

气候变化背景下武功地区降水特征

冯文文^{1,2}, 柳凤霞^{1,2}, 钱会^{1,2}, 张瑜婷^{1,2}

(1.长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2.旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室 长安大学, 西安 710054)

摘 要:为了研究降水与气候变化之间的关系,借助武功地区 1955—2015 年逐月降水量和气温实测资料,采用线性倾向估计、Mann-Kendall 非参数检验、Morlet 小波分析方法,对武功地区近 61 年来气候变化背景下的降水特征进行了研究。结果表明:武功地区年降水量总体上呈-15.56 mm/10 a 的减少趋势,其中春、夏季降水量下降显著,秋、冬季则较为平缓;年和季节降水量的典型突变时间节点在 1983 年附近,表明了年降水量和季节降水量变化趋势的一致性,也印证了 20 世纪 90 年代关中平原西部降水趋势发生了突变;武功地区气候偏冷期主要在 1955—1994 年,气温降低使得年降水量呈 39.46 mm/10 a 的减少趋势;气候偏暖期主要在 1995—2015 年,气温升高使得年降水量呈 98.63 mm/10 a 的增加趋势;气候冷暖变化通过影响蒸发量、蒸腾量和水汽输送速度,来影响武功地区年降水量;降水量增多有利于解决当地水资源短缺问题,同时也增加了极端天气和洪涝灾害发生的几率。

关键词:气候变化;降水量特征;M-K 检验;小波分析;武功地区

中图分类号:P426.62⁺3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0200-06

Characteristics of Precipitation in Wugong Area Under the Background of Climate Change

FENG Wenwen^{1,2}, LIU Fengxia^{1,2}, QIAN Hui^{1,2}, ZHANG Yuting^{1,2}

(1.School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2.Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the relationship between precipitation and climate change, measured data of monthly precipitation and temperature in Wugong region from 1955 to 2015 were used to examine the climate change of Wugong area through linear trend estimation, Mann-Kendall nonparametric test and Morlet wavelet analysis. The results show that the annual precipitation of Wugong area decreased with a rate of 15.56 mm/decade, with intense diminishing in spring and summer, and mild declining in autumn and winter; the typical mutation of annual and seasonal precipitation series occurred around 1983, indicating the consistency of the annual and seasonal precipitation, and suggesting the mutation of precipitation in Wugong area during the 1990s; the chilling period in Wugong area covered the period from 1955 to 1994, in which the temperature decreasing led to the diminishing of precipitation with a rate of 39.46 mm/decade. However, the warmer duration of Wugong area was the period from 1995 to 2015, during which the increasing rate of precipitation was 98.63 mm/decade; the precipitation in Wugong area was affected by the effects of temperature on evapotranspiration and the water-vapor transfer rate; the increment of precipitation would benefit to the water resources shortage in Wugong area, and would lead to the extreme weather scenario and flood disasters.

Keywords: climate change; precipitation characteristics; M-K test; wavelet analysis; Wugong area

人口增长和工业化进程的加快,使得全球性气候变暖问题不断加剧^[1]。许多证据表明,全球变暖将加快冰雪消融,影响全球性(或区域性)的水文循环,增加极端天气和气候灾害发生的几率^[2]。大气降水的变化特征越来越得到人们的重视^[3]。

目前关于全球变暖对大气降水影响因素的研究有很多,政府间气候变化专业委员会(IPCC)在第 4 次评估报告^[4]中指出全球变暖会使得高、低纬度地区降水显著增多,而中纬度地区降水则会减少;林婧婧等^[5]研究中国气候变化特征及影响因素时,分析了气候变化对降水

收稿日期:2019-04-21

修回日期:2019-05-21

资助项目:国家自然科学基金(41172212);重点科研平台条件建设项目(310829173306);创新团队支持项目(学科建设)(310829173701)

