

文章编号:1673-9469(2020)01-0084-07

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.01.014

基于小波和 MK 检验的董志塬年降水量分析

赵双庆, 范文*, 于宁宇

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了研究董志塬降水规律特征, 预测年降水量变化趋势, 应用 Mann-Kendall (MK) 检验和 Morlet 小波变换对董志塬 1959—2016 年的年降水量进行分析。结果表明: 董志塬年降水量呈不显著增加趋势; 年降水量存在突变性, 突变起始年份分别为 1962 年、1970 年、1985 年、1995 年、2003 年、2009 年, 突变年份间隔为 10 年左右; 年降水量主要受 2 年、4 年和 8 年的尺度周期波动影响, 第一主周期为 8 年; 年降水在整个研究的时域上丰水期与枯水期交替变化明显, 以 8 年为周期, 年降水量呈现上升下降周期性变化规律。

关键词: 董志塬; Mann-Kendall 检验; 降水趋势; 小波分析

中图分类号: TV125

文献标识码: A

Analysis of Annual Precipitation in the Dongzhi Tableland Based on Wavelet and MK Tests

ZHAO Shuangqing, FAN Wen*, YU Ningyu

(School of Geological and Surveying & Mapping Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054, China)

Abstract: In order to identify the characteristics of Dong Zhizhen's precipitation and predict the trend of annual precipitation, the Mann-Kendall (MK) test and Morlet wavelet transform were used to analyze Dong Zhizhen's annual precipitation from 1959 to 2016. The result shows that there is a slight increasing trend of the annual precipitation in the Dongzhi Tableland and there is a abrupt change in the annual precipitation, the starting years of which are 1962, 1970, 1985, 1995, 2003 and 2009 respectively, with the interval of about 10 years. The annual precipitation is mainly affected by the scale periodic fluctuation of 2, 4 and 8 years, and the first main cycle is 8 years. The annual precipitation alternates significantly between wet season and dry season in the whole time domain of the study. The annual precipitation with an eight-year cycle takes a cyclical pattern of rise and fall.

Key words: Dongzhi Tableland; Mann-Kendall test; the tendency of precipitation; wavelet analysis

董志塬是中国黄土高原区面积最大、保存最完整的黄土塬, 但干旱和水土流失限制了该地区社会经济的可持续发展。董志塬地区以雨养农业, 农业发展与降雨密切相关, 降雨是当地农业生产的主要限制因素。引起水土流失最主要的外部动力因素是降水, 由其引发的水土流失问题是黄土高原地区最严峻的环境问题, 大面积的水土流失导致了土地资源的丧失和退化^[1-4]。因此, 研究董志塬区的降水时间分布及变化趋势, 对于定量

估算董志塬区区域土壤侵蚀量、预测未来降水变化趋势、合理安排农业生产以及科学制定水土保持措施具有重要的指导意义。降水在时间和空间上的分布规律及其对地表生态系统的影响是水文生态学研究的关键问题之一^[5]。一直以来, 降水规律都是国内外专家学者广泛关注的研究课题。Silva^[6]使用 MK 方法对巴西东北部的气候变量的时间序列进行分析, 指出该地区的相对湿度和降水量呈下降趋势。Andreo 等人^[7]通过频谱分析、

收稿日期: 2019-12-06

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(41602281); 溯源侵蚀(SKLK16-05); 溯源侵蚀铁路(14-C51-01)

作者简介: 赵双庆(1994-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源方面的研究。

* 通讯作者: 范文(1967-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事山区地质灾害、黄土微观力学等方面的研究。

相关分析和连续小波分析研究了二十世纪以来伊比利亚半岛南部的气候和水文变化,指出该地区年平均降水存在 5 年的恒定周期,并预测整个 21 世纪该地区降水量呈下降趋势。左洪超等人^[8]对中国近 50 年来降水量进行分析,表明我国年平均降水量没有明显的变化趋势但年降水量的变化存在着明显的区域特征。

不同地区降水变化的时间特征不同,对不同流域的降水时间特征进行评价仍然有很重要的价值,有很多专家学者应用 MK 检验和小波分析方法,研究了黄土高原地区降水量的趋势、周期、突变性等降水时间特征,对黄土高原降水变化规律有了更深层次的认识^[9-15]。目前,对黄土地区的降水规律研究大多是大范围整体性研究,对董志塬地区的降水规律研究较少,所以本文对该地区的年降水规律进行深入分析,将对董志塬的水土保持、生态建设以及灾害预防起到一定的指导意义。

