

延安市近60年降水时空特征分析

何庆龙^{1,2}, 周维博^{1,2}, 夏伟^{1,2}, 李文溢^{1,2}

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西西安710064;

2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西西安710064)

摘要: 为提高对延安市降水时空特征的认识, 利用延安市境内15个雨量站1956-2015年的降水资料, 运用滑动平均法、累计距平法、*R/S*分析法、Mann-Kendall检验法和小波分析法分析了研究区降水的年内空间分布特征和年际空间变化特征。结果表明: 研究区降水年内分布极不均匀, 主要集中在汛期(6-9月), 汛期降水占全年降水的70%; 年降水呈“增-减-增”的波动减少趋势, 减少幅度约8 mm/10a, 于1969年出现突变, 且降水序列变化具有正持续性; 降水序列具有31 a尺度的第一主周期, 由15 a尺度的周期特征预计未来几年降水量呈减少趋势; 降水空间分布不均, 呈“东南多, 西北少”的特征, 年降水量差值超过130 mm; 绝大部分地区降水量呈下降趋势, 下降幅度最大的区域为志丹县西南部, 南部黄龙山区降水量略微增长。

关键词: 降水; 时空特征; *R/S*分析法; Mann-Kendall检验; 小波分析; 延安市

中图分类号: TV125

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)01-0031-07

Spatial-temporal characteristics about precipitation of Yan'an City in the past 60 years

HE Qinglong^{1,2}, ZHOU Weibo^{1,2}, XIA Wei^{1,2}, LI Wenyi^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The aim of the research is to improve the understanding of the temporal and spatial characteristics about precipitation in Yan'an. The annual and spatial distribution characteristics, the interannual and spatial variation characteristics of precipitation are analyzed based on precipitation data from 15 rainfall stations in Yan'an from 1956 to 2015. The methods, such as a moving-average, accumulative anomaly, *R/S* analysis, Mann-Kendall test and wavelet analysis, are used here. The results show that: the annual distribution of precipitation in Yan'an is extremely uneven, precipitation is mainly concentrated in the flood season (June to September), and the precipitation in flood season accounts for 70% of the whole year precipitation; the annual precipitation shows a decreasing trend of “increase-decrease-increase” fluctuation, whose decline rate is about 8mm/10a, and the annual precipitation changed abruptly in 1969 and the sequence of precipitation has a positive continuity; the first main period of annual precipitation change is 31 years, and it can be forecasted that precipitation of Yan'an in the next few years will decrease according to the periodic feature of 15-year scale; the spatial distribution of precipitation in Yan'an is uneven, which is characterized by “the southeast is more, and the northwest is less”, and the difference value is more than 130mm. The precipitation in most areas of the city has been declining, the area which declined most quickly is the southwest of Zhidan County, while the precipitation in the south of Huanglong mountain area increased slightly.

Key words: precipitation; spatial-temporal characteristics; *R/S* analysis; Mann-Kendall test; wavelet analysis; Yan'an City

收稿日期: 2017-09-02; 修回日期: 2017-09-25

作者简介: 何庆龙(1993-), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 周维博(1956-), 男, 陕西乾县人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源、水环境及节水灌溉。

1 研究背景

水资源短缺问题日益成为影响、制约人类生产生活和经济社会发展的重要因素。降水作为水文循环的重要环节,是水资源的直接来源,区域降水量的多少及其时空分布很大程度上决定该地区的水资源量^[1]。随着气候变化和人类活动的影响,降水量在时空分布上发生了不同程度的变化。因而,降水时空特征研究也受到了广泛关注^[2-7]。

延安市位于我国西北地区,地处干旱半干旱区,深居内陆,降水稀少,蒸发强烈,水资源短缺问题较为严峻。延安市亦位于黄土高原丘陵沟壑区,境内河流均属黄河水系,是黄河重要的产沙区;降水作为黄土高原区最重要的侵蚀动力,降水的年内、年际变化会对水土流失产生重要影响^[8];由于黄土本身的特性,降水也与区内滑坡、泥石流等地质灾害密切相关^[9-10]。因此,分析研究延安市的降水时空特征对区内水资源的可持续开发利用、水土保持工作和地质灾害预防等具有重要意义。

