省内各区域的研究相对较少,研究范围偏广,不能较好地反映区域降水变化趋势。因此,从多方面综合研究区域降水变化趋势就显得非常必要,同时也对当地的水资源管理、农作物生产等工作具有较好的促进作用^[15-16]。

无为县位于安徽省中南部的皖江北岸,隶属全国 31 个重点防洪城市之一的芜湖,也是传统的“鱼米之乡”。本文利用无为县 1957—2016 年的降水资料,从多方面综合分析无为县降水的变化趋势和规律,以期无为县防汛抗旱、农业结构调整、农业生产管理、生态建设等提供参考。

1 数据来源与研究方法

研究所用降水资料来源于无为县气象站,经检验,资料的质量和可靠性较好,数据年限为 1957—2016 年。利用 Excel 2007, Matlab 2015, Surfer 8.0 和 SPSS 23 等软件,采用线性倾向性估计、累积距平、Mann-Kendall 突变检测、小波分析、相关分析等方法进行相应分析和绘图。

1.1 线性倾向估计

实测变量 x_i 的估计值 \hat{x}_i 与其对应的时间 t_i 之间有如下关系:

$$\hat{x}_i = a + bt_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: a 、 b 为待定系数,利用最小二乘法来确定。当 $b > 0$ 时,表示 x 随时间 t 的增加呈上升趋势,反之,呈下降趋势。

1.2 累积距平

对于实测变量 x_i ,其对应时刻 t_i 的累积距平 \hat{x}_i 可表示为:

$$\hat{x}_i = \sum_{j=1}^i \left(x_j - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \right) \quad (t=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

利用上式可绘制累积距平曲线,若该曲线呈上升趋势,表示距平值增加,反之减小。

1.3 Mann-Kendall 突变检测

构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (3)$$

$$\text{其中}, r_i = \begin{cases} 1 & X_i > X_j \\ 0 & X_i \leq X_j \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i)$$

定义统计变量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: $UF_1 = 0$; $E(S_k)$ 、 $\text{var}(S_k)$ 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,可由下式算出:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (5)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (6)$$

将时间序列 x 按逆序排列,再按照上式计算,同时使:

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \\ UB_1 = 0 \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

绘制 UF_k 和 UB_k 曲线图,若 UF_k 值大于 0,表明序列呈上升趋势,小于 0 则呈下降趋势,当它们超过给定显著性水平 α 对应的临界线时,表明上升或下降趋势显著。若 UF_k 和 UB_k 曲线在临界线之间相交,则交点对应的的时间就是突变开始的时间^[17]。

1.4 小波分析

Morlet 小波为复数小波,定义为

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (8)$$

式中: ω_0 为常数; i 为虚部; t 为时间。

其离散小波变换形式为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (9)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 为尺度(伸缩)因子; b 为时间(平移)因子; $\bar{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 为 $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 的复共轭函数; $k=1, 2, \dots, N$; N 为信息样本容量; Δt 为取

样间隔。由小波变换方程得到小波系数,利用小波系数可分析时间序列的时频变化特征。

小波方差为:

$$\text{var}(a)=\int_{-\infty}^{\infty}|W_f(a,b)|^2db\tag{10}$$

通过小波方差图可确定信号中不同种尺度变化的强弱和主周期。

1.5 相关分析

相关分析用于描述处于同等地位的变量间相互关系的密切程度,其相关程度可通过 Pearson 相关系数 r 来表示, $|r|\leqslant 1$ 。当 $r>0$,表示两变量呈正相关, $r<0$ 为负相关, $|r|$ 越接近 1,两变量的相关程度越强,反之,两变量的相关程度越弱。给定显著性水平 α ,若 $|r|>r_\alpha$,认为有显著性意义。