1 研究区概况

董志塬位于甘肃省庆阳市中南部,北起驿马镇北部的桐川乡沿蔡家庙沟至庆城县一线,南止泾河谷底,东西介于马莲河与蒲河之间,地理坐标为 N35. 25—36. 06, E107. 46—107. 96^[16-18]。董志塬地区属于大陆性半干旱气候,降水分布不均匀,时有伏旱、暴雨、冰雹灾害;秋季降温迅速,潮湿多雨;冬季寒冷漫长,降雨稀少,年降雨量 500 ~ 600 mm。泾河、马莲河、蒲河、黑河 4 条河流的 373 条一级支沟从四面八方伸向塬面腹地,塬区周边受冲沟切蚀呈树枝状,形成塬高谷深,沟壑纵横的陇东黄土塬侵蚀地貌。庆城县附近沟壑区侵蚀地貌见图 1。董志塬区塬面和沟谷地层划分为:第四系全新世 Q₄(冲积土层)、晚更新世 Q₃(马兰黄土)、中更新世 Q₂(离石黄土)、早更新世 Q₁(午城黄土)、上、中新世 N₂(蓝田组红粘土),工程地质图见图 2。



图 1 董志塬上的沟壑地形

Fig.1 The gullies of the Dongzhi Tableland

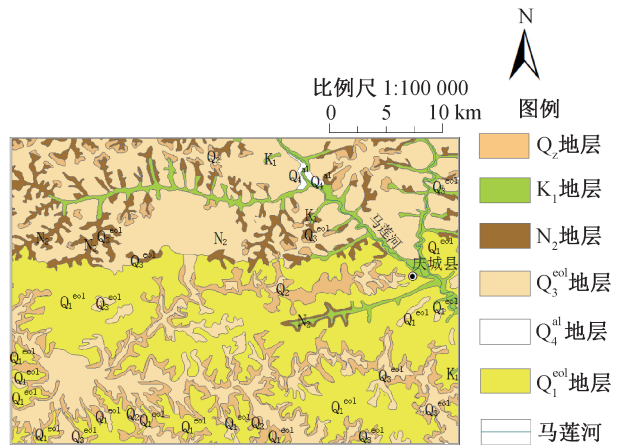


图 2 董志塬北部研究区工程地质图

Fig.2 The engineering geological map of the research area in northern of the Dongzhi Tableland

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文降水资料来源于中国气象局董志塬区内的西峰站点及南部附近的长武站点 1959—2016 年的逐日监测数据。气象监测站点位置,见图 3。为了得到董志塬的降雨变化的总体趋势,将各站日降雨量累计,得到 1959—2016 年各年的年降雨数据。

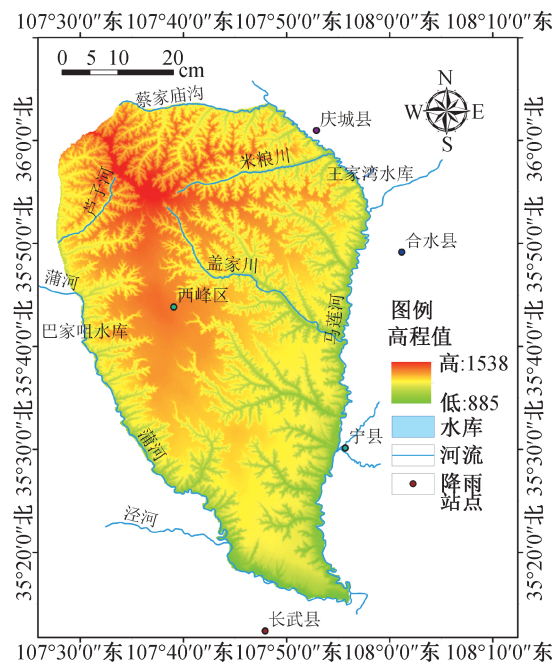


图 3 董志塬数字高程模型及气象站的位置

Fig.3 The numerical elevation model and location of weather station in the Dongzhi Tableland

为了保证数据质量,本研究仅使用中国气候参考网(CCRN)的数据。由中国气象局管理的CCRN由最先进的站点组成,这些站点配备了高质量的仪器,并遵循严格的观测协议,特别是用于检测气候变化信号^[19]。