第一作者:冯文文(1994—),男,陕西凤翔人,硕士研究生,研究方向为水文水资源研究。E-mail:835951069@qq.com

通信作者:钱会(1963—),男,陕西泾阳人,教授,博士,主要从事水文地球化学演化方面的教学与研究。E-mail:qianhui@chd.edu.cn

的影响,认为全球变暖导致中国降水呈减少趋势;段安民等^[6]研究青藏高原气候变化特征时,指出全球变暖使得青藏高原降水增加。全球变暖会影响降水变化特征已是学者们的普遍共识,对于区域性的气候变化与降水关系的研究,程肖侠等^[7]研究陕西省近 50 a 降水的变化特征时,讨论了降水对气候变化的敏感性,认为二者呈负相关关系;陈太根等^[8]在研究关中平原近 49 年来气候变化特征时,将气温和降水结合对比分析,认为气温升高显著的地区,降水波动变化的更加剧烈;徐盼盼等^[9]研究西安市降水量变化趋势时,指出全球变暖使得西安地区大气降水呈现显著的负增长,并将持续很长时间。全球变暖对大气降水特征的影响,仍是气候变化特征研究的热点问题。

目前,气候变化背景下的大气降水特征多是以区域性研究居多,单个气象站点的小范围研究仍比较少^[10]。基于此,本文选择武功气象站 1955—2015 年 61 a 的逐月降水和气温实测资料,分析其变化规律掌握当地气候变化的特征,为该地区优化水资源配置和防灾抗旱提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

武功县位于关中平原西部腹地,渭河北部,面积约 392 km²。气候上属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 12.9℃,最高气温出现在 7 月,为 26.1℃,最低气温出现在 1 月,为 -1.2℃,最高与最低气温相差达 27℃左右。研究区地貌类型复杂,由南到北依次排列着渭河阶地、黄土塬及山前洪积扇和部分洼地,降水时空分布不均,多年平均降水量为 552.6~663.9 mm。

1.2 数据来源

本文选用中国气象局武功站(108°13'N, 34°15'E) 1955—2015 年的逐月平均降水量观测资料,该数据来源于中国气象科学数据共享服务网和《陕西省水资源公报》。

2 研究方法

2.1 线性趋势估计

线性趋势估计分析气象要素的变化趋势,主要是借助最小二乘法对原始数据 x_i 与 t_i 时间序列组成的二维数组,进行一元线性回归分析^[11]。表示为:

$$\hat{x}_i = a + bt_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中: a 为回归常数; b 为回归系数。 a 和 b 由最小二乘法进行估计。当 $b > 0$ 时,表明 x 随着时间 t 的增加呈上升趋势;当 $b < 0$ 时,表明 x 随着时间 t 的增加呈下降趋势。

2.2 累积距平

累积距平是指距平值的累积,用实测降水数据的

累计距平值与时间序列组成而绘制的曲线,称之为累积距平曲线。当曲线上升时,表明距平累积持续增大,该段时间内降水实测值比平均值偏多;当曲线稳定下降时,表明距平累积持续减小,该段时间内降水实测值比平均值偏小^[12-13]。

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t=1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; x_i 为年降水量(mm); t 为时间(a)。

2.3 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 突变检验法是世界气象组织推荐的,应用于长时间数据序列趋势变化及突变点检验分析的方法^[13-14],基本原理如下:

以降水量的时间序列 x_i 为基础,构造秩序列:

$$D_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^n d_{ij} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (3)$$

$$\text{其中}, d_{ij} = \begin{cases} 1 & X_i > X_j \\ 0 & X_i \leq X_j \end{cases} \quad (j=1, 2, 3, \dots, i)$$

假设时间序列是独立随机的,定义统计变量:

$$UF_k = \frac{D_k - E(D_k)}{\sqrt{\text{var}(D_k)}} \quad (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

式中:均值 $E(D_k) = k(k-1)/4$, 方差 $\text{var}(D_k) = k(k-1)(2k+5)/72$, 其中 $2 \leq k \leq n$ 。

将时间序列逆序 x_i 排列,同时满足:

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k \\ k = n+1-k \end{cases} \quad (k=1, 2, 3, \dots, n)$$

给定显著水平 α , 将 UF_k, UB_k 的值分别构成两条曲线,如果出现交点,且交点在置信区间线之间,则该交点为突变时间点;如果交点超过了置信区间线,可以通过与实际曲线相比较来确定是否为突变点^[11, 13-15]。

2.4 小波分析

连续小波变换是应用最为广泛的变化方法之一,适合分析各评价因子的周期性变化,对原始数据要求较低,适用性好^[11, 14, 16]。本文采用的以 Morlet 小波为母小波的变化,此小波的形式为:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\frac{1}{2}\eta^2} \quad (5)$$

