Analysis on the Precipitation in Multiple Scales in Xi'an of China

Xu Panpan, Yang Mi, Qian Hui

College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Shanxi, China

Email address:

xupanpan0212@163.com (Xu Panpan), myang1993@163.com (Yang Mi), 55480981@qq.com (Qian Hui)

To cite this article:

Xu Panpan, Yang Mi, Qian Hui. Analysis on the Precipitation in Multiple Scales in Xi'an of China. *Earth Sciences*.

Vol. 4, No. 5, 2015, pp. 193-200. doi: 10.11648/j.earth.20150405.15

Abstract: Based on the data of precipitation from 1951 to 2014 in Xi'an, Shanxi Province, China (hereinafter referred to as Xi'an), after analyzing the characteristics of changes in precipitation over the last 64 years, the multiple scale analysis of annual precipitation and flood season precipitation are analyzed by wavelet analysis in Xi'an. The conclusions are as follows: (1) Flood season precipitation accounts for 79.32% of annual precipitation, and the correlation coefficient is 0.94, so, the contribution of precipitation in flood season to annual precipitation is very great. (2) Annual precipitation and flood season precipitation shows a decreasing trend, with a decreasing rate of -11.3mm/10a and -3.17mm/10a, respectively, which shows 72% of the annual precipitation decreases in the non flood season. (3) Annual precipitation sequence and flood season precipitation sequence have the similar main cycle in Xi'an. Their first main periods are 29 years and 31 years, respectively, and the second, the third, the fourth main cycles all are 13 years, 6 years and 3 years. (4) Over any time scale, the annual precipitation and the precipitation in flood season will be into a less period after 2014. Since the oscillation intensities of the first and the second main cycles of annual precipitation is basically same, the possibilities of the less period of annual precipitation continuing to 2020 or 2017 are the same. However, the oscillation intensity of the first main cycle of precipitation in flood season is much greater than that of the second main cycle, so the probability of the less period of precipitation in the flood season is more likely to continue to 2020 than 2017.

Keywords: Annual Precipitation, Precipitation in the Flood Season, Wavelet Analysis, Xi'an of China

中国西安市降水多时间尺度分析

徐盼盼, 杨咪, 钱会

环境科学与工程学院, 长安大学, 西安, 中国

邮箱

xupanpan0212@163.com (徐盼盼), myang1993@163.com (杨咪), 55480981@qq.com (钱会)

摘要: 基于1951—2014年中国陕西省西安市(以下简称西安市)的降水资料,在分析了64年西安市降水量变化特征的基础上,利用小波分析法对西安市年降水量和汛期降水量进行多时间尺度分析。结果表明:(1)汛期降水量占年降水量的79.32%,且两者的相关系数为0.94,表明汛期降水量对年降水量的贡献很大。(2)年降水量与汛期降水量均表现出减少的趋势,倾向率分别为-11.3mm/10a和-3.17mm/10a,说明72%的年降水量减少集中在非汛期。(3)西安市年降水序列与汛期降水序列具有相似的主周期,第一主周期分别为29年和31年,第二、第三、第四主周期都是13年、6年和3年。(4)在任何时间尺度上均显示年降水量与汛期降水量在2014年以后都进入偏少期。由于年降水量的第一、第二主周期振荡强度基本一样,所以年降水量的偏少期持续到2020年和2017年的可能性相同;但是汛期降水量的第一主周期的振荡强度远大于第二主周期的振荡强度,所以汛期降水量偏少期的可能性持续到2020年比2017年大。

