

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.10.015

# 1955—2014 年三峡库区降水特征分析

## ——以重庆市万州区为例<sup>①</sup>

周小英<sup>1</sup>, 谢世友<sup>1,2</sup>, 任伟<sup>1</sup>

1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

**摘要:** 利用重庆市万州区 1955—2014 年的月降水数据, 选择线性回归分析、Morlet 小波分析和  $R/S$  分析方法对三峡库区降水的年际和年代际变化、多时间尺度变化和降水趋势变化特征进行分析。研究表明: 近 60 年三峡库区降水变化总体上呈现出微弱的线性减少趋势, 年际和年代际波动较大, 各年代降水存在“少—多—少”的变化趋势; 三峡库区年降水存在多时间尺度的周期变化, 主要有 25、16 和 8 年时间尺度的变化, 尺度越小则降水变化平均周期越短; 此外, 由 Hurst 指数分析结果得出, 未来一段时间内, 三峡库区的年降水量将会进入相对偏多阶段。

**关键词:** 降水; 小波分析; 年际变化; 年代际变化; 多时间尺度

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2017)10-0102-07

IPCC 在第五次全球气候评估报告中指出: 1880—2012 年全球平均气温上升了  $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 预计未来的 20 年内全球地表平均温度将升高  $0.3\sim 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (与 1986—2005 年相比)<sup>[1]</sup>。随着全球气候变化, 近年来中纬度地区的极端降水事件频繁发生, 给人们的生产和生活带来了重大的影响。为掌握降水的变化规律, 常怀勇等<sup>[2]</sup>利用 M-K 非参数检验分析了全球中低纬度降水的时空分布特征; 翟茂岩等<sup>[3]</sup>结合强降水量和强降水日数对我国降水极值变化趋势和区域特征进行了检测; 张磊等<sup>[4]</sup>探究了青藏高原的年降水和季节降水变化趋势; 唐红玉等<sup>[5]</sup>通过计算降水频率和降水比率得出了西南地区降水日变化特征; 张顺谦等<sup>[6]</sup>基于降水数据和灾情资料研究了四川极端强降水的周期特征以及灾损风险的区域差异; 周浩等<sup>[7]</sup>根据降水量、降水日数和气温等观测资料对重庆气候变化的主要特征进行了分析。

三峡库区是指三峡大坝修建后蓄水淹没所涉及的区域, 其范围内的降水变化对三峡水库以及长江中下游地区的防洪抗旱调度有着直接影响。自 1996 年三峡大坝建设以来, 已有不少学者对库区的气候变化进行了深入研究, 发现多年来三峡库区年降水量整体上表现为不显著的减少趋势, 水库蓄水后对库区附近气温产生调节作用, 而年降水和四季降水没有明显的变化<sup>[8-10]</sup>。但在未来的气候变化背景下三峡库区的气温将持续增加, 年降水量在 21 世纪初期将有所减少, 而在中后期则会逐渐增加<sup>[11]</sup>。同时, 三峡库区最大连续 5 天降水的情况将呈现出增加的趋势<sup>[12]</sup>。这些研究内容多集中于降水的年际和年代际变化, 很少涉及周期分析和对未来趋势的预测, 且研究时间不够长, 很难把握大尺度的年代际变化。因此, 本文以三峡库区最大的

① 收稿日期: 2015-10-28

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAC09B01, 2006BAC01A16); 重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2009BA0002); 中央高校基本业务费专项基金项目(XDJK2015C006, SWU114058)。

作者简介: 周小英(1992-), 女, 四川宜宾人, 硕士研究生, 主要从事地貌环境与应用地理方向的研究。

通信作者: 谢世友, 教授, 博士研究生导师。

移民区——重庆市万州区为例,基于 1955—2014 年共 60 年的降水数据,分析近 60 年来三峡库区降水的变化趋势和周期特征,并对未来一段时间的降水进行预测,为进一步探讨该地区气候变化带来的影响以及库区的防洪抗旱工作提供参考依据。