2.2 Mann-Kendall 检验法

本文采用MK检验方法来分析董志塬降水站点的年降水量,得到董志塬地区年降水量变化趋势以及降水量突变年份,具体分析方法简述如下。

2.2.1 MK 趋势检验

(1)构建董志塬降水站点的年降水量时间序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,假设 H_0 表示该时间序列中的数据是独立的,随机变量同分布的样本,没有线性变化趋势。

(2)计算检验的统计变量 S :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

(3)对于有10个或者更多数据点的时间序列,使用正态近似。统计值 S 的方差计算如下:

$$\text{var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_i^n e_i(e_i-1)(2e_i+5)] \quad (2)$$

其中年降水量相同的样本的个数记为 i , i 值相同的样本中降水量不同的样本的个数记为 e_i 。

(4)构造的标准正态分布变量 Z 计算如下式:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & \text{若 } S > 0 \\ 0, & \text{若 } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & \text{若 } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

(5)在一定的 α 置信水平上,如果 $Z \geq |Z_{1-\alpha/2}|$ 则拒绝原假设,即在 α 置信水平上,年降水量时间序列存在明显的趋势。

(6)其变化趋势的大小用 β 表示,计算如下:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_k - x_j}{k - j} \right), \forall j < k \quad (4)$$

若 $\beta > 0$,表示呈上升趋势;若 $\beta < 0$,表示呈下降趋势。

2.2.2 MK 突变检验

根据董志塬降水站点的年降水量时间序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,然后我们构造一秩序列:

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

其中

$$r_i = \begin{cases} +1, & \text{当 } x_i > x_j, \\ 0, & \text{当 } x_i \leq x_j, \end{cases} j = 1, 2, \dots, i \quad (6)$$

定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中, s_k 的均值和方差分别为 $E(s_k), \text{var}(s_k)$,时间序列独立同分布的情况下,它们的表达式如下:

$$\begin{cases} E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \\ \text{var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} k = 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

把时间序列 x 逆序排列 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 ,再通过(7)式求出 UF_k ,同时令 $UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1), UB_1 = 0$ 。得到的统计序列 UF_k 和 UB_k, UF_k 的正负表明 x_k 的变化趋势,正值表明序列呈上升趋势,负值表明呈下降趋势;当 UF_k 和 UB_k 超过显著性临界直线时,说明趋势显著。 UF_k 和 UB_k 曲线的交点如果在临界线之间,则交点对应的时刻为突变发生的时间^[20]。

2.3 Morlet 小波分析

在分析时间序列时,需要获得平滑连续的小波振幅以及时间序列的振幅和相位的信息,因而选择非正交的复值小波。Morlet小波是非正交性的复值小波,因此国内外专家学者大多采用Morlet小波对气象时间序列进行周期分析^[21]。曹晓敏等^[9]应用小波分析,得出黄土高原中部降雨量具有2~3a和7a左右的年际振荡,其中以2~3a的年际振荡尤为明显。郝立生等^[21]通过Morlet小波分析发现,太阳活动存在14.5a的显著周期。李森等^[23]采用Morlet小波函数,对该地区近300a来降水的年际变化时间序列进行了小波分析,得出该地区年降水量时间序列存在21a、35a和85a左右的主周期,并指出85a周期是第一主周期。本研究采用气象学分析时间序列常用的Morlet小波函数,对董志塬降水站点的降水时序进行分析,并用红噪声或白噪声标准谱对小波功率谱的显著性进行检验,从而得到董志塬年降水量周期性变化规律。

Morlet小波函数及离散小波变换公式为:

$$\varphi(t) = \pi^{-1/4} e^{-t^2/2} e^{iabt} \quad (9)$$

$$\omega_r(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^N f(i\delta t) \varphi^* \left(\frac{i\delta t - b}{a} \right) \quad (10)$$

式中, ω_0 是角频率, Torrence 等人认为取 6 比较合适^[21-22], $\omega_r(a, b)$ 为小波变换后的小波系数, $f(i\delta t)$ 为进行分析的降水时间序列, δt 为时间序列的时间间隔; $\omega_r(a, b)$ 为卷积后的小波系数, a 和 b 分别为尺度因子(表示小波的周期长度)和平移因子(表示时间上的平移), “*”表示复共轭。本文对年降水量进行分析, 降水时序的时间间隔为 1 年, δt 取 1。