2 结果与分析

2.1 降水量趋势分析

采用线性倾向估计对无为县近 60 a 的年、四季的降水量、降水日数及降水强度进行趋势分析,见表 1。

年降水量呈上升趋势,春季和秋季降水量呈下降趋势,夏季和冬季降水量呈上升趋势,只有冬季通过了 0.01 水平的显著性检验,说明冬季降水量在 0.01 水平下呈显著上升趋势,其余变化不显著。对比年降水量和四季降水量的变化情况可知,年降水量以 23.917 mm/10 a 的速率递增,首先是由于夏季降水量以 28.498 mm/10 a 速率递增的贡献,其次是由于冬季降水量以 10.848 mm/10 a 速率递增的贡献。

日降水量大于或等于 0.1 mm 才计入降水日数。年降水日数呈下降趋势,与其降水量变化趋势相反,春季和秋季降水日数呈下降趋势,夏季和冬季降水日数呈上升趋势,四季的降水日数变化趋势与其降水量变化趋势完全一致,只有春季通过了 0.01 水平的显著性检验。对比年降水日数和四季降水日数可知,年降水日数以-0.137 6 d/10 a 的速率下降,主要是由于夏季和秋季降水日数分别以-1.774 d/10 a 和-0.81 d/10 a 速率下降的贡献。

平均降水强度可定义为一段时间内降水量除以降水日数^[18-19]。年和四季平均降水强度均呈上升趋势,只有冬季通过了 0.05 水平的显著性检验。对比年平均降水强度和四季平均降水强度可知,年平均降水强度以 0.293 mm/(d·10 a)的速率递增,主要是由于夏季和冬季平均降水强度分别以 0.469 mm/(d·10 a)和 0.305 mm/(d·10 a)速率递增的贡献。

进一步分析可知,年降水量呈上升趋势,而年降水日数却呈下降趋势,说明年平均降水强度是递增的,也反映了年平均降水强度主导了年降水量的变化趋势。同样,春季和秋季的降水量呈下降趋势,降水日数也呈下降趋势,而平均降水强度却呈上升趋势,反映了春季和秋季的降水日数的下降主导了降水量的下降;夏季和冬季的降水量呈上升趋势,降水日数和平均降水强度也呈上升趋势,反映了夏季和冬季的降水日数和平均降水强度的上升共同主导了降水量的上升。

表 1 降水量趋势分析

时段	降水量			降水日数			降水强度		
	变化倾向率/ (mm/10 a)	变化 趋势	显著性	变化倾向率/ (d/10 a)	变化 趋势	显著性	变化倾向率/ [mm/(d·10 a)]	变化 趋势	显著性
全年	23.917	上升	不显著	-0.1376	下降	不显著	0.293	上升	不显著
春季	-13.223	下降	不显著	-1.774	下降	显著	0.109	上升	不显著
夏季	28.498	上升	不显著	0.951	上升	不显著	0.469	上升	不显著
秋季	-2.023	下降	不显著	-0.81	下降	不显著	0.15	上升	不显著
冬季	10.848	上升	显著	0.314	上升	不显著	0.305	上升	显著

2.2 降水量突变分析

由图 1 可知,年降水量的 UF 和 UB 在临界值±1.96 之间有多个交点,但由于 UF 曲线始终没有超过 $\alpha=0.05$ 水平的上下限(±1.96),说明年降水量时间序列没有明显的突变点。

四季降水量存在明显的突变时间,春季降水量的 UF 和 UB 在临界值±1.96 之间分别在 1962 年、1968 年、1973 年、1976 年、1978 年、1979 年、1983 年、1984 年、1988 年、1993 年附近有多个交点,如图 2A

所示,说明在 $\alpha=0.05$ 水平下,春季降水发生了突变,再从图 3A 来看,累计距平峰值在 1993 年,同时也是累计距平曲线自上升趋势至下降趋势的转折点,由此判断,可能的突变点是 1993 年;夏季降水量的 UF 和 UB 在临界值±1.96 之间分别在 1979 年、1990 年、1993 年、1995 年、2004 年、2006 年附近有多个交点,如图 2B 所示,说明在 $\alpha=0.05$ 水平下,夏季降水发生了突变,再从图 3B 来看,累计距平谷值在 1979 年,同时也是累计距平曲线自下降趋势至上趋势的转折