式中: ω_0 是无量纲频率; i 为虚部; t 为时间。

基于 Morlet 小波基本形式,由小波变化方程计算得到小波系数和小波方差。小波系数实部等值线图可用来反映不同时间尺度的周期变化及其在时间上的分布,以此来判断不同时间尺度上的未来变化趋势;小波方差可用来反映信号能量随时间尺度的分布情况,以此来确定信号中不同种尺度变化的强弱以及信号变化的主周期^[14, 16-17]。

3 结果与分析

3.1 武功地区降水量年际分布特征

图 1 为 1955—2015 年武功地区年降水量距平及

累积距平示意图,由图可知,武功地区多年降水量以 15.56 mm/10 a 的平均速率在不断减少,总体呈现下降趋势。多年平均降水量为 608.07 mm,其中年降水量极大值是 1958 年为 978.3 mm,比多年平均降水量多了 370.23 mm;极小值是 1977 年为 326.70 mm,比多年平均降水量少了 281.37 mm。

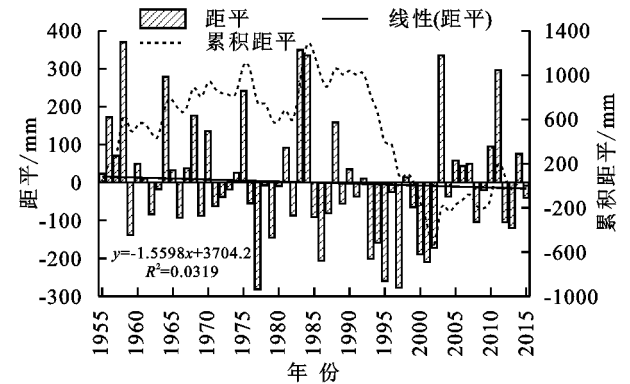


图 1 1955—2015 年武功地区年降水量距平及累积距平

3.2 武功地区降水量年内分布特征

从季节降水量多年变化趋势来看(图 2),四季降水量都呈减少趋势,与多年降水量变化趋势基本一致,其中以春夏减少为主,秋冬减少不大。

春季多年降水量平均值为 135.37 mm,整体以 5.30 mm/10 a 的速度减少,1964 年春季降水量为历

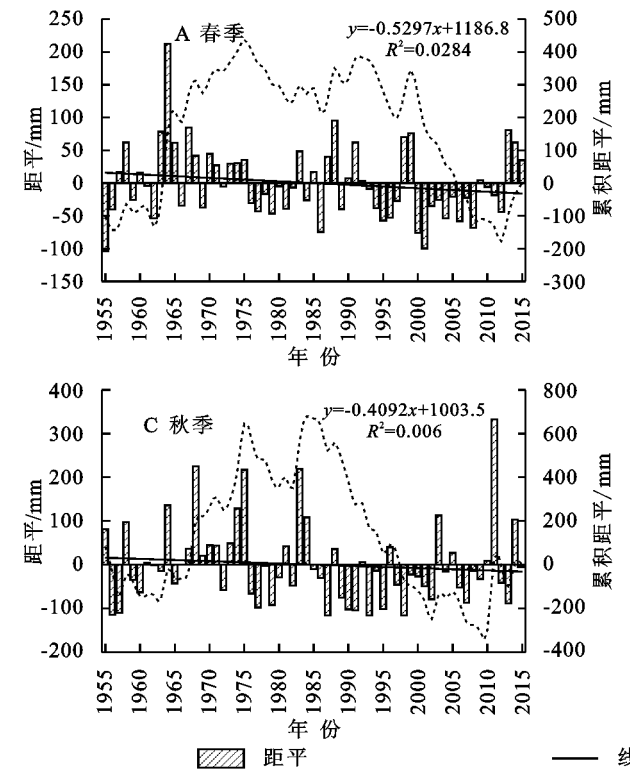


图 2 1955—2015 年武功地区季节降水量距平及累积距平

3.3 武功地区降水量多年突变性分析

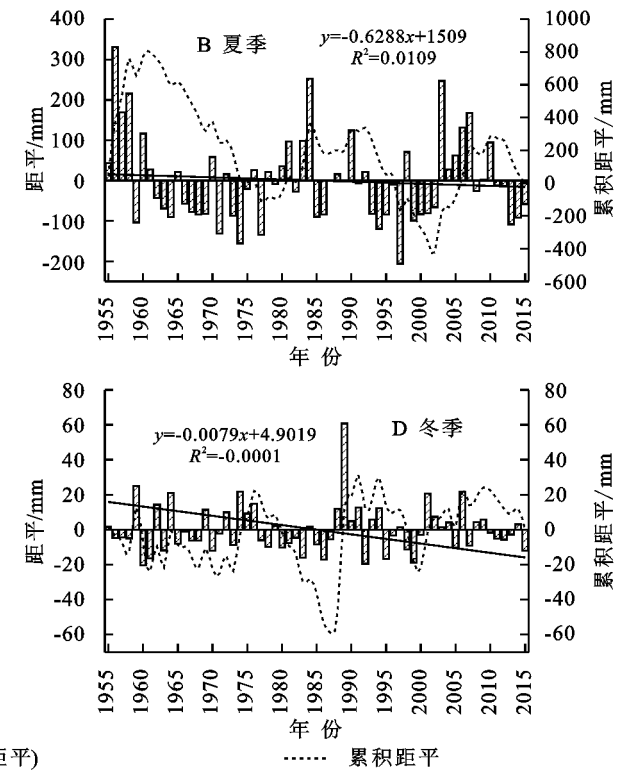
图 3 为基于 M-K 非参数检验方法所得到的结果。武功地区多年降水量的检验 Z 值为 -1.73,且通过置信

年最高值,达到了 348.10 mm,1955 年为历年最低值,仅有 31.90 mm,极差达 316.2 mm。从图 2A 可知,1963 年以前和 2005 年以后降水量偏少,在此期间以 1975 年和 1993 年为界,增减趋势发生两次变化。