关键词: 年降水量, 汛期降水量, 小波分析, 中国西安市

1. 引言

降水量的多寡决定了一个地区水资源的丰富程度。中国降水主要有以下特点：空间分布不均匀，东富西贫；年总降水量比全球平均降水量少22%；季节及年际变化大，旱涝灾害频繁[1-2]，所以对一个地区降水的研究显得十分重要。降水属非平稳随机水文现象，降水时间序列具有趋势性、周期性和平稳随机性等多项特征[3]，用单一尺度的成分并不能够准确地模拟出降水时间序列的内在结构[4]。对于降水多时间尺度周期性的变化及其突变性分析，传统的傅里叶法不能分析出多时间尺度的特征[5]；Yamamoto方法给出的突变区宽度太大[6]；Mann-Kendall方法虽然能给出突变点和相突变区，但忽略了除突变外的所有信息[6]；然而小波分析法在时-频域上同时具有局部化特征和多分辨功能，对处理非平稳水文序列具有独特的优点，能从时域和频域上精确揭示信号细微的时频变化特征，所以小波法在中国各个地区降水研究中倍受青睐[7-9]。张代青，梅亚东，杨娜等[3]通过对中国大陆近54年降水量变化规律的小波分析得出小尺度的丰、枯交替变化嵌套在大尺度较为复杂的丰、枯结构中，大、小尺度间具有“相同者有小反、不同者有大反”的嵌套规律。王澄海，崔洋[10]对中国西北地区近50年降水周期的稳定性分析的研究表明西北地区的降水随时间变化具有多平衡态和非周期性振荡的特点。董婕等[11]利用小波分析和距平分析法，研究分析了近50年来中国陕西省榆林、西安、安康气候的总体变化特征和变化趋势，揭示了3个城市气温和降水变化的多时间尺度的结构以及不同时间尺度下的变化周期和突变特点。

随着社会经济的发展，西安市人口、城市建设规模日益扩大，再加上在全球气候变暖、降水减少的背景下，西安市的降水特点也发生了明显的变化，因此对西安市降水特征变化分析已经成为如何充分利用降水资源促进现代农业发展的新研究方向的前提。邓芳莲[12]利用1951—2007年西安国家气象观测站二级站的月降水量资料研究表明：西安年降水量总体呈下降趋势，且20世纪90年代降水递减趋势明显。杨新[13]用日降水量概率累积图的形式分析西安市不同等级降水量频率的年代和季节变化特点。周正朝，胡娜娜，周华[14]研究表明西安市春、夏、秋季降水与气温有较好的相关性。沈姣姣等[15]在西安市汛期不同等级降雨量和降雨日演变规律的研究基础上，对其未来演变趋势做出预测。

对于西安市降水特征变化规律的研究，以往的侧重点基本都是对年、季节和汛期降水量的线性变化趋势、突变分析和周期变化分析等，很少将年降水量与汛期降水量的多时间尺度进行对比分析及其相关性分析统一起来进行研究。因此，本文在利用线性趋势法、多项式（六项式）拟合法和距平法，对西安市年降水量和汛期降水量变化特征分析的基础上，再利用小波分析法进一步对其进行多时间尺度周期变化分析，揭示了年降水量与汛期降水量的变化既有一致性又有差异性，也预测了未来西安市年降水与汛期降水的变化趋势。这不仅为西安市

降水资源合理利用、旱涝趋势的预测和蓄洪抗旱的研究提供依据，重要的是对该地区农业现代化发展有指导性的现实意义。

2. 研究区概况

西安市位于关中平原腹地，八百里秦川中部的渭河两岸，是西北地区第一大城市，陕西省的政治、经济、文化和科教中心。西安市地理位置为北纬 $33^{\circ}39'$ — $34^{\circ}45'$ ，东经 $107^{\circ}40'$ — $109^{\circ}49'$ ，面积约10108km²。地形南高北低，呈阶梯结构，从南向北依次排列着秦岭山地、黄土丘陵沟壑，黄土台塬、山前冲洪积扇，渭河及其支流冲击平原。西安市属于暖温带半干旱、半湿润大陆性季风气候，年平均气温 13.0°C — 13.7°C ，最冷1月份平均气温 -1.2°C — 0.0°C ，最热7月份平均气温 26.3°C — 26.6°C ，年降水量为312.2mm—903.2mm，空间分布为由北向南递增。