点,由此判断,可能的突变点是 1979 年;秋季降水量的 UF 和 UB 在临界值 ± 1.96 之间分别在 1966 年、1968 年、1971 年、1973 年、1975 年、1976 年、1977 年、1981 年、1982 年、1985 年附近有多个交点,如图 2C 所示,说明在 $\alpha=0.05$ 水平下,秋季降水发生了突变,再结合图 3C 来分析判断,可能的突变点是 1985 年;冬季降水量的 UF 和 UB 在临界值 ± 2.58 之间仅在 1987 年附近有一个交点,如图 2D 所示,说明在 $\alpha=0.01$ 水平下,冬季降水发生了突变,再结合图 3D 来分析判断,可能的突变点是 1987 年。

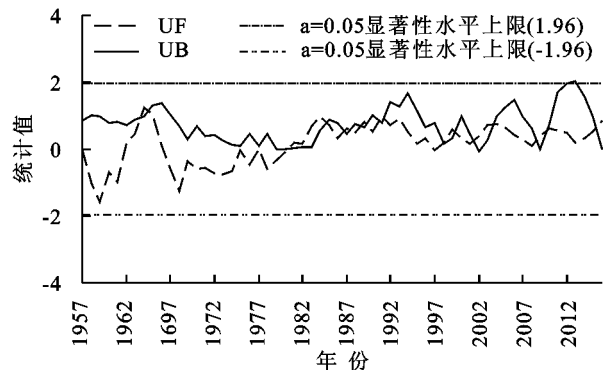


图 1 1957—2016 年降水量 M-K 检验法统计量曲线

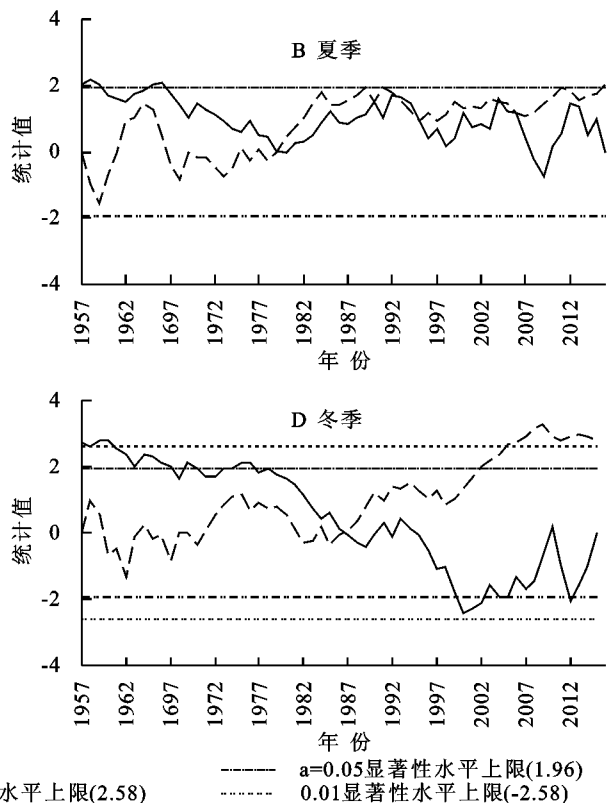
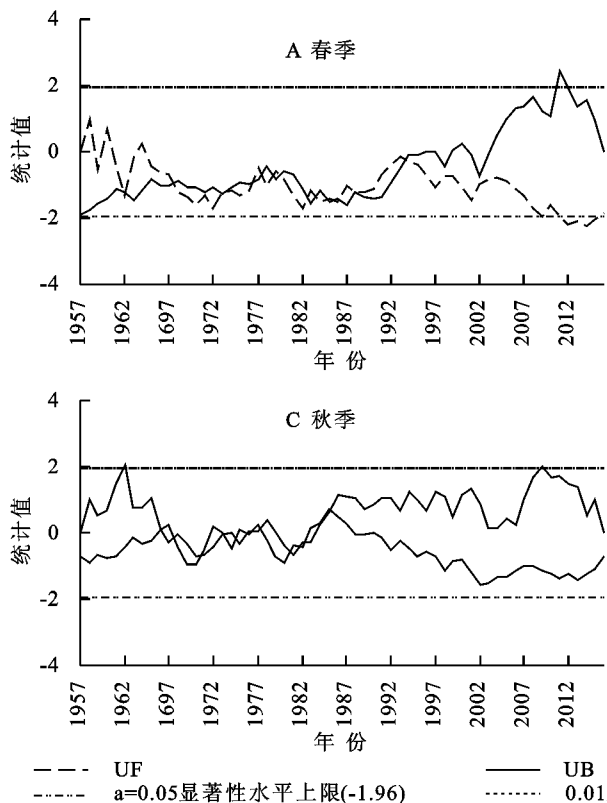


