

延安市近 50 年来降水特征及趋势变化的小波分析研究

琚彤军¹, 石 辉², 胡 庆²

(1. 西北农林科技大学, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘 要: 利用 Morlet 小波对延安 1952~2003 年 52 年间的降水量进行了多时间尺度分析, 结果表明, 延安降水在 3~6 a 和 25~32 a 的时间尺度上变化较强, 存在近 22 a 和 3 a 的降水周期, 其中 22 a 的周期变化最为强烈。根据降水周期, 延安年降水在 2003 年后的 5~8 a 内相对偏多, 2007~2009 年左右达到最大值, 然后降水量开始减少, 从 2013 年左右开始进入一个约 10 a 的少雨阶段。基于 1952~1990 年降水量资料, 建立小波变换的最近邻抽样回归模型, 用 1990~2003 年 13 a 的年降水量变化作为校验, 13 年中有 11 年的预测结果相对误差小于 30%, 说明小波分析和最近邻抽样回归模型结合可以较好地预测降水量的年际变化。

关键词: 降水; 小波分析; 最近邻抽样回归模型; 延安市

中图分类号: P468.0⁺24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)04-0230-06

小波分析方法是一种信号时频局部分析的新方法, 其特点是通过时频变化突出信号在某些方面的特征, 具有时频多分辨功能^[1~3]; 这样小波变换在时频域都具有表征信号局部特征的能力, 有利于检测信号的瞬态变化或奇异点。由于小波变换的这些特点, 使其作为一种数学理论和方法在科学技术和工程界引起了越来越多的关注。

水文时间序列具有大量的不确定性和复杂性, 小波分析对信号的自适应性非常适合引入分析水文量时间序列。由于小波分析可以观测到细微的变化, 也可以展示大的变化趋势, 同时能获得不同频带的简单序列, 为更好分析水文时间序列变化特性奠定了基础^[4]。一些研究将小波分析与自回归滑动平均模型^[5]、最近邻抽样回归^[6]等方法相结合, 在水文预测中取得了良好的精度。

降水是黄土高原地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的影响, 降水和下垫面因素决定了土壤侵蚀的强度。近年来大规模、高速度的植被建设和水土保持工程实施改变了流域的侵蚀产沙条件, 在黄土丘陵区的一些流域径流泥沙量明显减少, 但这种影响是降水因素起主导作用, 还是人类活动因素起主导作用, 它们各自贡献率有多大, 目前仍存在争议。因此, 定量研究降水变化对当前黄土高原生态建设环境效应的评估具有

现实意义。本文基于多年气象资料, 利用小波分析法研究了延安近 50 a 的年际降水特征, 以期揭示延安降水的多时间尺度特性——周期成分和突变特征, 并探索利用小波分析方法预测了降水量的年际变化趋势。这方面研究可为客观、科学地认识和评估黄土高原生态恢复的环境效应提供理论依据。

1 小波分析原理

小波分析方法是一种窗口大小(即窗口面积)固定, 但其形状可改变, 时间窗和频率窗都可改变的时频局域化分析方法, 在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率, 在时频域都具有很强的、表征信号局部特征的能力。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:

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

式中, $W_f(a, b)$ 为小波变换系数, 随参数 a, b 的变化而变化; 不同尺度下的小波系数可以反映系统在该时间尺度下的变化特征, 正负小波系数的转折点对应着突变点, 小波系数的绝对值越大, 表征该时间

尺度变化愈显著^[7]。 a 、 b 参数分别为尺度伸缩因子和时间平移因子;当 a 较小时,对频域的分辨率低,对时域的分辨率高;当 a 较大时,对频域的分辨率高,对时域的分辨率低。 $\Psi_{a,b}(t)$ 为分析小波或连续小波函数。将(1) 式离散化之后可以变为:

$$W_f(a,b)=\frac{1}{\sqrt{|a|}}\Delta t\sum f(k\Delta t)\Psi(\frac{k\Delta t-b}{a})\tag{2}$$