3. 资料与研究方法

3.1. 资料

选用中国陕西省西安市气象观测站（ $108^{\circ}56'E$ 、 $34^{\circ}18'N$ 、海拔397.5m）1951—2014年降水资料，对降水初步分析的基础上再利用Morlet小波法对西安市的降水进行多尺度分析。

3.2. 研究方法

利用小波变换对西安市降水进行多时间尺度分析，首先对数据进行距平处理，然后利用小波函数进行小波变换，计算小波系数的模平方和实部。本文选用的是Morlet小波，因为Morlet小波的实部和虚部之间有 $\pi/2$ 的位相差，它的模可以消除小波本身的振荡，而且从小波变换系数中可以分离出模和位相，不但能给出能量密度，还可以发现信号的奇异性 and 瞬时频率[16]。

(1) 小波函数是具有震荡性、能够迅速衰减到零的一类函数，即小波函数 $\psi(t) \in L^2(R)$ 且满足[16-18]：

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

式中， $\psi(t)$ 为基小波函数，它可通过尺度的伸缩和时间轴上的平移得到：

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \text{ 其中, } a, b \in R, a \neq 0 \quad (2)$$

式中： $\psi_{a,b}(t)$ 为子小波； a 为尺度因子，反映小波的周期长度； b 为平移因子，反应时间上的平移。

由于降水序列是离散的，若取样时间间隔为 Δt ，样本容量为 N ，则对于能量有限信号 $f(t) \in L^2(R)$ ，所以采用离散小波变换的形式：

$$W_f(a,b)=|a|^{-1/2}\Delta t\sum_{k=1}^Nf(k\Delta t)\overline{\psi}\left(\frac{k\Delta t-b}{a}\right)\tag{3}$$

式中： $W_f(a,b)$ 为小波变换系数； $\overline{\psi}(\frac{x-b}{a})$ 为 $\psi(\frac{x-b}{a})$ 的复共轭函数； $k=1,2,\cdots N$ 。在实际研究中，主要由小波变换方程得到小波系数，然后绘制其模平方等值线图和实部等值

线图，分析水文序列的周期交替规律并定性预测其未来的发展趋势。

(2) 将小波系数的平方值在 b 域上积分，就可得到小波方差[19]，即

$$Var(a)=\int_{-\infty}^{\infty}|W_f(a,b)|^2db\tag{4}$$

小波方差随尺度 a 的变化过程，称为小波方差图，它能反映信号波动的能量随尺度 a 的分布。因此，小波方差图可用来确定信号中不同种尺度扰动的相对强度和存在的主要时间尺度，即主周期。

4. 西安市降水基本特征分析

4.1. 西安市年降水量特征

通过对1951—2014年西安地区的降水序列分析可知，多年平均降水量为569.6mm，最大年降水量是1983年的903.2mm，最小年降水量是1995年的312.2mm，最大年降水量比最小年降水量多591mm，最大年降水量是年平均降水量的1.59倍，最小年降水量是年平均降水量的0.55倍，由此可见，西安地区的年际降水量分布不均匀。

由图1显示，西安市年降水量年际变化大，年降水量整体呈减少的趋势，其平均递减率为11.3mm/10a。为了说明年降水量距平特征，对其进行了6次非线性拟合，结果表明：1951—1965年、1975—1985年、2003—2011年降水偏多，1986—2002年、1966—1974年、2012—2014年降水偏少。

图1 1951—2014年西安市年降水量与年降水量距平变化。

4.2. 西安市汛期降水量特征

西安降水随季节变化明显，根据西安的气候条件，春季为3—5月，夏季为6—8月，秋季为9—11月，冬季为12月到次年2月，汛期为5—10月。西安市春、夏、秋、冬季历年平均降水量分别占年平均降水量的22.50%、41.07%、32.20%、4.23%，汛期历年平均降水量占年平均降水量的79.32%，对年降水量的贡献极大，年降水量很大程度上是由汛期的降水量决定的。由图2可知，西安市年降水量与汛期降水量的相关系数很高，为0.94，因此，对于年内降水量的分析，本文重点研究西安市汛期降水量的特征。