图 2 1957—2016 年四季降水量 M-K 检验法统计量

2.3 降水量周期分析

图 4 反映了年降水量 Morlet 小波变换系数实部在平面上的强弱分布,降水量偏多在图中用实线表示,偏少则用虚线表示。可以看出,年降水量呈偏多、偏少的交替变化,特别是在 6, 10, 22 a 的时间尺度上,这种交替的周期性变化非常明显。其中,6 a 尺度的周期性变化在 1978—1998 年较明显,10 a 尺度的周期性变化在 1960—1980 年、1998—2014 年较为明显,22 a 尺度的周期性变化具有全域性。

图 5 表示年降水量周期性变化在时间尺度分布上的强弱,峰值越高反映年降水量周期性变化越强烈,各峰值对应的时间尺度就是年降水量周期性变化的主周期。可以看出,年降水量小波方差主要存在 3 个峰值,即具有 6, 10, 22 a 左右的主周期,其中,最大峰值对应的 22 a 为第一主周期,10, 6 a 则分别

为第二及第三主周期。

由图 6 可知,年降水量在 22 a 时间尺度上,经历 4 次偏多—偏少交替变化,2016 年处于偏多阶段,但上升的趋势变缓;在 10 a 时间尺度上,经历了 9 次偏多—偏少的交替变化,2016 年处于偏多阶段;在 6 a 时间尺度上,经历 16 次偏多—偏少交替变化,2016 年处于偏少阶段。6 a 尺度的丰、枯交替变化嵌套在 10 a 尺度的丰、枯结构中,10 a 尺度的丰、枯交替变化嵌套在 22 a 尺度的丰、枯结构中。从 22, 10 a 时间尺度上来看,年降水量均处于偏多阶段的高位,预计 2016 年后年降水量将进入下降的通道,但仍处于偏多阶段并持续较长时间。而在 6 a 时间尺度上,年降水量处于偏少阶段的低位,预计 2016 年后年降水量进入上升的通道,但仍将处于偏少阶段 1~2 a。