据彤军等^[8]利用小波分析对延安市近50年来的降水时间特征及趋势变化进行了研究,进而对未来降水量进行预测;李斌等^[11]根据延安站近62年的降水历史资料,应用滑动平均法、距平分析法分析了其变化趋势和年内分布特征,并根据354个测站的实时数据,以2013年7月特大暴雨为典型暴雨分析了该区暴雨的时空分布特征;马荣^[12]选用枣园水文站的降水资料,利用累计距平法、滑动 t 检验法和Mann-Kendall突变检验法分析了近45年来延安市春、夏、秋、冬、年均5个时域降水的变化趋势和突变特征。综上所述,以往对延安市降水时空特征的研究不多,或针对一个站点,或着重通过小波分析研究其周期性趋势特征进而对未来降水量进行预测。本文根据延安市15个站点1956-2015年的降水实测资料,对其近60年来的降水时空特征进行了分析,以期提高对延安市降水时空特征的认识,为研究区水资源的可持续开发利用、水土保持和地质灾害预防提供参考。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

延安市位于陕北南部(35°21'~37°31'N, 107°41'~110°31'E),处于黄土高原丘陵沟壑区,区内沟壑纵横,平均海拔1200m左右,河网较多,水土流失严重(图1)。该区属高原大陆性季风气候,多年

平均降水量略超过500mm,属半干旱半湿润区。

2.2 资料来源

本文根据《延安市水文手册》和中国气象数据网的降水资料选取区内分布较为均匀、资料比较完整的15个站点(图1),收集其1956-2015年的降水资料,基本能够反映该区的降水时空特征。对于降水资料缺测的站点,采用邻近且相关性较好的测站实测资料进行回归插补。

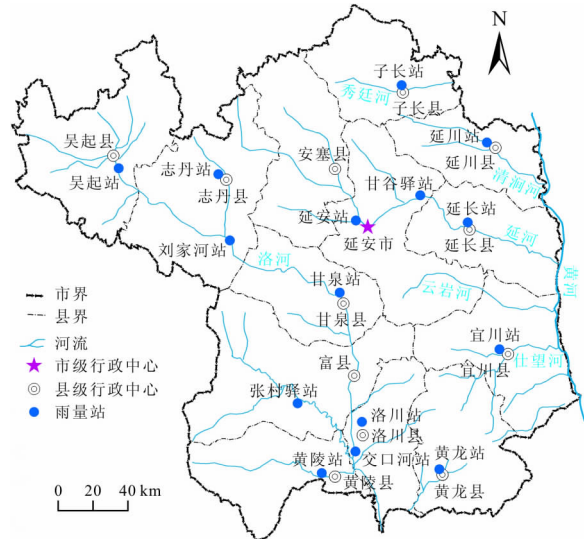


图1 研究区概况

3 研究方法

首先通过延安市15个站点1956-2015年的月平均降水量资料分析了延安市降水年内分布特征;然后根据15个站点的年平均降水量数据,通过趋势线法、滑动平均法、累计距平法多种方法对比分析其年际变化趋势,通过 R/S 分析法^[13]对其变化趋势的持续性进行分析,利用Mann-Kendall趋势检测^[14]及改进的Mann-Kendall突变检验法^[15]对变化趋势进行检验并分析突变点,利用小波分析方法^[14]分析时间序列不同尺度的周期性特征,并根据时间域中的分布判断不同时间尺度上时间序列的趋势变化;最后通过各站点的多年平均降水量和 R/S 分析、Mann-Kendall趋势检测^[14]的结果,运用克里金差值法分别分析区内降水分布和趋势变化的空间差异性。

3.1 R/S 分析法^[13]

R/S 分析是用来分析时间序列的分形特征和长期记忆过程的一种基本方法。其基本思想为:给定一个时间序列,计算相应时间跨度序列的极差 R 和标准差 S ,并计算两者比值 R/S ,若 R/S 值随时间跨度的变化表现出幂指数分布趋势,那么相应的幂指数

就是 Hurst 指数。

对于一个时间序列 $\{T(i)\}, i = 1, 2, 3, \dots$, 对于任意正整数 $n \geq 1$, 其均值为:

$$\overline{T_n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T(i) \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

时间累计离差为:

$$X(i, N) = \sum_{k=1}^i (T(k) - \overline{T_n}) \quad (1 \leq i \leq N) \quad (2)$$