夏季多年降水量平均值为 260.77 mm,整体以 -6.29 mm/10 a 的速度不断下降,最大与最小值分别出现在 1956 年和 1997 年,降水量分别为 592.30, 54.90 mm,两者相差达 537.4 mm。结合图 2B 分析,夏季降水变化趋势比较复杂,1960 年以前主要是增加的趋势为主,1960 年之后年则主要呈减少的趋势,转折点主要在 1979 年、1993 年和 2003 年。

秋季多年降水量平均值为 191.33 mm,整体以 -4.09 mm/10 a 的速度不断减少,最大与最小值分别出现在 2011 年和 1998 年,极值降水量分别为 523.90, 75.20 mm。结合图 2C 分析,秋季降水量主要在 1965 年之前和 1985 年之后为减少趋势,在此期间则主要呈缓慢增加趋势。

冬季多年降水量平均值为 20.60 mm,整体以 0.26 mm/10 a 的速度不断减少,最大与最小值分别出现在 1989 年和 1960 年,极值降水量分别为 81.40, 0.30 mm。结合图 2D 分析,冬季降水量变化趋势复杂多变,主要在 1990 年之前为缓慢减少,1990 年之后则变为增加趋势。



度为 95% 的显著性检验。在 $\alpha=0.05$ 显著水平检测限临界值 ± 1.96 之间,年降水量统计检验值 UF 与 UB 分别在 1970 年、1973 年、1978 年、1983 年、2002 年、2011 年、

2013 年等附近有多个的突变交点,说明年降水量在上述年份可能发生了突变。结合图 1 年降水量距平和累积距平图,可以看出 1983 年累积距平曲线达到峰值,曲线两侧变化趋势也由上升变为下降,因而,武功地区年降水量时间突变点应是 1983 年。在 1983 年之前,武功地区降水量主要是以增加为主,1983 年以后武功地区降水量则主要以减少为主,这与陈太根等^[8]研究关中原降水得出的结论基本一致。