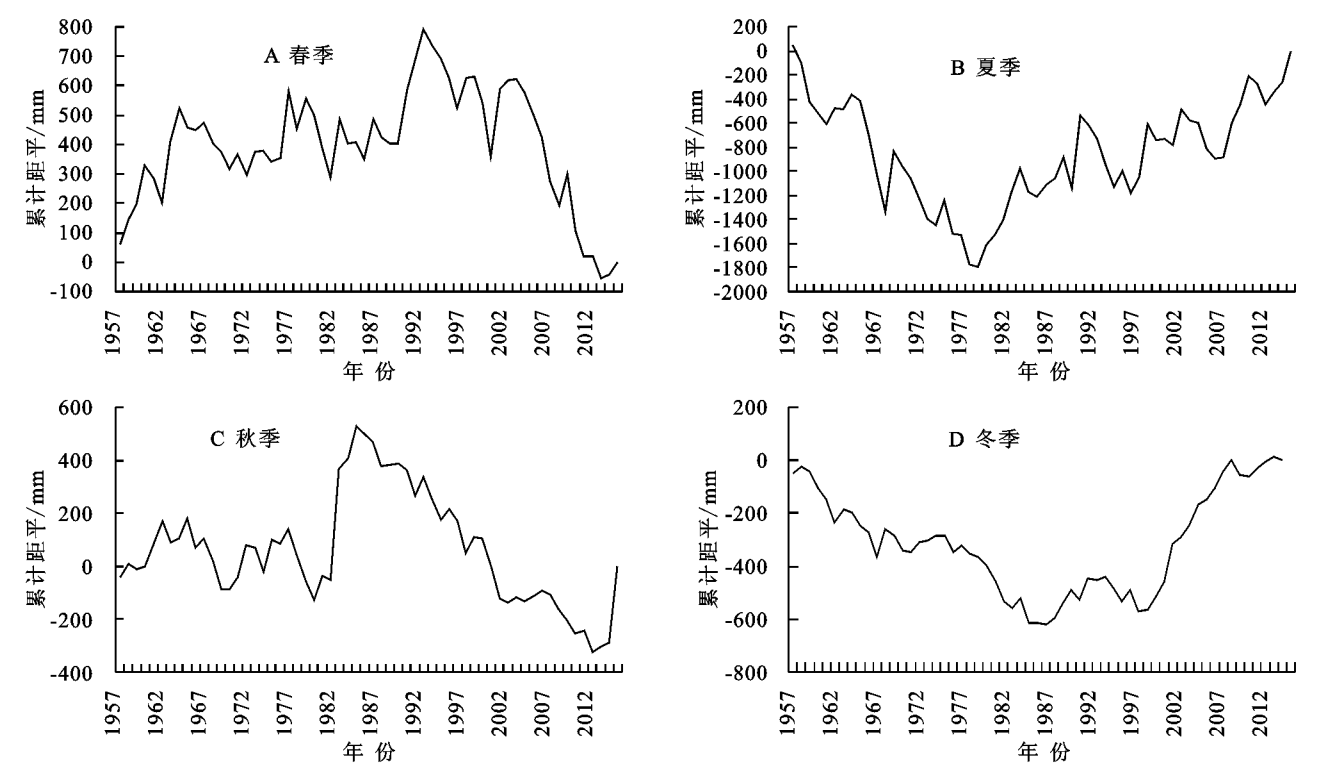


图 3 1957—2016 年四季降水量累积距平

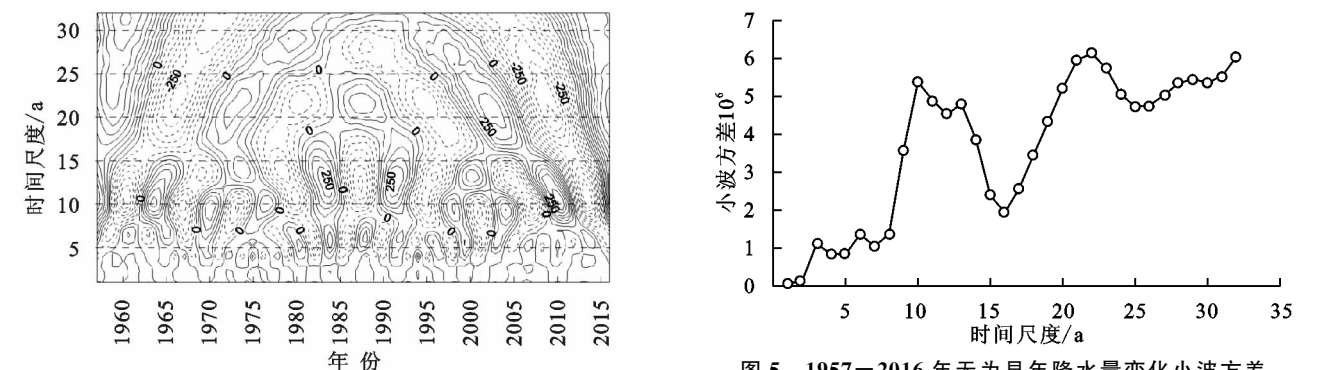


图 4 1957—2016 年年降水量 Morlet 小波变换系数实部等值线

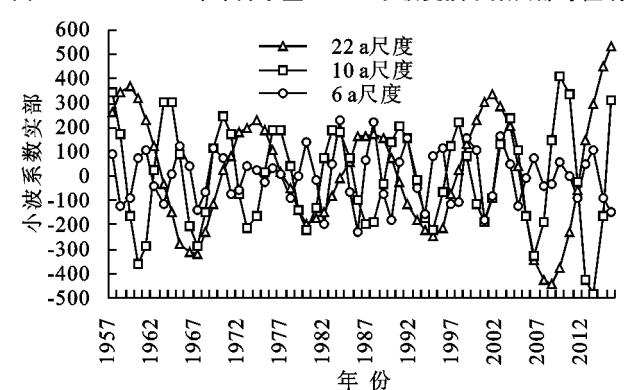


图 5 1957—2016 年年降水量变化小波方差

明夏季降水量对年降水量的变化起主导作用。另外，春季降水量的第二、三主周期分别与年降水量的第一、二主周期一致，春季降水量与年降水量的上述主周期对应的 2016 年所处的降水阶段也是基本一致的，反映了春季降水量对年降水量的影响也较明显。秋、冬两季降水量对年降水量的影响相对较弱。总体来看，四季降水量目前均处于偏多阶段并将持续较长时间，其中，春、夏、秋季的降水量处于偏多阶段的高位即将进入下降的通道，而冬季的降水量则处于偏多阶段并有进一步上升的趋势。

2.4 降水量与气温相关分析

对年降水量和年平均气温、四季降水量和四季平均气温的相关性进行分析，结果见表 3。全年、春季、夏季和秋季的降水量与相应时段的平均气温存在一定的负相关关系，即平均气温升高，对应时段的降水量下降；冬季的降水量与冬季的平均气温则存在一定的正相关关系，即冬季的平均气温升高，其降水量也

升高。其中春季和夏季的降水量与相应时段平均气温的相关性是显著的,其他均不显著。

表 2 四季降水量的主周期与相应的 2016 年所处的降水阶段

四季降水量	主周期与相应的 2016 年所处的降水阶段					
	第一主周期/a	降水阶段	第二主周期/a	降水阶段	第三主周期/a	降水阶段