西安市汛期降水量多年平均值为451.8mm，最大汛期降水量为1983年的793.7mm，最小汛期降水量为1977年的220mm，最大汛期降水量是最小汛期降水量的3.61倍，可见汛期降水量在年际也分布不均匀。

由图3显示，西安市汛期降水量整体呈减少的趋势，其平均递减率为3.17mm/10a，是年平均递减率的0.28倍。对汛期降水量进行了6次非线性拟合，表明：1951—1962年、1978—1988年、2002—2012年降水偏多，1963—1977年、1989—2001年、2013—2014年降水偏少。说明汛期降水量对年降水量的贡献极大，但是其变化趋势与年降水量变化趋势不完全一致。

图2 西安市年降水量与汛期降水量散点分布和线性回归线。

图3 1951—2014年西安市汛期降水量与汛期降水量距平变化。

5. 西安市降水多尺度分析

小波系数的模方相当于小波能量谱，它可以分析出不同周期的震荡能量，所以降水序列在不同的时间尺度分辨率下表现出了不同的周期交替现象；小波系数实部等值线图能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，进而能判断在不同时间尺度上降水的未来变化趋势；小波方差图是用来确定降水演化过程中存在的主

周期;主周期趋势图反映了在不同的时间尺度下,降水存在的平均周期及丰枯变化特征[16]。

5.1. 年降水量多尺度分析

由图4知,24—32年时间尺度的能量最强,但它的周期变化具有局部性(1970年后);10—15年时间尺度能量较强,它的周期变化主要集中在1966—1996年,振荡中心为1983年;5—10年时间尺度也较强,周期分布也比较明显,几乎占据整个研究时域(1953—2010年),振荡中心为1964年、1995年和2003年左右;2—5年时间尺度主要集中在1951—1954年、1979—1985年、1993—1998年、2009—2014年,其振荡中心为1952年、1982年、1996年和2011年左右;其他时间尺度相对较弱。

由图5可知,24—32年时间尺度西安市年降水量出现了三次丰枯交替,在1970年以后表现较为明显,1981—1988年和2001—2009年为丰水期,振荡重心为1984年和2006年;1971—1980年、1989—2000年为枯水期,振荡重

心为1977年和1995年;2010—2014为枯水期且在2014年后负相位等值线还没完全闭合,所以从大尺度来说,未来可能会出现持续降水偏少的状况。10—15年时间尺度年降水量出现了7次的丰枯交替变化;5—10年的时间尺度的降水量在整个研究时域内主要经历了10次丰枯交替变化,但对于更小时间尺度,虽然也有丰枯交替变化,但表现得有些零乱。不论是何种时间尺度,西安市年降水量未来都可能会出现持续偏少的情况。

由图6可知,西安市年降水量的变化第一、二、三、四主周期分别为29年、13年、6年和3年。图7.a显示,在第一主周期29年特征时间尺度上,年降水量变化的平均周期为20年左右,大约经历了3个丰枯转换期;而在13年特征时间尺度上(图7.b),年降水量的平均变化周期为9年左右,大约7个周期的丰枯变化。所以,从29年时间尺度来说,年降水偏少期可能持续到2020年;从13年时间尺度来说,年降水量偏少期可能持续到2017年。