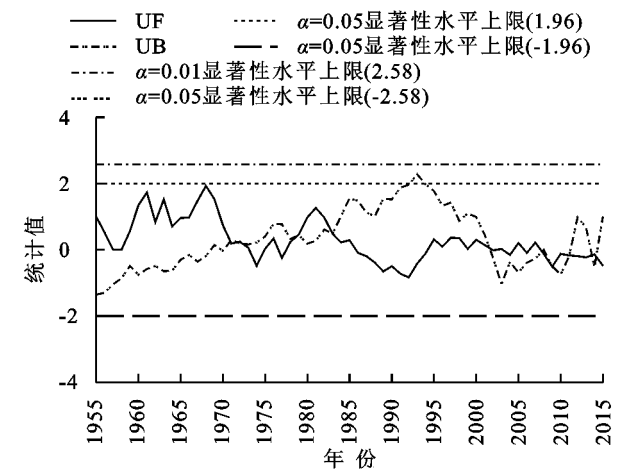
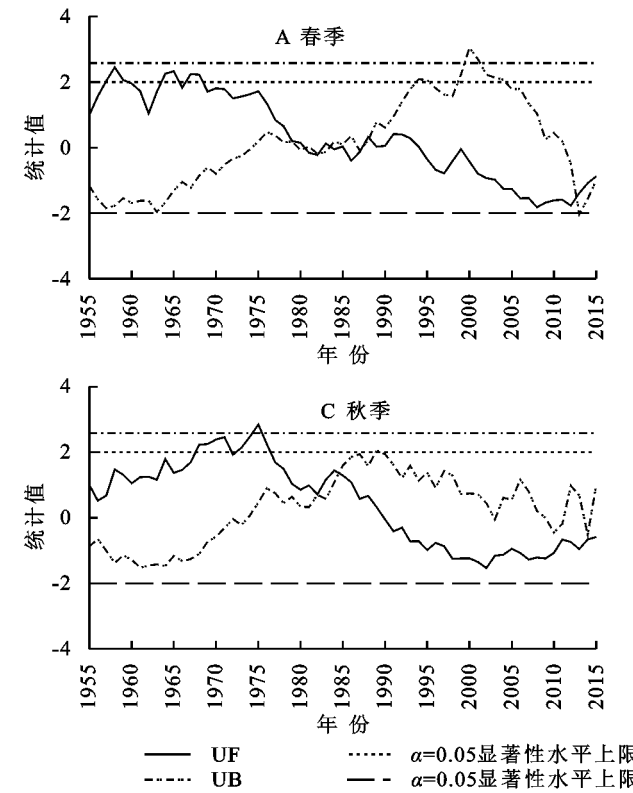


图 3 1955—2015 年年降水量 M-K 检验统计值曲线

对于各个季节在多年周期中的突变趋势,图 4 是运用 M-K 检验法得到的检验统计曲线。春季降水量的检验统计值 UF 与 UB 曲线在临界值 ± 1.96 之间有一个交点,在 1982 年附近,检验统计量 UB 曲线超出了 $\alpha=0.01$ 的检测水平限(图 4A)。为了确定春季



降水在 1982 年是否发生突变,结合图 2A 可以看出,1982 年为累积距平谷值且在 1982 年两侧累积距平曲线变化趋势由下降变为上升,由此可得,春季降水量的时间突变点为 1982 年。

如图 4B 所示,在 $\alpha=0.01$ 的检测水平限下,检验统计量 UF 与 UB 曲线,在临界值 ± 1.96 两侧交点分别在 1960 年、1985 年、2003 年、2011 年附近。结合图 2B,1958 年、1985 年和 2011 年夏季降水量距平值没有出现显著的增减性变化,而 2003 年之前夏季降水量以减趋势为主,2003 年之后降水量以增趋势为主,发生显著趋势变化,因此夏季降水量变化趋势时间突变点应为 2003 年。

由图 4C 可知,在临界值 ± 1.96 内,秋季降水量的检验统计量 UF 和 UB 曲线分别交于 1983 年和 1985 年,但统计量 UF 曲线超出了 $\alpha=0.01$ 的检测水平限;结合图 2C 来看,秋季降水量在 1975 年和 1985 年距平值发生显著的增减变化,1985 年为累计距平峰值且在 1985 年以前秋季降水量以增加为主,1985 年以后秋季降水量以减少为主,由此可得秋季降水量的突变时间点为 1985 年。

由图 4D 可知,在临界值 ± 1.96 之间,冬季降水量检验统计量 UF 与 UB 检验统计量曲线,交点分别在 1958 年、1962 年、1971 年、1977 年、1982 年、1986 年、1991 年、1995 年、2005 年、2014 年附近,结合图 2D 判断,冬季降水距平值波动较大没有显著的增减趋势变化点,因此冬季降水量变化趋势可能没有发生显著性突变。