春季降水量	28	偏多阶段	22	偏多阶段	10	偏多阶段
夏季降水量	10	偏多阶段的高位	23	偏多阶段的高位,但上升趋势变缓	6	偏少阶段
秋季降水量	17	偏多阶段的高位	9	偏多阶段的高位	5	偏少阶段的低位
冬季降水量	22	偏多阶段,并有继续上升的趋势	7	偏少阶段的低位	4	偏多阶段,并有继续上升的趋势

对无为县 1957—2016 年降水量资料进行分析,发现无为县降水四季分布极不均匀,降水主要集中在春季和夏季,春季平均降水量占年平均降水量的 28.6%,夏季平均降水量占年平均降水量的 42.4%,两季平均降水量占年平均降水量的 71%,而春季和夏季降水量与相应时段的平均气温呈显著的负相关,因此春季和夏季降水量与相应时段平均气温的相关性,主导了年降水量对年平均气温的相关性。另外,在全球气候变化的大背景下,气温变化势必会影响无为县的降水量,特别是对春季和夏季的降水量将产生显著影响,进而影响无为县的区域防洪和抗旱工作。

表 3 降水量与相应时段平均气温的相关系数

时段	全年	春季	夏季	秋季	冬季
Pearson 相关系数	-0.098	-0.297*	-0.41**	-0.014	0.253

注: * 表示通过 0.05 显著性检验, ** 表示通过 0.01 显著性检验。

3 结 论

(1) 无为县近 60 a 的年平均降水强度的上升,致使年降水量按 23.917 mm/10 a 的速率呈上升趋势(不显著)。年降水量在 $\alpha=0.05$ 的显著水平下没有发生突变。年降水量丰枯交替变化的第一、第二及第三主周期分别是 22,10,6 a,目前年降水量在 22,10 a 时间尺度上处于偏多阶段的高位,而在 6 a 时间尺度上,处于偏少阶段的低位。