本文选用复值 Morlet 小波作母小波函数, Morlet 小波表达式为:

$$\Psi(t)=e^{i\omega t}(e^{-t^2/2}-\sqrt{2}e^{-\omega^2/4-t^2})\tag{3}$$

Morlet 小波变换的模和实部是两个重要的变量,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的信息。观察的小波系数模数可以消除小波本身的振荡,这样作为结果的复值小波系数的模平方(能量密度)的取值可较好地用于鉴别各种特征尺度及其在时间轴上的位置。Morlet 小波系数的实部可用于判

别气候资料序列中所包含的不同时间尺度下的降水状况^[8~10]。

最近邻抽样回归模型具有较强的预测能力,在水文、水环境观测和水资源系统随机模拟方面获得了成功的应用。将降水序列进行小波变换,分解得到小波变换序列的低频(近似)部分和高频(细节)部分;根据最近邻(相似性)原理,对各小波变换序列的低频部分和高频部分分别建立最近邻抽样回归模型进行预测;最后将预测的小波变换高、低频重构即得到原始降水序列的预测值。本文将尝试用小波分析与最近邻抽样回归模型相结合的方法,探索延安地区降水量小波预测的可行性。

2 数据分析

2.1 降水数据来源及特征

降水数据主要来源于延安气象站的降水观测资料,资料年度为 1952~2003 年,年际降水变化过程见图 1。

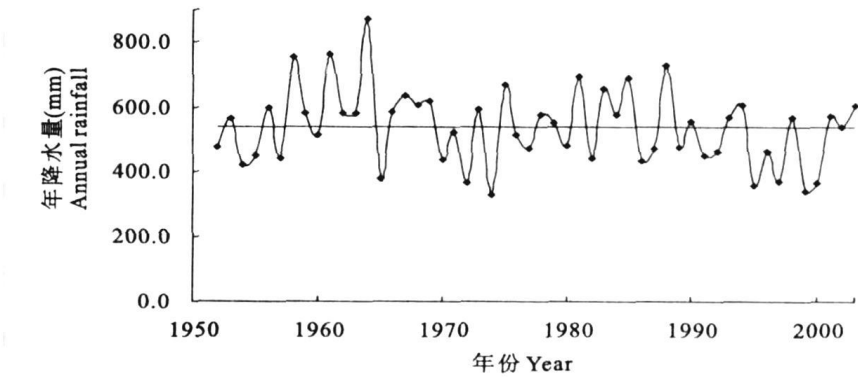


图 1 1952~2003 年延安降水量的时间序列

Fig. 1 The time series of precipitation in Yan 'an from 1952 to 2003

2.2 降水量的 Morlet 小波分析

为了便于分析,将降水时间序列进行距平化(中心化)处理,距平化处理后的降水量和 Morlet 小波代入式(2)中,计算小波变换的模和实部,这一过程可在 Matlab 软件上实施^[11]。Morlet 小波变换的模大小表示特征时间尺度信号的强弱,实部表示不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相两方面的信息,小波系数实部的零点对应于气候突变点。小波变换系数的模平方和实部见图 2、图 3。

图中清晰地显示了年降水量的周期、强弱、突变点和气相位的变化。从图中可以看出, 3~6 a 尺度变化较强,主要发生在 1952~1968 年,振荡中心在 1964 年;尺度 25~32 a 在整个序列中表现都很明显;

其余尺度表现较弱。在 3~6a 尺度变化中,其中心时间尺度为尺度 4 a,正负位相交替出现。图 4 给出了尺度为 4 a 的小波变换实部变化过程,可以清晰地看出在一些年份为正位相,表示降水偏多;在另一些年份为负位相,表示降水偏少;降水偏多偏少的具体年份见表 1。从整体来看,其存在一个近 3 a 的周期性变化。这与延安市燕沟流域 1997~2007 年观测研究结果较为一致,该流域 2000 年左右土壤侵蚀模数降低幅度较大,特别是 2003 年降到 200 t/(km²·a)以下,达到历史监测最低值。燕沟流域的研究成果表明,来沙量的减少是降水和治理因素共同作用的结果,只是贡献率不同而已,降雨衰减影响减沙量约占总减沙量的 33%,而综合治理影响约占 67%。