小波功率谱 $E_{a,b}$ 定义为:

$$E_{a,b} = |\omega_r(a, b)|^2 \quad (11)$$

小波功率谱的显著性检验一般应用红噪声或白噪声标准谱来实现。求得降水时间序列滞后 1 的自相关系数 $r(1)$, 如果大于 0.1 则用红噪声谱进行检验, 若小于 0.1, 则令 $r(1) = 0$, 用白噪声谱进行检测。Torrence^[21] 指出小波功率谱服从 χ^2 分布。在一定的显著水平上, 计算得到红噪声或白噪声的显著性理论谱 P 。如果理论谱小于小波功率谱, 则说明这种尺度对应的周期具有显著性。

理论功率谱:

$$P = \sigma^2 P_a \frac{\chi^2}{2} \quad (12)$$

P_a 为红噪声或白噪声谱:

$$P_a = \frac{1 - r(1)^2}{1 + r(1)^2 - 2r(1) \cos\left(\frac{2\pi\delta t}{1.033a}\right)} \quad (13)$$

$r(1)$ 降水时间序列滞后 1 的自相关系数, χ^2 是自由度 $\nu=2$ 的卡方在特定显著性处的值。

若 $E_{a,b} > P$, 说明小波功率谱是显著的。

3 结果与分析

3.1 年降水量变化趋势分析

通过前述方法得到的西峰、长武站点 MK 趋势检验统计参数见表 1、表 2; 西峰、长武站点年降水量随年份的变化趋势线见图 4、图 5。

表 1 西峰站点 MK 趋势检验统计参数

Tab.1 The statistical parameters of MK trend test at Xifeng station

相关系数 r	中位数 β	S	Z	P 值
0.046 7	0.554	83.0	0.550	0.582

表 2 长武站点 MK 趋势检验统计参数

Tab.2 The statistical parameters of MK trend test at Changwu station

相关系数 r	中位数 β	S	Z	P 值
0.188	1.42	231	1.54	0.123

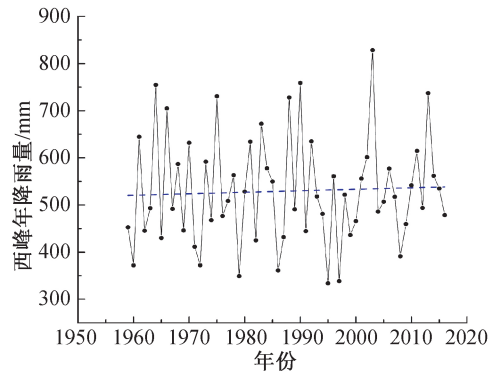


图 4 西峰站点年降水量时序及变化趋势线
Fig.4 The timing and the trend line of annual precipitation at Xifeng station

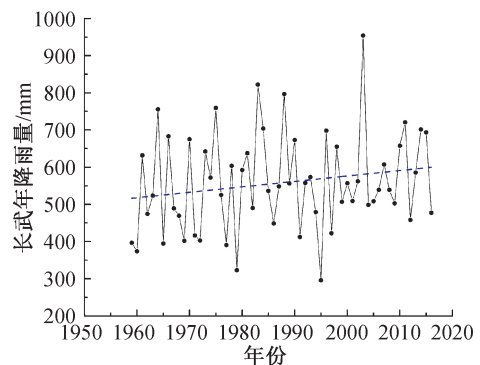


图 5 长武站点年降水量时序及变化趋势线
Fig.5 The timing and the trend line of annual precipitation at Changwu station

应用 MK 检验法检验分析水文时间序列时, 在 0.05 的显著性水平下, $Z \geq |Z_{1-\alpha/2}|$ 拒绝原假设具有统计学意义。显著性水平 α 取 0.05 时, 拒绝原假设说明存在显著的变化趋势; 显著性水平 α 取 0.01 时, 拒绝原假设说明存在非常显著的变化趋势^[24]。