时间序列极差为:

$$R(n) = \max_{1 \leq i \leq n} X(i, N) - \min_{1 \leq i \leq n} X(i, N) \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

时间序列标准差为:

$$S(n) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T(i) - \overline{T_n})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (4)$$

则二者比值 $R(n)/S(n) = R/S$, 幂指数函数进行拟合, 即:

$$R/S = a \left(\frac{n}{2} \right)^H \quad (5)$$

式中: H 为 Hurst 指数的简称。

根据 Hurst 指数可以判断时间序列的持续性: 当 $H = 1$, 称为完全预测围, 即序列将围绕均值发生持续性的变化; 当 $0.5 < H < 1$, 表明时间序列的变化具有正持续性, 即未来趋势与历史趋势相一致, H 越大, 持续性越强, 跟以往关系越密切; 当 $H = 0.5$, 时间序列的变化既不是正持续也不是负持续, 是完全随机的; 当 $0 < H < 0.5$, 表明时间序列变化具有负持续性, 即未来趋势与历史趋势相反, H 越趋近于 0, 其相反的趋势越强。

3.2 Mann - Kendall 检验法^[14-15]

Mann - Kendall 检验法是一种非参数统计检验方法, 其不受少数异常值的干扰, 也不需要样本遵从一定的分布, 目前广泛用于水文序列的趋势检验和突变分析。

Mann - Kendall 趋势检测法中, 对于 n 个样本量的时间序列 x , 构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

其中:

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (7)$$

可知, 秩序列 S_k 为第 i 时刻数值大于 j 时刻值个数的累计值。在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (8)$$

式中: $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$ 分别为 S_k 的均值和方差。

若 $UF_1 = 0$, UF_i 为标准正态分布; 若 $UF_i > 0$, 则序列在第 i 时刻呈上升趋势; 若 $UF_i < 0$, 则序列在第 i 时刻呈下降趋势。给定显著性水平 α , 查正态分布表可得 $U_{\alpha/2}$, 若 $|UF_i| > |U_{\alpha/2}|$, 则在显著水平 α 下, 序列具有显著的趋势变化。序列变化趋势的大小可用趋势系数 β 表示, 其计算方法为:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_i - x_j}{i - j} \right) \quad \forall j < i \quad (9)$$

式中: $1 < j < i < n$, n 为统计的年数; median 为取中位数函数。若 $\beta > 0$, 则整个序列呈上升趋势, β 值即为序列上升趋势的程度; 反之, 序列呈下降趋势。

Mann - Kendall 突变检验法中, 将时间序列 x 逆序, 按公式(8) 计算, 同时使:

$$\begin{cases} UB_k = -UF_k & (k = 1, 2, \dots, n) \\ k = n + 1 - k \end{cases} \quad (10)$$

如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线相交, 且交点位于两置信水平线之间, 那么交点对应时刻就是突变开始时刻。但实际上用上述方法检验突变点时, 有时会检测到很多突变点, 有些点不是突变点, 因此需对杂点进行去除, 这里采用改进的 Mann - Kendall 突变检验法来排除杂点。首先按 Mann - Kendall 突变检验法进行计算, 找出所有突变点; 然后按公式(8) 计算, 同时使:

$$\begin{cases} UB_k = -\alpha UF_k & (k = 1, 2, \dots, n) \\ k = n + 1 - k \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\alpha \in [0.5, 1.5]$ 。取任意 α 值代入公式(11) 计算并作图, 如果原来的交点是突变点, 则 UF_k 和 UB_k 两条曲线仍会相交, 且交点位于两置信水平线之间。

3.3 小波分析^[14]

小波分析是一种基于加窗傅里叶变换局部化思想基础上产生的窗口大小固定、形状可以改变的时频局部分分析方法。将任意 $L^2(R)$ 空间中的函数 $f(t)$ 在小波基函数下展开, 其表达式为:

$$W_f(a, b) \leq f(t) \quad \Psi_{a,b}(t) \geq \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (12)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数, 与尺度伸缩因子 a 和时间平移因子 b 有关; 通过小波变换, 将一个一维信号在时间和频率两个方向上展开, 得到与时间和频率有关的小波系数, 进而绘制二维图像。 $\Psi_{a,b}(t)$

为分析小波函数。将公式(12)离散化为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Delta t \sum f(k\Delta t) \Psi\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (13)$$