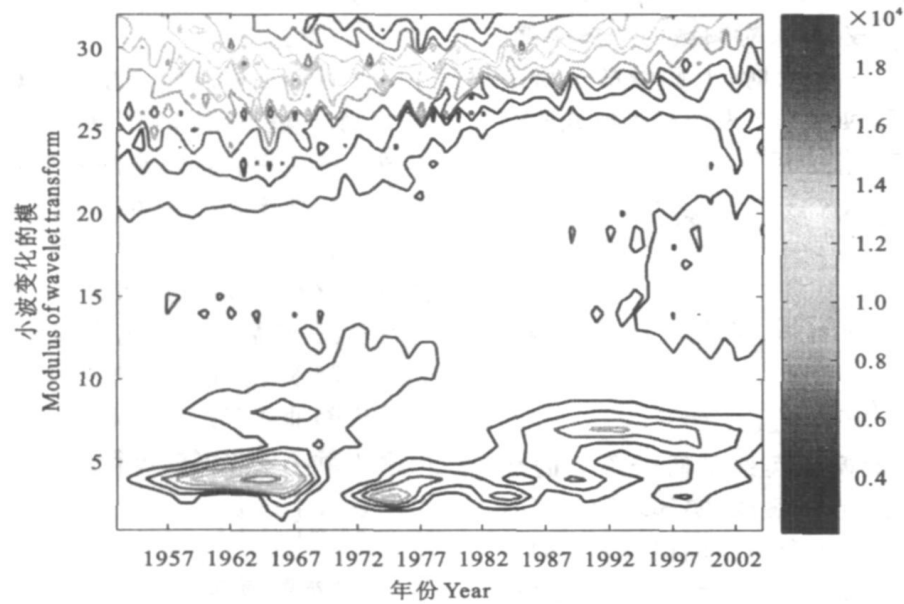


图 2 降水量距平序列各年份在不同尺度系数下的 Morlet 小波变换模的时频变化
Fig.2 The square modulus of Morlet wavelet transform of annual anomalous precipitation seires

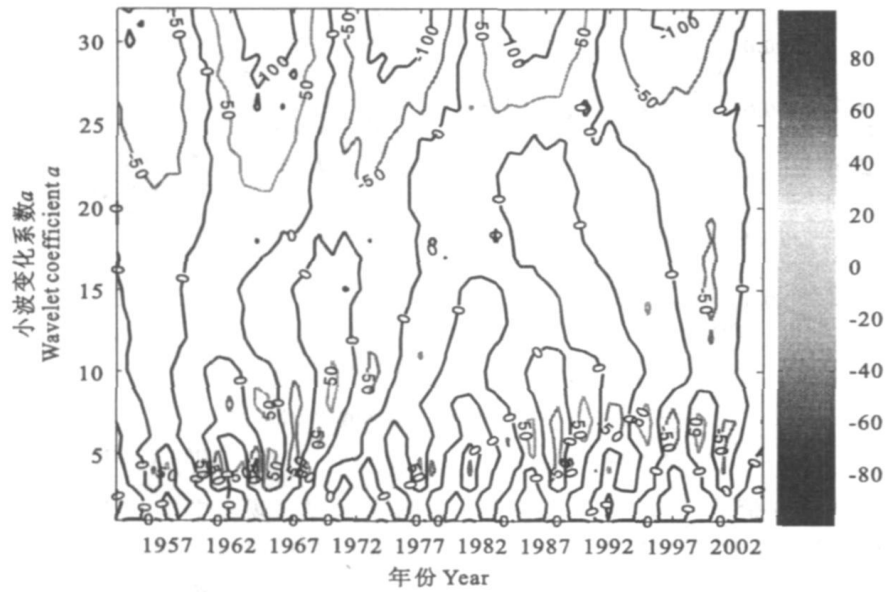


图 3 降水量距平序列各年份在不同尺度系数下的 Morlet 小波变换实部的时频变化
Fig.3 The time frequency distribution of Morlet wavelet transform of annual anomalous precipitation seires

表 1 延安市近 50 年来降水偏多和偏少年份

Table 1 The years with abundant precipitation and deficiency annual precipitation from 1953 to 2003 in Yan 'an