## 1 研究区概况

三峡库区位于长江上游下段,西起重庆江津区,东至湖北宜昌市,覆盖了重庆市所辖 22 个县(区)和湖北省所辖 4 个县。万州区位于四川盆地东部,地处渝东北、三峡库区腹心,濒临长江三峡,跨大巴山、巫山、七曜山和盆东平行岭谷区,境内低山丘陵的面积约占总面积的 1/4。该区属于亚热带季风湿润气候,温和多雨,多年平均降水在 1 000 mm 以上。万州气象观测站地理坐标为东经 108°24′,北纬 30°46′,观测海拔为 186.7 m。

## 2 数据来源和方法

### 2.1 数据来源

本文所用的数据来源于国家气象数据共享网(<http://cdc.gov.cn/index.jsp>),选取三峡库区内万州区气象站点 1955—2014 年的月降水数据。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 线性回归分析

线性回归是利用线性回归方程中的最小二乘函数对自变量和因变量之间关系进行建模的一种回归分析方法。本文采用的一元线性回归分析,用时间序列作为自变量  $x$ ,降水序列作为因变量  $y$ ,建立一元线性回归方程:

$$y = bx + c$$

式中:斜率  $b$  表示气候倾向率,用于定量分析降水的线性变化趋势。

#### 2.2.2 小波分析

小波分析方法是在 20 世纪中后期逐渐发展起来的一种数学方法,被认为是传统傅里叶分析方法的突破进展<sup>[13]</sup>。小波分析能够清晰地揭示出隐藏在时间序列中的多种变化周期,小波变换的结果可以反映出系统在不同时间尺度中的变化趋势,这些年被广泛应用于气候的多尺度分析研究中<sup>[14-16]</sup>。本文采用 Morlet 小波分析方法对三峡库区的降水序列进行连续小波变换,利用 Matlab 软件作出小波系数实部图和小波方差图,进而分析得出三峡库区降水的多时间尺度变化特征。

#### 2.2.3 R/S 分析法

R/S 分析法,也称重标极差分析法,最初是由英国水文学家 Hurst 在 20 世纪 50 年代研究尼罗河多年水文观测资料时提出来的,后来又经过 Mandelbrot 和 Wallis 等多人的努力逐步完善,发展成为研究时间序列的分形理论<sup>[17]</sup>。Hurst 在研究中使用 R/S 分析法,并引入了一个新的统计量,即 Hurst 指数。通过对 Hurst 指数的结果分析,可以预测时间序列未来的持续性或反持续性趋势<sup>[18]</sup>。本文基于 R/S 分析法,利用 SPSS 软件对过去 60 年降水序列的 Hurst 指数进行计算,以预测三峡库区未来的降水趋势。

## 3 结果分析

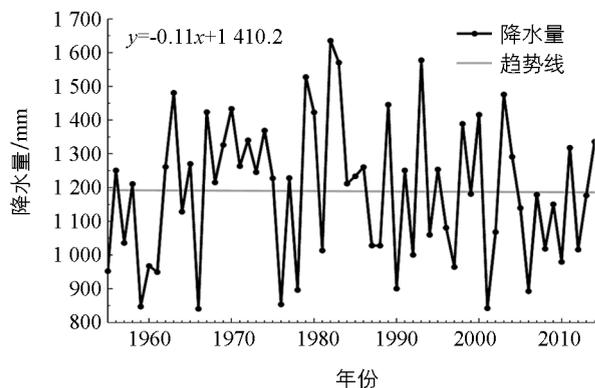
### 3.1 降水的年际一年代际变化

由图 1(a)可知,三峡库区降水序列的气候倾向率为  $-0.11 \text{ mm/a}$ ,由此说明降水量总体上的线性减少趋势无统计学意义,但年际和年代际波动较大。这 60 年来年降水量的变化范围在 800~1 700 mm 之间,多年平均降水量为 1 189.2 mm,其中年降水量最大值为 1982 年的 1 635.2 mm,年降水量最小值为 1966 年的 840.7 mm,二者相差 794.5 mm。三峡库区年降水量最大值约为最小值的 1.9 倍,说明三峡库区有明显