选用复值 Morlet 小波作为母小波函数,其表达式为:

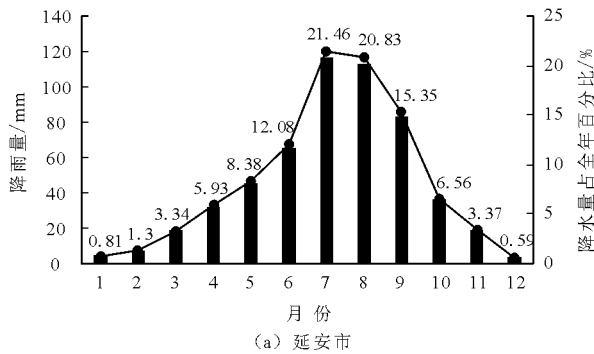
$$\Psi(t) = e^{i\omega t} (e^{-t^2/2} - \sqrt{2}e^{-\omega^2/(4-t^2)}) \quad (14)$$

Morlet 小波变换的模和实部是两个重要变量,模的大小表示时间尺度的强弱,实部表示不同时间尺度信号在不同时间上的分布和位相两方面信息。不同时间尺度下的小波系数能够反映时间序列在对应时间尺度下的变化特征,小波系数的绝对值越大,该时间尺度下的变化愈显著,峰值处对应的时间尺度即为该序列的主要周期,小波系数正负值的转折点即是相应的突变点。

4 结果分析

4.1 年内降水特征分析

通过对 15 个站点 1956-2015 年降水实测资料的整理,得到各站点月平均降水量分布情况,见图



2。由于站点分布较为均匀,可用各站点年内月平均降水量的平均值反映整个延安市的年内降水量分布情况。由图 2(a)可知:1956-2015 年延安市降水年内分配极不均匀,降水主要集中在 7、8 月,其次是 6、9 月,即通常定义的汛期,6-9 月降水量分别占全年降水量的 12.08%、21.46%、20.83%、15.35%,夏季降水占全年的 50%~60%,汛期降水占全年降水比例近 70%,冬季降水极少,只占全年的不到 3%;从年内趋势来看,1-6 月份降水量缓慢增加,6、7 月间增长显著,于 7 月达到峰值,9、10 月间快速下降,12 月最小。根据各雨量站点 1956-2015 年汛期降水量和年降水量资料得各雨量站点年内降水分布见图 2(b),由图 2(b)可知:各站点间多年平均降水量存在明显差异,降水量最大的为洛川站,为 604.86 mm,降水量最小的为吴起站,只有 472.60 mm;各站点降水量年内分布均较为集中在汛期,汛期降水量占全年降水量比例均在 70%左右,其中张村驿站降水量集中程度稍弱,汛期降水占全年的比例为 60.8%。

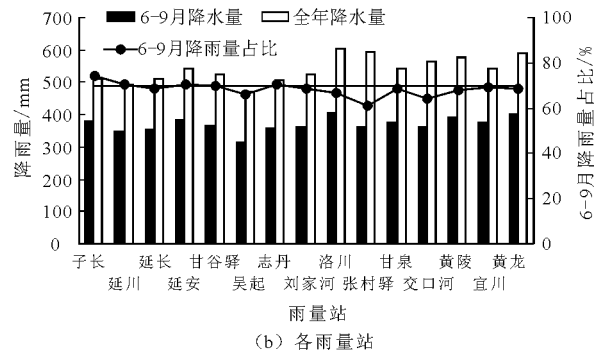


图 2 延安市降水量的年内分配特征

4.2 年际降水特征分析

4.2.1 年降水量变化趋势分析 由于所选 15 个站点较为均匀地分布于整个研究区,因此可用 15 个站点的某年降水量平均值表示该年延安市的整体降水水平。根据延安市 15 个站点 1956-2015 年降水序列可得延安市整体降水量序列,利用线性趋势法、滑动平均法、累计距平法对延安市降水量变化趋势进行分析,见图 3。

由图 3(a)可以看出,延安市全区平均降水量年际波动较大,最大值出现在 1964 年,达到了 789.01 mm,最小值 1997 年,为 343.86 mm,1964-1965 年降水量减小最为明显,其次为 2003 到 2004 年,1957 到 1958 年增长最为明显。由降水变化趋势线可知 1956-2015 年延安市降水整体呈减少趋势,降水倾