项目 Items	年份 Year
降水偏多年份 Years with plenty rain	1953, 1954, 1956, 1959, 1961, 1962, 1964, 1965, 1967, 1969, 1971, 1973, 1976, 1978, 1979, 1981, 1984, 1986, 1988, 1989, 1991, 1994, 1996, 1999, 2001
降水偏少年份 Years with little rain	1952, 1955, 1957, 1958, 1960, 1963, 1966, 1968, 1972, 1974, 1975, 1977, 1980, 1982, 1983, 1985, 1987, 1989, 1990, 1992, 1993, 1995, 1997, 1998, 2000, 2002, 2003

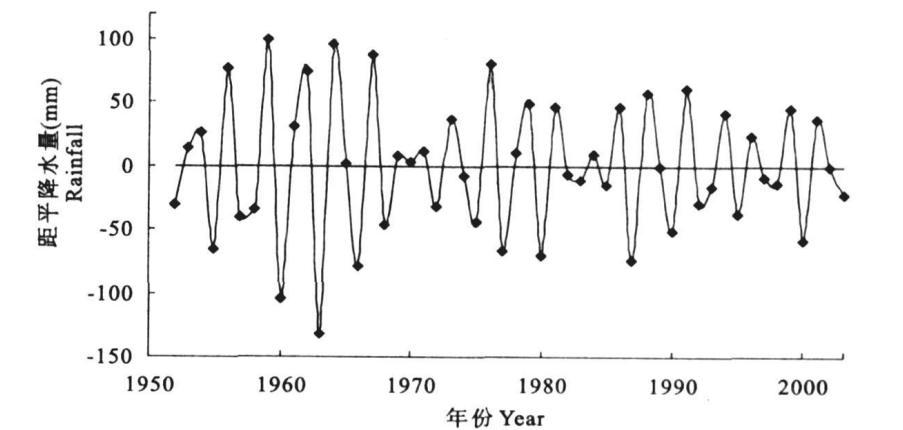


图 4 年降水量距平序列时间尺度 Morlet 小波变化过程(4 a 尺度)

Fig. 4 The real part changes of Morlet wavelet transform coefficient of anomaly annual precipitation time series (4-year time scale)

尺度 25~32 a 的变化也非常突出,图 5 给出了尺度为 32 a 的小波变换系数变化过程:有两个多水期(1958~1968 年、1980~1990 年)和三个少水期(1958 年以前、1969~1979 年、1991~2001 年),旱涝突变点在 1958 年、1968~1969 年、1979~1980 年、1990~1991 年和 2001~2002 年。由图可看出有一个近 22 a 的周期,该周期振荡最强且贯穿整个序列,可认为这个近 22 a 的周期为年降水的主周期,与太阳黑子活动的 22 a 周期一致。

根据 3~5 a 尺度和 25~32 a 尺度的降水周期

性,在 2003 年后的 5~8 a 内,在 3 周期上降水仍然偏多;以近 22 a 的主周期进行分析,在 1952~2003 年间存在的回归关系:

$$y=122.6\sin(\frac{2\pi x}{21.52}+6.28) \tag{4}$$

利用式(4)可以得到图 6 的趋势,从中可以看出,2003~2012 年,延安的年降水量仍然相对偏多。在 2007~2009 年左右达到最大值,然后降水量开始减少,从 2013 年后开始进入一个约 10 多年的少雨阶段。

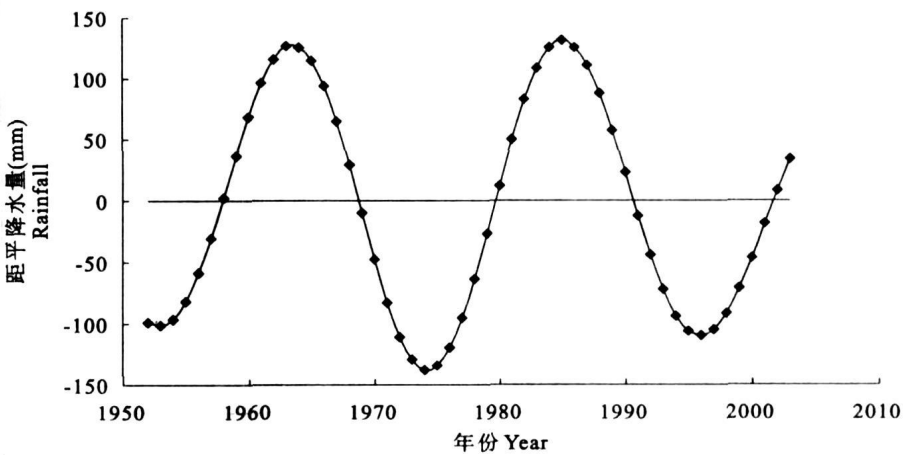


图 5 年降水量距平序列时间尺度 Morlet 小波变化过程(32 a 尺度)