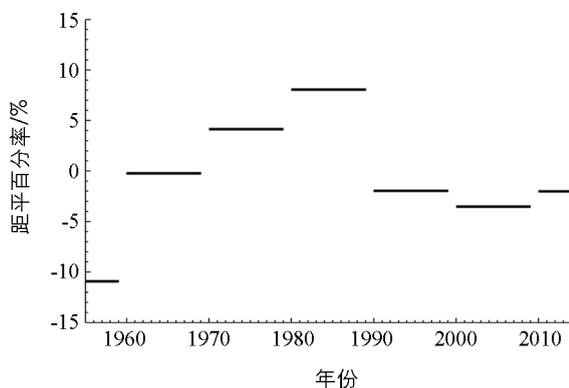
的丰水年和枯水年, 而 1982 年的最大降水量直接导致了当年长江水位居高不下, 引发特大洪灾。

图 1(b) 是三峡库区年降水量年代距平百分率变化图, 结合表 1 各年代际变化数据可知, 整个年代际内降水距平百分率除 1955—1959 年外, 其余都在正负 10% 以内, 说明各年代降水整体变化不大, 都在平均值附近波动。根据各年代的距平值, 三峡库区在 20 世纪 50 年代中期至 60 年代为少雨期, 其中 1966 年降水量达到最小值, 比平均值少 348.5 mm; 70 年代至 80 年代为多雨期, 其中 1982 年降水量达到最大值, 比平均值多 446 mm, 而在 90 年代至 21 世纪初期降水又有所减少。

根据这 60 年来的年降水变化可知, 三峡库区年降水量整体上呈现不明显的减少趋势, 降水的年际和年代际变化较大, 这 60 年间三峡库区降水在各年代的变化趋势为“少—多—少”。该区的降水趋势与四川盆地年降水量减少的趋势相符<sup>[19]</sup>, 与整个重庆地区的年降水量变化趋势保持一致<sup>[7]</sup>。



(a) 三峡库区年降水量



(b) 三峡库区降水年代距平百分率

图 1 1955—2014 年三峡库区降水量的年际和年代际变化图

表 1 1955—2014 年三峡库区降水量年代际变化

年份	1955—1959	1960—1969	1970—1979	1980—1989	1990—1999	2000—2009	2010—2014
平均值/mm	1 059.40	1 186.45	1 238.51	1 284.99	1 165.80	1 147.35	1 165.36
距平值/mm	-129.85	-2.80	49.26	95.74	-23.45	-41.90	-23.89
距平百分率/%	-10.92	-0.24	4.14	8.05	-1.97	-3.52	-2.01

### 3.2 降水的多时间尺度变化

#### 3.2.1 降水的周期分析

为了能够提取出降水序列的实际波动, 本文采用年降水的距平值进行分析。图 2 是 1955—2014 年三峡库区年降水距平值的小波分析图, 反映了三峡库区近 60 年来降水量在多个特征时间尺度上的周期变化及其在时间域中的分布状况。图 2(a) 是小波系数实部等值线图, 小波系数实部值为正时, 代表降水丰富; 小波系数实部值为负时, 降水偏少。图中用灰度表示, 颜色越深代表降水越少, 而等值线闭合中心则对应降水丰欠中心。

小波系数实部图形成多个尺度正负相间的震荡中心, 显示出三峡库区近 60 年降水量存在多个不同尺度的周期变化。总的来说, 以 10 年特征时间尺度为界, 图的上半部分等值线较为稀疏, 对应较长尺度周期的震荡(低频振荡), 而下半部分等值线相对密集, 对应较短尺度周期的震荡(高频震荡)。整个降水变化过程中主要存在(5~8), (13~16)和准 25 年的 3 类尺度的周期, 这三类尺度的周期变化具有全域性, 在整个分析时段表现的非常稳定, 5~8 年的尺度存在多次丰欠震荡, 13~16 年的尺度存在 5 次丰欠震荡, 而准 25 年尺度上存在“少—多—少—多—少—多—少”的 3 次震荡。此外, 1980 年左右降水出现了 5 年尺度的变化, 存在 4 次震荡, 但在 1990 年之后就消失了, 说明 5 年尺度的变化比较局限。