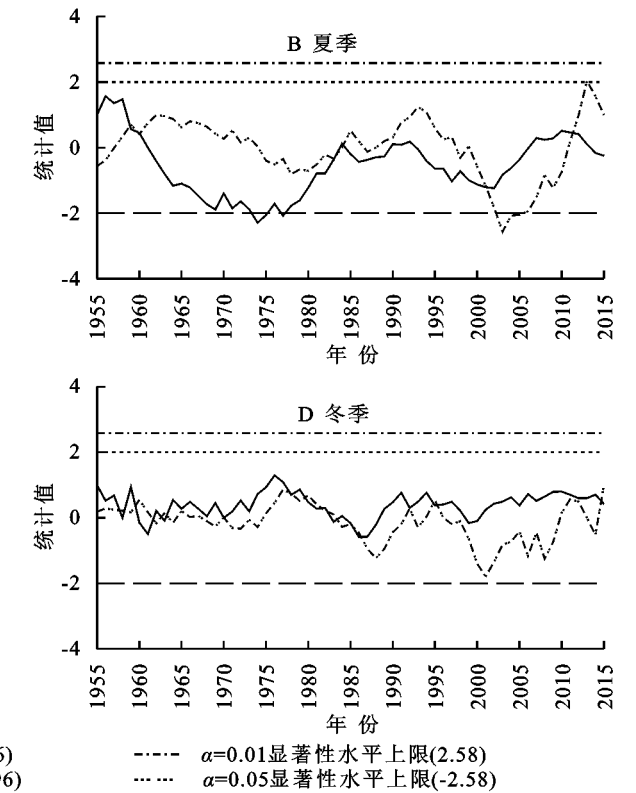


图 4 1955—2015 年武功地区四季降水量 M-K 检验统计值曲线

3.4 武功地区降水量多年周期性分析

图 5A 为年降水量 Morlet 小波变化系数实部等值线图,用来反映降水序列不同时间尺度的周期变化及其在时间域中的分布。一般来说,实部系数为正则在图中用实线表示,为负则用虚线表示。图 5A 表明武功地区年降水量呈偏多、偏少不断交替变化的趋势,主要时间尺度集中在 6, 13, 22 a 这 3 个时间尺度上呈周期性变化。在时间分布上,6 a 尺度的周期变化主要体现在 1975—1984 年,13 a 尺度的周期变化主要体现在 1961—1985 年,22 a 尺度的周期变化主要体现在 1980—2000 年。

图 5B 为年降水量变化小波方差曲线,反映了周期性变化在时间尺度分布上的强弱,峰值越大,年降水量周期性越强烈。峰值对应的时间尺度就是年降水量变化的主周期。年降水量主要存在 3 个主周期,第一主周期为 22 a,第二、三主周期分别为 13, 6 a。

由图 5C 可以看出,在 22 a 时间尺度上,武功地区年降水量经历了 4 次偏多—偏少的交替变化,其中 2015 年降水量偏多;在 13 a 的时间尺度上,年降水量共经历了 7 次偏多—偏少的交替变化,其中 2015 年降水量偏多;在 6 a 的时间尺度上,年降水量共经历了 16 次偏多—偏少的交替变化,其中 2015 年降水量偏少。此间,大尺度的时间周期变化包含了若干小尺度的丰—枯交替变化,如 6 a 尺度的丰枯(系数正负)变化嵌套在 10 a 尺度的周期变化之中,10 a 尺度的丰枯变化嵌套在 22 a 尺度的周期变化之中。

3.5 气候变暖对降水量的影响

图 6A 为武功地区 1955—2015 年气温距平值和累积距平曲线,可以看出武功地区年平均气温总体呈上升趋势,其上升速率为 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,低于全球平均气温的升高速率 $0.48^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[4]。从时间分布来看,1955—1994 年累计距平曲线持续下降,气温多年距平值长期为负,表明武功地区气候属于偏冷期;1995—2015 年之后累计曲线发生突变,由下降变为上升,气温距平值变为正值,表明之后的武功地区气候属于偏暖期。从累计曲线上升和下降速度来分析,1995 年之后气候变化速度非常快,升温尤为明显。