Fig. 5 The real part changes of Morlet wavelet transform coefficient of anomaly annual precipitation time series (32-year time scale)

2.3 降水量的预测

从降水的主要时间尺度可以对今后降水的偏多、偏少趋势作简单的预测,但不能对今后降水量的大小进行预报。为了提高预报的精度,必须尽可能地考虑不同时间尺度下的变化特征。将降水序列用

Daubechies 小波进行 5 阶分解(db5),可以得到小波变换序列的低频(近似)部分和高频(细节)部分,对各小波变换序列的低频部分和高频部分分别建立最近邻抽样回归模型进行预测,最后将预测的小波变换高、低频用 db5 小波重构即得到原始降水序列的

预测值。

由 1951~1990 年前 39 a 的降水资料构造特征矢量,后 13 年(1991~2003 年)资料作预测校验。为方便计算与建模,对前 39 年的年降水量资料进行单尺度一维离散小波分解,得到一个高频率序列 xt 和一个低频率序列 yt ,对两者分别用最近邻抽样回归模型进行预测,得到各序列的 P 个预测值。将得到的两个序列的预测值分别添加到原序列中得到预测组合序列 $xt+p$ 和 $yt+p$ 后,对 $xt+p$ 和 $yt+p$ 进行单尺度一维小波重构。考虑到检验数据过少,降水序列随机性较大,以相对误差小于 30% 为合格标准,在 13 年中有 11 年的降水量预测误差小于 30%,只有 1996 年和 1997 年的预测值超出此范围。1996 年和 1997 年在 3 a 周期中处于降水由多到少的突变过程;在 22 a 的周期中,1996 年是降水最少的年份,从 1997 年开始降水量逐渐增大(表 2),是否各种不同频率的突变点耦合增大了预测的不确定性有待进一步研究。

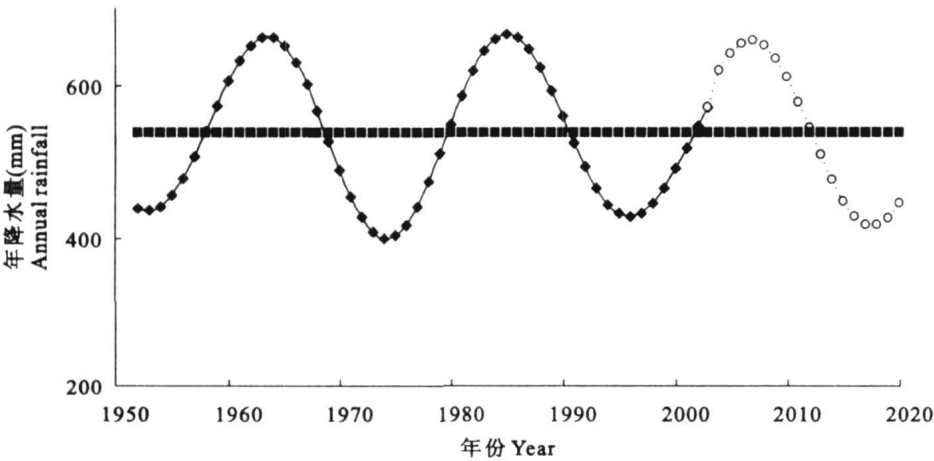


图 6 延安市 2003~2020 年降水趋势预测

Fig. 6 The precipitation trend forecast from 2003 to 2020 in Yan 'an

表 2 基于小波变换的最近邻抽样回归组合模型预测结果

Table 2 The prediction results of precipitation based the wavelet analysis and nearest neighbor bootstrapping regressive model