图 2(b) 是小波方差图, 能反映时间序列波动能量随时间尺度的分布情况, 对应峰值处的尺度为时间序

列的主要时间尺度,可以用来确定降水变化过程中存在的主周期.三峡库区近 60 年降水距平序列的小波方差图中存在 3 个较为明显的峰值,依次对应着 8,16 和 25 年.其中 8 年时间尺度、16 年时间尺度和 25 年时间尺度对应的峰值都比较大,25 年时间尺度的小波方差值最大,说明其震荡能量最强、变化周期最明显,为第一主周期;16 年时间尺度次之,为第二主周期;8 年时间尺度最小,为第三主周期.此外,5 年尺度虽然也对应一个峰值,但相比于另外 3 个尺度,其峰值较低,不计为主周期.

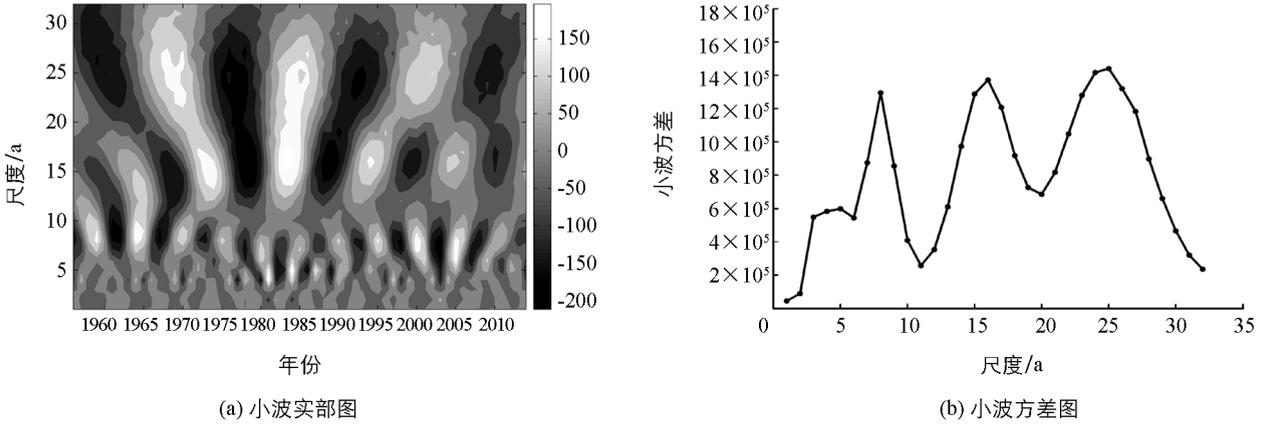


图 2 1955—2014 年三峡库区降水量的小波分析图

### 3.2.2 降水的主周期变化分析

根据小波方差检验的结果,我们绘制出了控制三峡库区年降水变化特征的 25,16 和 8 年 3 个主周期的小波系数图(图 3).