向率为 $-7.356 \text{ mm}/10\text{a}$,多年平均降水量约 540 mm。由 5 年滑动平均线可知,延安市降水量整体呈“增-减-增-减-增”的波动减少趋势,20 世纪 50 年代中期到 60 年代中期降水量有所增加,此后近 10 年降水量明显减少,70 年代中期降水量开始有所增加,80 年代中期降水开始转少,直至 20 世纪末,降水量虽有所波动,但整体呈减小趋势,进入 21 世纪后,延安市降水量明显增加。20 世纪 80 和 90 年代正值国内经济社会的飞速发展期,人类活动引起的全球气候变化和当地自然环境的变化可能是降水减少的部分原因;21 世纪开始降水量有所增加,这既是降水量波动的正常趋势,但笔者认为这与从 1999 年开始延安市大力开展的“退耕还林”工作也有密切关系,据陕西省农业遥感中心提供的数据显

示,延安的植被覆盖度由 2000 年的 46% 提高到 2014 年的 67.7%,关于延安市降水量与下垫面植被覆盖的相关性分析有待以后研究。由以上分析,延安市降水存在一个以 15 a 左右为一个增(减)阶段的波动趋势,具有一定的周期性。

图 3(b) 为延安市降水量距平值及累计距平值变化,一段曲线整体增减趋势可以反映出对应时间段内降水量整体水平相对于多年平均降水水平的多少情况。从图 3(b) 可以看出:延安市于 20 世纪 50 年代中期进入一个持续到 80 年代中期的多雨期,期间经历了短暂的 5 a 少雨期,于 1985 年进入一个少

雨期,少雨期从 80 年代中期一直持续到 21 世纪初,这与王艳姣等^[16]的西北东部地区降水从 1985/1986 年开始由偏多转为偏少的结论相同。

为表明延安市降水量未来一段时间的变化趋势,利用 R/S 分析法对延安市 1956 - 2015 年的降水序列进行分析,计算得延安市近 60 年降水序列的 Hurst 指数 $H = 0.634 > 0.5$,表明延安市年降水量序列未来的变化趋势还将延续过去的变化趋势,具有正持续性,即在未来一段时间内,若气候变化和人类活动等外部影响条件按现趋势发展,延安市年降水量整体上仍将呈现波动减少的变化趋势。

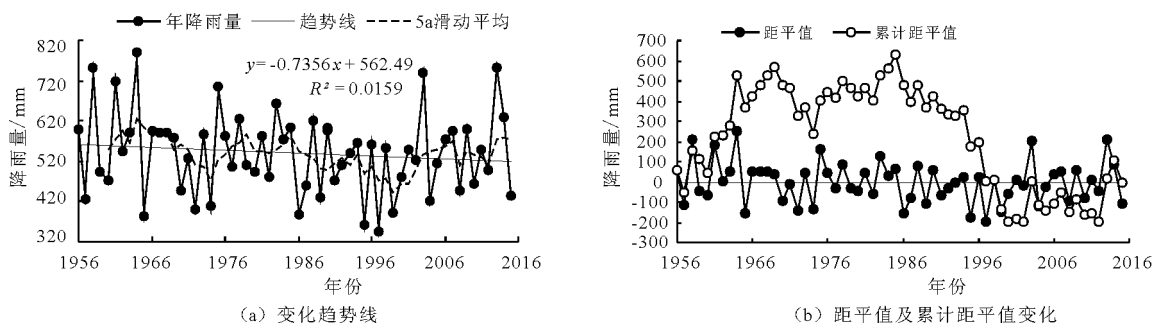


图 3 延安市降水量年际变化趋势

4.2.2 年降水突变分析和周期分析 对延安市 1956 - 2015 年降水序列,利用 Mann - Kendall 检验进行趋势分析和突变检验,见图 4(a)。由图 4(a) 中 UF_k 曲线的变化趋势可知,延安市降水整体呈下降趋势,进一步计算趋势系数 β 为 $-8.83 \text{ mm}/10\text{a}$,这与利用线性趋势线计算的 $-7.356 \text{ mm}/10\text{a}$ 的减少趋势结果相近,因而近 60 年延安市降水的减少倾向率约为 $8 \text{ mm}/10\text{a}$,20 世纪 60 年代中期到 70 年代中期下降趋势明显,80 - 90 年代呈波动下降趋势,这也与滑动平均的增减趋势结果一致; UF_k 曲线在 2000 年超过了显著水平 0.05 临界线,表明降水下降