西峰站点, MK 分析中位数 $\beta = 0.553 > 0$, 年降水量变化成上升趋势, 上升幅度为 5.53 mm/10 a, 西峰站点年降水的 Mann-Kendall 趋势检验值 $Z = 0.550 < 1.96$, 未通过置信度 95% 的显著性趋势检验, 西峰站点年降水量呈上升趋势, 但未表现出显著性特点。长武站点, MK 分析中位数 $\beta = 1.42 > 0$, 年降水量的变化成上升趋势, 上升幅度为 14.2 mm/10 a, 长武站点年降水的 Mann-Kendall

趋势检验值 $Z = 1.542 < 1.96$, 未通过置信度 95 % 的显著性趋势检验, 长武站点年降水量呈上升趋势, 趋势不显著。

综上所述, 董志塬地区 1959—2016 年年降水量呈不显著上升趋势, 年降水量以 5.54~14.2 mm/10 a 的速率增加。

3.2 MK 突变检验结果与分析

通过前述 MK 突变检验方法, 绘出的 UF_k 和 UB_k 曲线图如下:

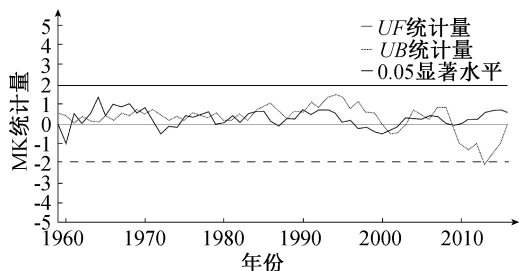


图6 西峰站点年降水量 MK 统计曲线图
Fig.6 The MK statistical curve of annual precipitation at Xifeng station

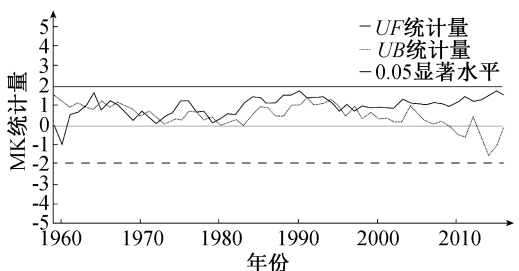


图7 长武站点年降水量 MK 统计曲线
Fig.7 The MK statistical curve of annual precipitation at Changwu station

从西峰站点年降雨量 MK 检验的 UF_k 趋势线中可以清晰看出, 20 世纪年降水量变化趋势: 20 世纪 60 年代初期下降, 然后上升, 到 70 年代初呈下降趋势, 70 年代后至 90 年代初一直呈现上升趋势, 90 年代末至 00 年代初呈下降趋势, 之后又呈现上升趋势。从 UF_k 和 UB_k 的交点可以看出年降水量突变现象, 降水量突变年份分别为 1962 年、1970 年、1985 年、2003 年、2009 年。从长武站点年降水量 MK 检验的 UF_k 趋势线中可以清晰看出, 20 世纪 60 年代后, 长武年降水量一直处于上升趋势。从 UF_k 和 UB_k 的交点可以看出年降水量突变现象发生在 1963 年、1971 年、1979 年、1995 年。

综上所述, 董志塬降水量突变起始年份分别为 1962 年、1970 年、1985 年、1995 年、2003 年、

2009 年。最小与最大降水的年份为 1995 年、2003 年, 这正好与年降水量突变起始年份 1995 年与 2003 年相对应。

3.3 小波分析结果

应用 Morlet 小波对董志塬气象站点年降水时序进行小波分析, 其中年降水时序小波功率谱中的黑色实线为影响锥 (COI), COI 考虑了小波函数与信号两端数据卷积所产生的计算结果影响范围, 其内部为可信分析结果。黑色虚线内则为显著性 90% 的功率谱。小波系数实部时频分布图可以得到降水时序的时间、频率变化特征。在时间尺度一定的情况下, 降水量在该尺度下的变化特征通过小波系数实部随时间的变化来反映。正值对应降水量偏多的情况, 负值对应降水量偏少的情况。年降水量时间序列的主要时间尺度 (主周期), 可以通过降水时序小波功率谱来确定。

3.3.1 西峰年降水量的的小波分析结果

西峰的情况如图 8 及图 9 所示, 可见其存在三种时间尺度变化周期, 分别为 1~2 年、7~8 年、9~14 年时间尺度。从图 9 可以看出, 影响锥内的可信分析结果, 时间尺度 7~8 年在能量上占了主要部分, 是影响未来该地区降水量的主要时间尺度, 该时间尺度在 20 世纪 80 年代趋势比较明显, 震荡