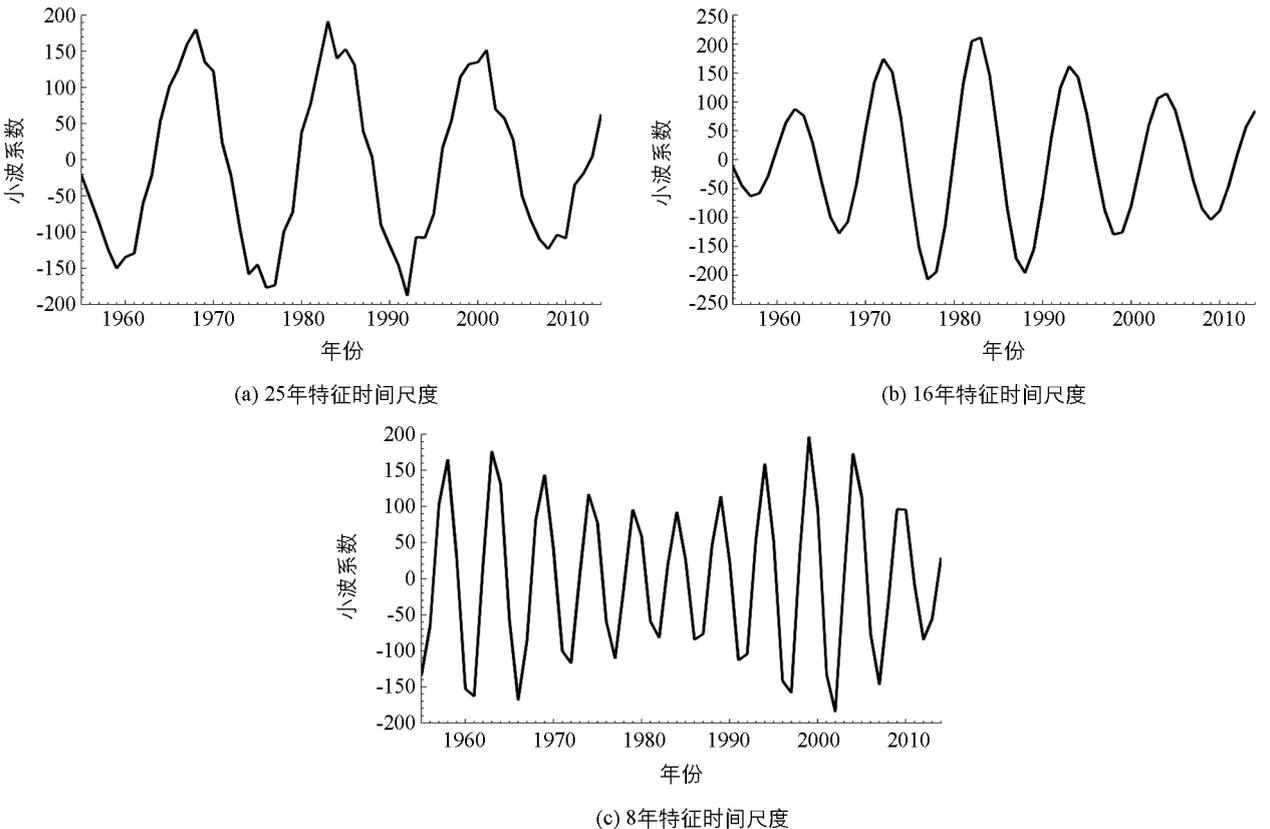


图 3 1955—2014 年三峡库区降水量的主周期变化图

从主周期趋势图中我们可以分析出在不同的时间尺度下,三峡库区年降水量存在的平均周期以及丰欠交替特征.在 25 年特征时间尺度上(图 3(a)),降水量变化大约经历了 3 个周期的丰欠交替,其变化的平均

周期为 20 年左右. 在 16 年特征时间尺度上(图 3(b)), 降水量变化大约经历了 5 次周期的丰欠变化, 其变化的平均周期为 12 年左右. 在 8 年特征时间尺度上(图 3(c)), 降水量变化大约经历了 11 个周期的丰欠转换期, 其变化的平均周期为 5.5 年左右. 由此可见, 时间尺度越小, 降水震荡越频繁, 平均变化周期越短.

小波分析的结果显示出, 三峡库区近 60 年来的降水变化特征主要是由 25, 16 和 8 年这 3 个时间尺度的周期所控制. 与前人的研究相比, 周浩等<sup>[7]</sup>对重庆近 46 年来的气候变化进行了分析, 得出重庆市降水变化周期基本在 10 年以内, 没有明显的年代际尺度周期, 而本文基于更长时间的降水量, 发现了 25 年和 16 年的年代际尺度变化. 此外, 刘晓冉等<sup>[20]</sup>结合重庆 30 个台站的资料进行研究, 发现重庆降水存在准 15 年的周期震荡, 本文得出的 16 年周期与之相差 1 年, 表明所得周期分析结果是可信的.