年份 Year	实测值 Measurement	预报值 prediction	相对误差(%) Relative error	年份 Year	实测值 Measurement	预报值 prediction	相对误差(%) Relative error
1991	451.7	557.7	19.0	1998	567.8	659.2	13.9
1992	462.5	476.4	2.9	1999	344.3	437.5	21.3
1993	567.4	728.0	22.1	2000	367.3	492.9	25.5
1994	606.9	473.5	-28.2	2001	573.5	503.7	-13.9
1995	360.7	437.0	17.5	2002	538.5	598.8	10.1
1996	464.8	688.4	32.5	2003	608.0	613.4	0.9
1997	372.1	577.3	35.5	预测检验合格率 Pass rate of prediction		84.6%	

3 结 论

1) 通过延安市 1952~2003 年的降水量分析,发现年降水量具有显著的多时间尺度特征,其中 3~6 a 尺度和 25~32 a 尺度的变化较强。年降水量的近 22 a 周期振荡最强,其次为近 3 a 的周期。

2) 根据降水周期性,可预测延安年降水在 2003 年后的 5~8 a 内仍然相对偏多,2007~2009 年左右达到最大值,然后降水量开始减少,从 2013 年后开

始进入一个约 10 多年的少雨阶段。

3) 基于小波分析的多分辨功能,结合最近邻抽样回归组合模型预测了 1990~2003 年 13 a 的降水量。通过与实测值相比较,13 年中有 11 年的预测结果相对误差小于 30%,说明小波分析和最近邻抽样回归模型结合可以较好地预测降水量的变化。

参 考 文 献:

[1] 杨建国:小波分析及其工程应用[M].北京:机械工业出版社,

2005.

[2] 董长虹·Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]·北京:国防工业出版社,2005.

[3] Torrence C, Compo G P· A practical guide to wavelet analysis[J]· Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79 (1):61—78.

[4] 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.

[5] 刘晓安·基于小波分析的年最大径流量预测方法[J]·中国农村水利水电,2002,(7):10—11.

[6] 王文圣,丁 晶,向红莲·最近邻抽样回归模型在水文资源预

报中的应用[J]·水电能源科学,2001,19(2):8—10.

[7] 王文圣,丁 晶,衡 彤,等·水文序列周期成分和突变特征的小波分析法[J]·工程勘察,2003,(1):32—35.

[8] 赵松年,熊小芸·小波变换与小波分析[M]·北京:电子工业出版社,1996.

[9] 王文圣,丁 晶,向红莲·小波分析在水文中的应用研究及展望[J]·水科学进展,2002,13(4):515—520.

[10] 严华生,万云霞,邓自旺,等·用正交小波分析近百年来中国降水气候变化[J]·大气科学,2004,28(1):151—158.

[11] 飞思科技产品研发中心·小波分析理论与 Matlab·7 实现[M]·北京:电子工业出版社,2005.

Wavelet analysis of precipitation variation and trend in nearly 50 years in Yan ’an

JU Tong-jun¹, SHI Hui², HU Qing²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;2.School of Environmental and Municipal Engineering, Xi ’an University of Architecture and Technology, Xi ’an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: The annual precipitation series from 1952~2003 in Yan ’an was analyzed through multi-time-scale by using Morlet wavelet. The results showed that the changes of 3~6 and 25~32 years scale were stronger, and there were nearly 22 and 3 years period with 22-year periodic changes most strongly. According to precipitation cycle, the Yan ’an annual precipitation in the next 5~8 years will be relatively high, to reach the maximum in 2007~2009, and then to begin to reduce. The precipitation from 2013 will enter a stage of drier period for about 10 years. The annual precipitation predicted model was established on the basis of wavelet and nearest neighbor bootstrapping regressive method by the annual precipitation data from 1952 to 1990, then, the model was used to predict 13-year annual precipitation changes from 1991 to 2003. There was 11 years prediction results with relative error less than 30%, this showed that the comprehension wavelet analysis and nearest neighbor bootstrapping regressive method can be used to predict the precipitation changes.

Key words: precipitation; wavelet analysis; nearest neighbor bootstrapping regressive model; Yan ’an