趋势显著; UF_k 和 UB_k 曲线于 1956 - 1957 年、1957 - 1958 年、2013 - 2014 年、2014 - 2015 年之间相交,且于 1969 年也相交于一点,可知有些交点可能为杂点,利用改进的 Mann - Kendall 突变检测法对可能的杂点进行排除:令 $a_1 = 1.5, a_2 = 0.5$,做曲线 $1.5UB_k, 0.5UB_k$,3 条 UB_k 曲线与 UF_k 曲线的共同交点即为真正突变点,由图 4(a) 可知,3 条 UB_k 曲线与 UF_k 的共同交点只有 1969 年,即 1969 年为延安市降水序列的突变点,且为下降突变点,突变前年降水量为 577.86 mm,突变后年降水量为 449.11 mm,减少了 128.75 mm。

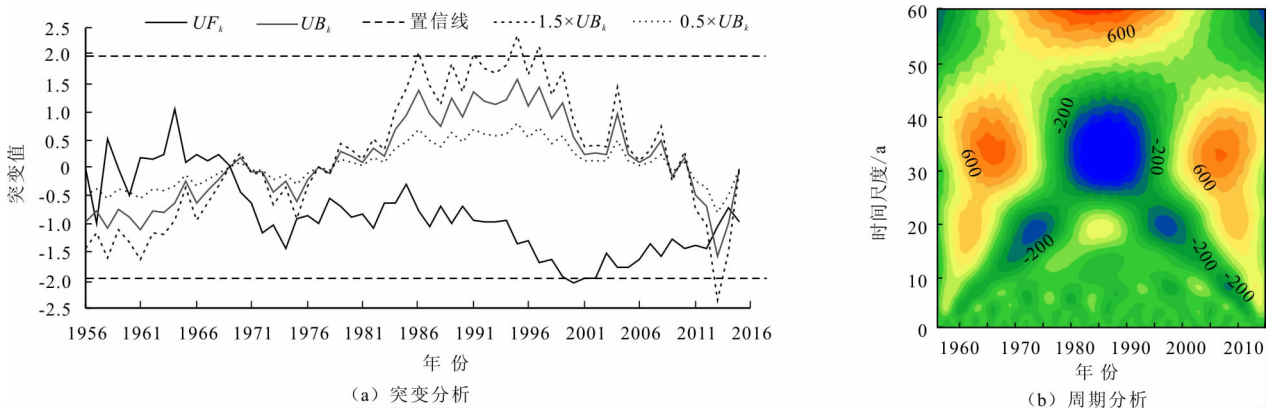


图 4 延安市年降水量突变分析及周期分析

通过小波分析对延安市 1956 - 2015 年的年降水序列进行周期分析见图 4(b), 由图 4(b) 可知: 延安市年降水量在 30 ~ 35 a、15 ~ 20 a 的时间尺度上存在周期性, 其中 30 ~ 35 a 尺度的震荡最强且贯穿整个序列, 进一步计算小波方差, 表明 31 a 的时间尺度为降水序列的第一主周期, 其次是 15 a 的时间尺度; 在 31 a 的尺度上, 年降水量经历了“增 - 减 - 增”的变化规律; 在 15 a 的尺度上, 周期较稳定, 经历了“增 - 减 - 增 - 减 - 增”的变化趋势, 1968 - 1969 年为由增到减的突变年份, 这与 Mann - Kendall 突变检验突变结果相同; 2012 - 2015 年属于降水偏多期, 根据延安市降水的周期性规律, 也能得到未来几年延安市降水量将会呈减少趋势。

4.3 降水空间特征分析

4.3.1 年降水量分布空间差异性 根据 1956 - 2015 年延安市的年降水量, 利用 Surfer12 进行克里金插值, 得到延安市多年降水量等值线图如图 5 所示。由图 5 可知: 延安市降水整体上由南向北递减, 主要呈现“南多北少”的分布特征, 年降水量空间差异显著, 降水量最大的中心区域为南部洛川县和黄龙县境内的黄龙山区, 多年平均降水量超过 600 mm, 降水量最小区域为吴起县西北部一带, 多年平均降水量仅 470 mm 左右, 两区域降水量差值近 130 mm。