图4 西安市年降水量距平系列小波变换模平方等值线图。

图5 西安市年降水量距平系列小波变换实部等值线图。

图6 西安市年降水量距平系列的小波方差图。

图7 西安市年降水量距平系列不同时间尺度下的小波变化系数。

5. 2. 汛期降水量多尺度分析

由西安市汛期降水量距平系列小波变换模平方等值线图(图8)可知,分布与23—32年时间尺度的能量最强,与年降水量的周期变化基本一致;10—15年时间尺度能量较强,它的周期变化主要集中在1966—1996年,振荡中心为1977年;5—10年时间尺度周期变化集中分布在1978—2010年,振荡中心为1987年和2003年左右;2—5年时间尺度主要集中在1951—1954年、1978—1985年、1993—1998年、2002—2014年,其振荡中心为1952年、1982年、1996年和2009年左右;其他时间尺度相对较弱。

由图9可知,23—32年时间尺度西安市年降水量出现了三次丰枯交替,在1970年以后表现较为明显,1981—1988年和1999—2009年为丰水期,振荡重心为1984年和2003年;1971—1980年、1989—1998年和2010—201为枯

水期,振荡重心为1977年和1995年;10—15年时间尺度年降水量出现了7次的丰枯交替变化;5—10年的小时间尺度和更小的时间尺度都有丰枯交替变化,但表现较为零乱。不论是何种时间尺度,西安市汛期降水量未来都可能会出现持续偏少的情况。

由图10可知,西安市年降水量的变化第一、二、三、四主周期分别为31年、13年、6年和3年,且第一主周期的变化振荡能量明显远大于其它周期。图11. a显示,在第一主周期31年特征时间尺度上,年降水量变化的平均周期为20年左右,大约经历了3个丰枯转换期,在1970年以后表现较为明显。图11. b显示,在第二主周期13年特征时间尺度上,年降水量的平均变化周期为9年左右,大约7个周期的丰枯变化。汛期预测的降水偏少期与年将水偏少期是一致的,但是由于第一主周期的振荡远远大于其它主周期的振荡,所以汛期降水量可能持续到2020年的可能性更大。

图8 西安市汛期降水量距平系列小波变换模平方等值线图。

图9 西安市汛期降水量距平系列小波变换实部等值线图。

图10 西安市汛期降水量距平系列的小波方差图。

图11 西安市汛期降水量距平系列不同时间尺度下的小波变化系数。

5. 3. 年降水量与汛期降水量研究结果对比分析

根据4.1和4.2分析的结果可知，西安市年降水量与汛期降水量的变化既有一致性，又有差异性，其结果对比分析见表1。

表1 西安市年降水量与汛期降水量多时间尺度变化对比分析。

对比项目	年降水量	汛期降水量
主要振荡时间尺度	24—32年，集中在1970年以后；10—15年，集中在1966—1996年，振荡中心为1983年；5—10年，集中在1953—2010年，振荡中心为1964年、1995年、2003年。	23—32年，集中在1970年以后；10—15年。集中在1966—1996年，振荡中心为1997年；5—10年，集中在1978—2010年，振荡中心为1987年、2003年。
主要尺度的丰枯变化	24—32年，3次丰枯变化；10—15年，7次丰枯变化；5—10年，10次丰枯变化。	24—32年，3次丰枯变化；10—15年，7次丰枯变化；5—10年，虽有丰枯变化，但表现较为零乱。
主周期	第一、二、三、四主周期为29年、13年、6年、3年，且第一、二、三主周期振荡强度基本一样。	第一、二、三、四主周期为31年、13年、6年、3年，且第一主周期的振荡远远大于其它主周期的振荡。
趋势预测	在第一、第二主周期的特征时间尺度上，降水偏少期将分别持续到2020年和2017年。	在第一、第二主周期的特征时间尺度上，降水偏少期将分别持续到2020年和2017年，且持续到2020年的可能性更大。

6. 结论

1) 1951—2014年，西安市年降水量的平均值为569.6mm，最大、最小值分别为1983年的903.2mm和1995年的312.2mm，年际降水分布不均匀。年降水量的变化呈减少趋势，其平均递减率为11.3mm/10a；西安市汛期降水量的平均值为451.8mm，最大、最小值分别为1983年的793.7mm和1977年的220mm，在年际变化上分布不均匀。汛期降水量的变化呈减少趋势，其平均递减率为3.17mm/10a。