为了进一步研究武功地区气候变暖的背景下降水量变化特征,按照武功地区气温偏冷暖期绘制了 1955—1994 年和 1995—2015 年年降水量变化示意图(图 6B)。在 1955—1994 年偏冷期,武功地区年降水量以 $39.49\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速度呈下降趋势,说明气候变冷使得武功地区年降水减少;在 1955—2015 年偏暖期,武功地区年降水量以 $98.63\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速度呈显著上升趋势,表明气候变暖改变了武功地区自

1954—1994 年以来降水量减少的趋势,说明气温升高对武功地区降水量具有决定性作用。

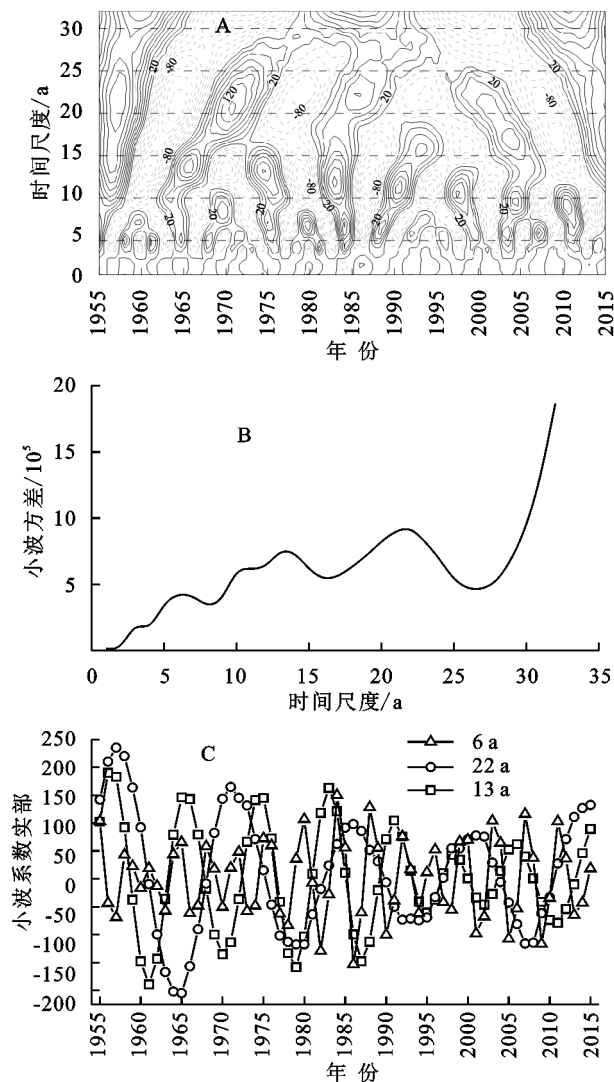


图 5 1955—2015 年武功地区 Morlet 小波周期性分析结果

从 20 世纪末武功地区经济迎来蓬勃发展,农业种植面积扩大,大量开采地下水、引渭河水用于灌溉,气温升高使得水面蒸发量、植物蒸腾散失量增大,导致年降水量不断增加。在全年变暖的气候背景下,全球性(或地区性)水循环和水汽输送速度加快,使得武功地区空气中水汽比例较以前明显增多,易形成云团带来降水,也是导致武功地区年降水量增加的原因之一。

4 结论

(1) 武功地区降水量分布极不均匀,年内和年际分布变化都很大,年降水量以 $15.5\text{ mm}/10\text{ a}$ 的下降速度在不断减少,其中春、夏季降水量下降显著,秋、冬季则较为平缓。

(2) 年和春、夏、秋、冬季降水量 M-K 趋势检验的时间突变点均在 1983 年附近,表明各季节降水量突变时间点与年突变点基本一致,表明在 20 世纪 90 年代降水量变化趋势发生突变,由上升转变为下降。