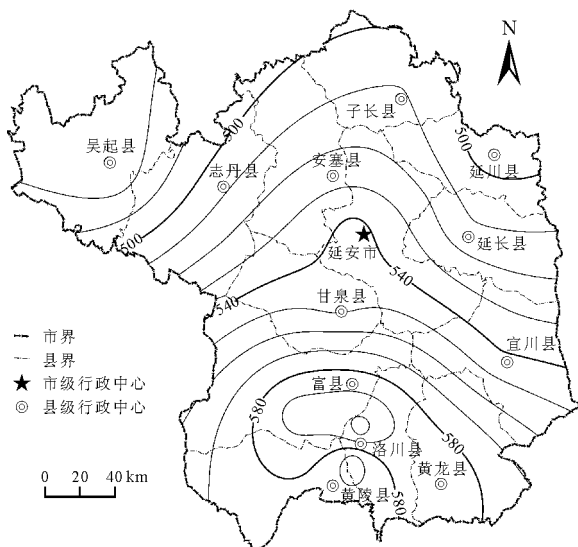


图 5 延安市降水量分布空间差异(单位: mm)

4.3.2 年降水量变化趋势空间差异性 对延安市 15 个雨量站点 1956 - 2015 年的年降水量序列进行 R/S 分析和 Mann - Kendall 趋势分析, 分析其变化趋势和趋势的持续性, 如表 1。

表 1 延安市各雨量站点年降水 Mann - Kendall 趋势分析及 Hurst 指数

雨量站点	增减趋势	增减显著性	趋势系数 $\beta / (\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1})$	Hurst 指数
子长	减	不显著	-4.58	0.612
延川	减	显著	-0.13	0.770
延长	减	显著	-10.55	0.636
延安	减	不显著	-6.85	0.612
甘谷驿	减	不显著	-1.00	0.609
吴起	减	不显著	-6.32	0.625
志丹	减	不显著	-12.89	0.646
刘家河	减	显著	-19.84	0.769
洛川	减	不显著	-11.61	0.588
张村驿	减	显著	-15.81	0.649
甘泉	减	不显著	-5.17	0.650
交口河	增	不显著	2.37	0.558
黄陵	增	不显著	2.27	0.571
宜川	减	显著	-9.64	0.724
黄龙	减	显著	-9.76	0.683

由表 1 可知: 该区降水量整体呈减小趋势, 但个别站点呈增加趋势, 各站点间增减幅度也有所差异; 延川站、延长站、刘家河站、张村驿站、宜川站和黄龙站降水量呈减少趋势, 且减少趋势超过了 0.05 的显著性水平, 交口河站、黄陵站降水量呈增长趋势, 但趋势不显著, 其余各站均为减少趋势, 趋势不显著; 延长站、志丹站、刘家河站、洛川站、张村驿站减少幅度超过了 10 mm/10a, 交口河站、黄陵站增长幅度都不大, 仅为 2 mm/10a 左右; 15 个站点降水量序列的 Hurst 指数均大于 0.5, 表明在外界环境要素按现趋势发展的条件下, 降水量未来变化趋势还将延续过去的变化趋势。

为了更为直观地反映降水量变化趋势的空间差异性和未来变化趋势, 根据各站点降水量序列的趋势系数 β , 利用 Surfer12 对整个研究区进行克里金差值, 得到延安市降水变化趋势空间差异图, 如图 6 所示。由图 6 可知: 该区绝大部分区域降水量有所下降, 减少幅度最大的中心区域为志丹县西南部, 超过了 15 mm/10a, 只有南部黄龙山区小部分区域略有上升, 可能是由于南部黄龙山区植被茂密, 受人类活动影响较小, 降水量变化不大。