2) 西安市汛期降水量占年降水量的79.32%，且两者的相关系数为0.94，说明汛期降水量对年降水量的贡献很大。但是，汛期降水量的平均递减率是年降水量平均递减率的0.28倍，说明年降水量的减少主要是集中在非汛期。

3) 通过小波变换对西安市年降水量和汛期降水量进行多时间尺度分析可知：西安市年降水量与汛期降水量的第一主周期分别为29年和31年，第二、第三、第四主周期是一致的，都是13年、6年和3年，其中3年主周期的变化比较零乱。西安市汛期降水序列与年降水序列具有相似的主周期，因此，西安市汛期的降水控制着该地区的年降水。

4) 不论在任何时间尺度上，西安市年降水量与汛期降水量在2014年以后都进入偏少期。由于年降水量的第一、第二主周期振荡强度基本一样，所以年降水量的偏少期分别持续到2020年和2017年的可能性相同；但是汛期降水量的第一主周期的振荡强度远大于第二主周期的振荡强度，

所以汛期降水量的偏少期持续到2020年的可能性要比2017年的可能性大。

5) 小波分析法是降水特征多尺度分析和未来趋势预测有力的工具, 因此利用小波分析对西安市的降水进行多尺度的分析, 可以为农业现代化发展、水资源合理利用和旱涝趋势预测提供合理的依据。

致谢

水利部公益性行业科研专项经费项目(201301084)。

参考文献

- [1] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质大学出版社, 2011:12-13。
- [2] 魏永霞, 王丽学. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005:23-24。
- [3] 张代青, 梅亚东, 杨娜, 等. 中国大陆近54年降水量变化规律的小波分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(3):278-282。
- [4] 何锡玉, 蔡夕方, 景嘉洲. 小波变换分析降水时间序列的多分辨率特性研究[J]. 计算机应用, 2013, 33(S1): 331-334。
- [5] 傅文兵, 袁春. 新余市1959—2005年降水多时间尺度特征[J]. 气象与减灾研究, 2009, 32(3):63-66。
- [6] 尤卫红. 气候变化的多尺度诊断分析和预测的多种技术方法研究[M]. 北京:气象出版社, 1998:1-37。
- [7] Giuseppe G. Basic theory underlying the computation of influence coefficients[C] // ISMES, 1986 :241-247。
- [8] Arai R. An inverse problem approach to the prediction of multi-dimensional consolidation behavior[J]. Soils and Foundations, 1984, 24(1): 17-28。
- [9] 郑金凤, 孙虎. 陕西榆林地区降水特征分析[J]. 江西农业学报, 2015, 27(4):94-98。
- [10] 王澄海, 崔洋. 西北地区近50年降水周期的稳定性分析[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6):576-584。
- [11] 董婕, 周淑艳, 王茸仙. 全球变暖背景下榆林、西安、安康气候对比分析[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2009, 35(1):102-106。
- [12] 邓芳莲. 西安近57年降水量变化分析[J]. 陕西气象, 2008(4):21-23。
- [13] 杨新. 西安市降水频率变化特征分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4):60-65。
- [14] 周正朝, 胡娜娜, 周华. 西安市气温和降水变化趋势分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1):27-34。
- [15] 沈姣姣, 寇小兰, 巨晓璇, 马磊. 西安市汛期降雨特征的多尺度分析及未来趋势预测[J]. 中国农学通报, 2015, 31(2):219-224。
- [16] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2005:115-141。
- [17] 钟平安, 丙吓建平, 赵星等. 小波变换对中长期入库径流预测的适应性研究[J]. 水力发电, 2007, 33(1):14-17。
- [18] 欧素英, 陈子染. 小波变换在相对海平面变化研究中的应用[J]. 地理科学, 2004, 24(3):358-364。
- [19] 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。