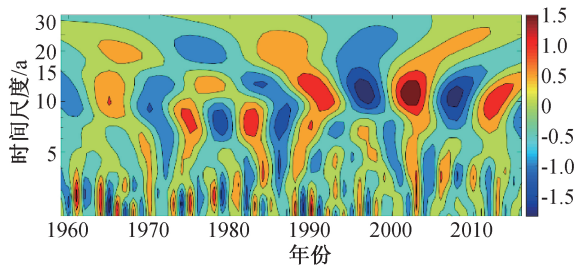


图8 西峰站点年降水时序小波系数实部时频分布图
Fig.8 Real part time-frequency distribution of wavelet coefficients of annual precipitation at Xifeng station

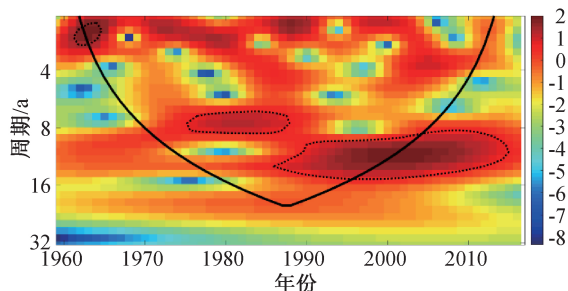


图9 西峰站点年降水时序小波功率谱
Fig.9 Wavelet power spectrum of annual precipitation time-series at Xifeng station

中心显示其枯水与丰水期的交替周期约为 8 年。而 1~2 年的周期主要存在于 20 世纪 60 年代早期一段时间,9~14 年的周期主要存在于 20 世纪 80 年代末至 90 年代末。

3.3.2 长武年降水量的小波分析结果

对于长武地区,根据图 10、图 11 可见其存在三种时间尺度变化周期,分别为 1~2 年、4~5 年、7~9 年时间尺度。时间尺度 7~9 年在能量上占了主要部分,是影响未来该地区降水量的主要时间尺度,该时间尺度在 20 世纪 70 年代初到 80 年代末趋势显著,震荡中心显示其枯水与丰水期的交替周期约为 8 年。1~2 年左右的周期,主要存在于 20 世纪 60 年代初和 70 年代末。而 4~5 年左右的周期主要存在于 20 世纪 80 年代末和 21 世纪 00 年代末。

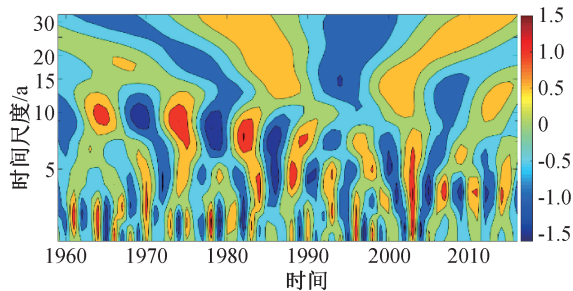


图 10 长武站点年降水时序小波系数实部时频分布图
Fig.10 Real part time-frequency distribution of wavelet coefficients of annual precipitation at Changwu station

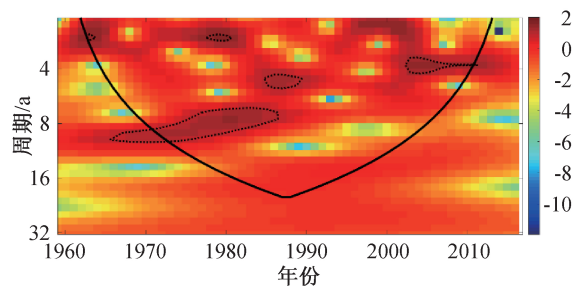


图 11 长武站点年降水时序小波功率谱
Fig.11 Wavelet power spectrum of annual precipitation time-series at Changwu station

综合分析得到,董志塬地区年降水量受 2 年、4 年和 8 年的尺度波动所影响,时间尺度 8 年在能量上占了主要部分,是影响未来该地区降水量的主要时间尺度,主要出现在 20 世纪 70 年代到 80 年代末;董志塬地区年降水量时间序列的主周期为 8 年,以 8 年为周期振荡,震荡中心在 1980 年。董志塬地区降水的丰枯交替明显,董志塬地区整个时间序列上的年降水量呈现出上升下降的循环交替特征。