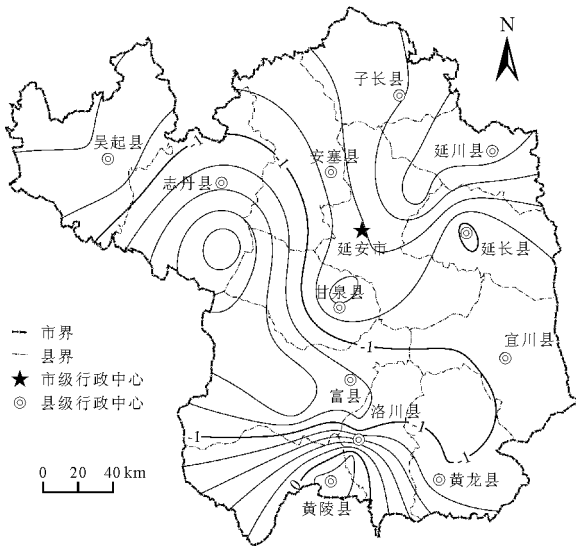


图 6 延安市降水量变化趋势空间差异

5 结论与讨论

(1)延安市降水年内分配极不均匀,主要集中在汛期(6-9月),汛期降水量占全年降水量近70%;6、7月份降水量增长显著,7月最为集中,占全年降水量的20%以上,9、10月间快速下降,12月份最少。降水量较为集中于夏季,易发生强度大、历时短的暴雨天气,建立雨水收集系统、建设新型海绵城市,对缓解区内水资源短缺和季节性缺水十分必要。

(2)1956-2015年延安市降水量整体上呈“增-减-增-减-增”的波动减少变化趋势,减少幅度约为8 mm/10a,降水量具有以15 a左右为一个增(减)阶段的波动变化,降水从1985/1986年开始由偏多转为偏少;延安市降水减少突变年份为1969年,突变前后年降水量相差128.75 mm;延安市降水量序列在中大尺度上表现为较为稳定的周期变化,第一主周期为31 a的时间尺度,根据15 a年尺度的波动趋势,预计未来几年降水量将会有所减小。由于地处黄土高原区,暴雨极易引发滑坡、泥石流等地质灾害,对区内暴雨的研究和预测对于减轻区内相关自然灾害的危害乃至预防灾害的发生都具有重要意义。

(3)延安市降水量在分布上整体呈现“东南多、西北少”的特征,空间差异显著,降水量最大的中心区域为南部洛川县和黄龙县境内的黄龙山区,降水量最小区域为吴起县西北部一带,两区域年降水量

差值超过130 mm,此外,在东北部延川县境内也存在一个降水量偏少的副中心;变化趋势上,只有南部黄龙山区小部分区域降水量略有上升,增幅约为2 mm/10a且趋势不显著,延安市绝大部分地区降水量呈下降趋势,减少幅度最大的为志丹县西南部,超过了15 mm/10a。

参考文献:

- [1] 王小军,贺瑞敏,尚煜廷. 榆林市降水时空变化规律研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(5):103-108.
- [2] 常肖杰,沈冰,黄领梅. 1976-2010年榆林市降水时空变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):30-35.
- [3] 宋扬,周维博,马亚鑫,等. 50年来渭河流域降水变化特征分析[J]. 长江科学院院报,2017,34(7):12-18.
- [4] 王晖,隆霄,马旭林,等. 近50a中国西北地区东部降水特征[J]. 干旱区研究,2013,30(4):712-718.
- [5] 张文纲,李述训,庞强强. 青藏高原40年来降水量时空变化趋势[J]. 水科学进展,2009,20(2):168-176.
- [6] 从辉,周维博,宋扬,等. 1970-2013年大西安地区降水时空变化特征分析[J]. 长江科学院院报,2017,34(8):18-23+29.
- [7] 徐盼盼,王海科,钱会,等. 铜川市降水变化及趋势预测分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(3):82-86+90.
- [8] 据彤军,石辉,胡庆. 延安市近50年来降水特征及趋势变化的小波分析研究[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(4):230-235.
- [9] 张乘千. 延安市降雨与黄土滑坡相关性分析[D]. 西安:长安大学,2014.
- [10] 吴晓娟. 延安地区泥石流(泥流)形成机理研究[D]. 西安:西北大学,2014.
- [11] 李斌,解建仓,胡彦华,等. 1951-2013年延安降水特征与典型暴雨分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(12):190-197.
- [12] 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.
- [13] 金保明. Kendall与R/S分析法在降雨特性分析中的应用[J]. 水力发电,2014,40(7):26-28.
- [14] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [15] 翟晓丽. 关中盆地降水变化趋势研究[D]. 西安:西安科技大学,2012.
- [16] 王艳姣,闫峰. 1960-2010年中国降水区域分异及年代际变化特征[J]. 地理科学进展,2014,33(10):1354-1363.