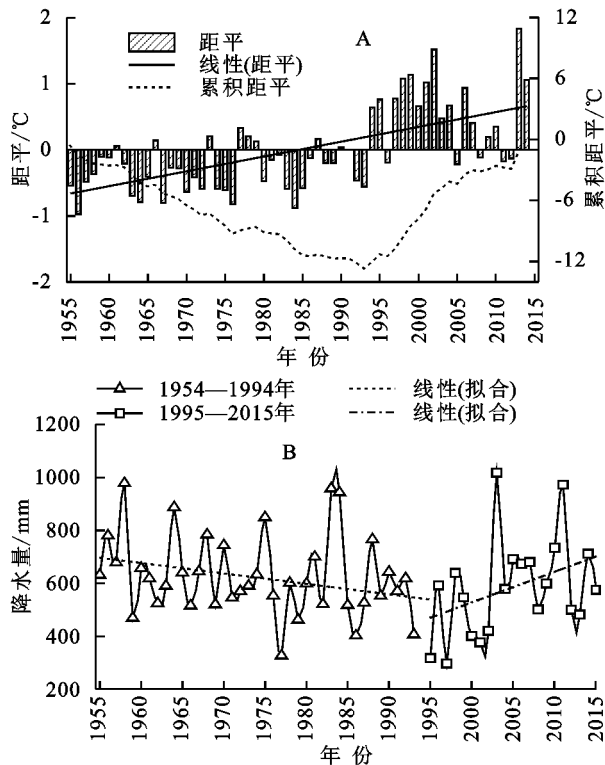


图6 武功地区年气温和累积气温分布及对降水影响

(3) 武功地区年降水量的主要存在 22, 13, 6 a 共 3 种周期性变化, 其中 22 a 为第一主周期, 13 a 和 6 a 为第二、三主周期。在时间尺度上表现为, 大尺度的时间周期变化包含了若干小尺度的丰—枯交替变化, 如 6 a 尺度的丰枯(系数正负)变化嵌套在 10 a 尺度的周期变化之中, 10 a 尺度的丰枯变化嵌套在 22 a 尺度的周期变化之中。

(4) 武功地区气候偏冷期主要在 1955—1994 年, 气温降低使得年降水量呈 39.46 mm/10 a 的减少趋势; 气候偏暖期主要在 1995—2015 年, 气温升高使得年降水量呈 98.63 mm/10 a 的增加趋势; 气候冷暖变化通过影响蒸发量、蒸腾量和水汽输送速度, 来影响武功地区年降水量。

(5) 降水量增加在一定程度上缓解了武功地区位于干旱半干旱地区缺水的现状, 有利于解决当地水资源短缺的问题, 同时极端高温和降水量异常现象也出现的更加频繁, 极易引发极端天气和洪涝灾害, 更加值得人们注意。

参考文献:

- [1] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956.
- [2] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. 资源科学, 2002, 24(3): 1-7.
- [3] 刘孝萍. 全球气候变化对水文与水资源的影响与建议[J]. 低碳世界, 2018, 185(11): 100-101.
- [4] IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories [Z]. Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI), 2006.
- [5] 林婧婧, 张强. 中国气候态变化特征及其对气候变化分析的影响[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 1593-1600.
- [6] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374-381.
- [7] 程肖侠, 方建刚, 孙娴, 等. 陕西省可利用降水资源的气候变化特征及敏感性分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 45-50.
- [8] 陈太根, 董婕. 关中平原近 49 年来气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 76-81.
- [9] 徐盼盼, 林涛, 钱会, 等. 1951—2015 年西安市大气降水资源趋势分析及预测[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 313-318, 336.
- [10] 侯凯, 林涛, 钱会, 等. 武功地区气候变化特征及趋势预测[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 252-258.
- [11] 杨东, 刘洪敏, 郭盼盼, 等. 1956—2008 辽宁省近 53 年的降水量变化[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 96-101.
- [12] 白爱娟, 方建刚. 近 50 a 陕西省冬季气候变化特征及其与北半球大气环流的关系[J]. 气象科学, 2003, 23(2): 176-184.
- [13] 王文艳, 张丽萍, 吴东平, 等. 近 19 年干旱半干旱过渡区气温降雨变化特征分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(S1): 57-61.
- [14] 李小丽, 敖天其, 黎小东. 古蔺县近 50 年来降水序列趋势分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 140-144.
- [15] 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.
- [16] 尹鹏. 哈尔滨市水资源发展态势及可持续利用评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [17] 王素慧, 贾绍凤, 吕爱锋. 基于小波的三江源年径流变化的周期性分析及趋势预测[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2010, 31(5): 51-57.