(2) 无为县近 60 a 春季和秋季降水日数的下降,致使春季和秋季的降水量分别按 -13.223 mm/10 a, -2.023 mm/10 a 的速率呈下降趋势(不显著);夏季和冬季的降水日数和平均降水强度的上升,致使夏季和冬季的降水量分别按 28.498 mm/10 a,10.848 mm/10 a 的速率呈上升趋势(冬季降水量变化显著,夏季不显著)。在 $\alpha=0.05$ 水平下,春季、夏季和秋季降水发生了突变,可能的突变点分别是 1993 年、1979 年、1985 年,冬季降水在 $\alpha=0.01$ 水平下发生了突变,可能的突变点是 1987 年。四季降水量具有丰枯交替的多周期变化规律,总体来看,目前四季降水量均处于偏多阶段,其中冬季的降水量有进一步上升的趋势,其余三季则将从高位进入下降通道。

(3) 全年和四季的降水量与相应时段的平均气温存在一定的相关关系,其中冬季的降水量与其平均

气温具有一定的正相关关系,其余呈负相关关系。

参考文献:

[1] 邱丽丽,浦戎戎,陈跃,等.滇中地区近 50 a 降水变化特征及突变[J].绵阳师范学院学报,2017,36(2):93-99.

[2] 潘舟艳,闫丽娟,李广,等.榆中县近 42 年降水突变及周期变化分析[J].甘肃农业大学学报,2016,51(6):102-109.

[3] 马荣.延安市 45 年降水变化趋势及突变特征分析[J].延安大学学报:自然科学版,2016,35(3):95-99.

[4] 张红英,李晶晶,段娟,等.气候变暖背景下长治市极端降水变化趋势[J].中国农学通报,2016,32(32):137-143.

[5] 杨萍,王乃昂,张海峰,等.青海湖地区降水变化趋势和突变分析[J].青海大学学报:自然科学版,2013,31(5):69-73.

[6] 黄济琛,陆宝宏,徐玲玲,等.变化条件下常德市降水气温特征分析[J].水文,2016,36(5):85-91.

[7] 姜必友,陈俊.猫跳河上游流域汛期降水特征及变化趋势[J].四川水力发电,2014,33(3):84-88.

[8] 万敏,李家启,张爽,等.北碚区降水时空分布及变化趋势分析[J].西南师范大学学报:自然科学版,2013,38(7):122-128.

[9] 徐建新,陈学凯,黄鑫.渭潭县降水突变特征分析[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2014,35(2):6-11.

[10] 韩璐,曹阳,常静,等.近 50 年来辽宁省气温和降水突变特征分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2014,12(3):310-315.

[11] 韩丹,程先富,张群,等.安徽省 1961—2007 年降水特征分析[J].人民长江,2011,42(23):23-26.

[12] 王秋龙.安徽省近 50 余年降水量时空变化特征分析[J].测绘工程,2014,23(11):19-24.

[13] 江俊杰,孙卫国.1959—2007 年安徽省降水时空变化特征分析[J].中国农业气象,2012,33(1):27-33.

[14] 王润科.武都区 50 年气温与降水的变化趋势及相关性分析[J].天水师范学院学报,2015,35(2):46-49.

[15] 罗启华,郭生练,李天元,等.江汉平原区域降水与气温长期变化趋势分析[J].长江科学院院报,2011,28(3):10-14.

[16] 孟鹏,安听.沈阳市不同时间尺度降水趋势及突变研究[J].中国农学通报,2014,30(33):256-262.

[17] 周雪英,段均泽,李晓川,等.1960—2011 年巴音布鲁克山区降水变化趋势与突变特征[J].沙漠与绿洲气象,2013,7(5):19-24.

[18] 王秀萍,王烁,李潇潇.1971—2013 年大连地区降水变化趋势分析[J].气象与环境学报,2016,32(3):47-52.

[19] 肖义,唐少华,陈华,等.湘江流域 1960—2008 年降水气温变化趋势[J].人民长江,2013,44(3):10-12,32.