4 结论

1)董志塬年降水量呈现上升趋势,但趋势不显著。

2)董志塬年降水量存在突变性,突变起始年份分别为 1962 年、1970 年、1985 年、1995 年、2003 年、2009 年,突变年份间隔为 10 年左右。

3)董志塬年降水量主要受 2 年、4 年和 8 年的尺度周期波动影响,第一主周期为 8 年。

4)董志塬年降水在整个研究的时域上丰水期与枯水期交替变化明显,以 8 年为周期,年降水量呈现上升下降周期性变化规律。

参考文献:

- [1]信忠保,许炯心,马元旭.近 50 年黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征[J].地理科学,2009,29(01):98-104.
- [2]王晓慧,陈永富,陈尔学,等.基于遥感和 GIS 的黄土高原中阳县土壤侵蚀评价[J].山地学报,2011,29(04):442-448.
- [3]潘竟虎.黄土丘陵沟壑区小流域土壤侵蚀情景模拟——以甘肃省静宁县清水沟流域为例[J].自然资源学报,2009,24(04):577-584.
- [4]WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning [USA] [J]. Agric Handbook, 1978, 537.
- [5]DELITALA A M S, CESARI D, CHESSA P A, et al. Precipitation over Sardinia (Italy) during the 1946—1993 Rainy Seasons and Associated Large Scale Climate Variations[J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(5):519-541.
- [6]SILVA V D P R D. On Climate Variability in Northeast of Brazil[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58(4):0-596.
- [7]ANDREO B, JIMÉNEZ P, DURÁN J J, et al. Climatic and Hydrological Variations during the Last 117—166 Years in the South of the Iberian Peninsula, from Spectral and Correlation Analyses and Continuous Wavelet Analyses [J]. Journal of Hydrology, 2005, 324(1).
- [8]左洪超,吕世华,胡隐樵.中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J].高原气象,2004(02):238-244.
- [9]曹晓敏,刘志红,杨昭明,等.黄土高原中部降雨量时空分异特征研究[J].四川师范大学学报:自然科学版,2011,34(05):724-728.
- [10]FU G, CHEN S, LIU C, et al. Hydro-Climatic Trends of the Yellow River Basin for the Last 50 Years[J]. Climatic Change, 2004, 65(1-2):149-178.
- [11]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(01):27-34.

- [12] 祝青林,张留柱,于贵瑞,等.近30年黄河流域降水量的时空演变特征[J].自然资源学报,2005(04):477-482.
- [13] 刘引鸽.陕北黄土高原降水的变化趋势分析[J].干旱区研究,2007(01):49-55.
- [14] LIU Q, YANG Z, CUI B. Spatial and Temporal Variability of Annual Precipitation during 1961—2006 in Yellow River Basin, China[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2008, 361(3-4):330-338.
- [15] 王毅荣,王锡稳.中国黄土高原地区4—10月雨量时空变化特征分析[J].高原气象,2006(04):737-743.
- [16] 杨林山,李常斌,王帅兵,等.基于SWAT和遥感方法的黄土台塬区土壤水库均衡——以甘肃省陇东黄土董志塬为例[J].冰川冻土,2014,36(03):691-698.
- [17] 姚文波.历史时期董志塬地貌演变过程及其成因[D].西安:陕西师范大学,2009.
- [18] 张松柏.庆阳市董志塬水土保持对策研究[J].西北农林科技大学学报:社会科学版,2012,12(02):67-72.
- [19] WU H, QIAN H. Innovative Trend Analysis of Annual and Seasonal Rainfall and Extreme Values in Shanxi, China, since the 1950s[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37.
- [20] 张京,金晓媚,张绪财,等.格尔木河流域土壤湿度时空变化及其影响因素研究[J].水文地质工程地质,2019,46(02):66-73+91.
- [21] TORRENCE C, COMPO G P. A Practical Guide to Wavelet Analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1):61-78.
- [22] 郝立生,李新,李月英.太阳活动变化的小波分析[J].干旱气象,2006(04):17-21.
- [23] 李森,夏军,陈社明,等.北京地区近300年降水变化的小波分析[J].自然资源学报,2011(6):1001-1011.
- [24] 张建云,刘九夫,金君良,等.青藏高原水资源演变与趋势分析[J].中国科学院院刊,2019,34(11):1264-1273.

(责任编辑 周雪梅)