### 3.3 降水变化趋势预测

由  $R/S$  分析法得出 Hurst 指数, 具体计算原理可参照文献<sup>[21]</sup>. 1955—2014 年三峡库区的降水序列共有 60 个数值, 将降水序列分成  $K$  个长度为  $N$  ( $N$  依次取值为 2, 3, 4...60) 的子序列, 分别计算各子序列的极差  $R$  和标准差  $S$ , 再计算  $R$  和  $S$  的比值, 取  $N$  和  $R/S$  的对数, 对  $\ln N$  和  $\ln(R/S)$  用最小二乘法求出 Hurst 指数.

Hurst 指数取值为 0~1, 不同的 Hurst 指数具有不同的意义<sup>[22]</sup>:

1) 当 Hurst 指数为 0.5 时, 表明时间序列为相互独立、方差有限的随机序列, 前后的变化无关;

2) 当 Hurst 指数在 0~0.5 之间时, 表明时间序列存在负相关关系, 意味着时间序列未来的变化与过去具有反持续性, 指数越小, 反持续性越强;

3) 当 Hurst 指数在 0.5~1 之间时, 表明时间序列呈正相关, 意味着时间序列具有可持续性, 未来的变化与过去一致.

结合 Hurst 指数的含义, 由图 4 可得, 三峡库区降水序列的 Hurst 指数为 0.12, 数值在 0~0.5 之间, 说明未来的降水将呈现与过去相反的趋势. 根据表 1 得出各年代降水“少—多—少”的变化趋势, 预计三峡库区未来年降水可能会出现相对增多趋势, 与刘晓冉等<sup>[11]</sup>预测三峡库区年降水在 21 世纪总体上将增加的趋势相吻合, 与张天宇等<sup>[12]</sup>预测三峡库区极端降水增加密切相关.

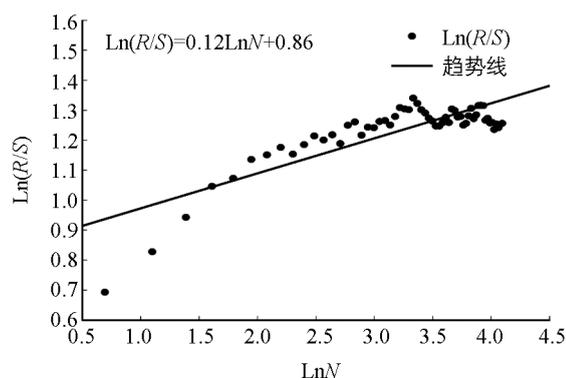


图 4 Hurst 指数分析结果

## 4 结论与讨论

1) 根据年降水趋势图和距平值变化图, 近 60 年来三峡库区年降水总体上呈微弱的线性减少趋势, 虽然整体变化不明显, 但年际和年代际波动较大. 20 世纪 50 年代至 60 年代为少雨期, 70 年代至 80 年代为多雨期, 90 年代至 21 世纪为少雨期, 各年代降水量总体呈现为“少—多—少”的变化趋势. 三峡库区的年降水变化与四川盆地和整个重庆地区的年降水减少的趋势相符合.

2) 小波分析结果表明, 三峡库区年降水具有明显的多尺度周期变化, 年降水主要存在 25, 16 和 8 年时间尺度的变化. 时间尺度越小, 降水震荡越频繁, 平均变化周期越短. 时间尺度 25 年的年降水变化平均周期为 20 年; 时间尺度 16 年的平均周期为 12 年; 时间尺度 8 年的平均周期为 5.5 年. 时间尺度 16 年和 8 年都与已有研究相印证, 但更大的尺度 25 年仍存在不确定性, 说明对气候特征的研究需要更长时间和更全面的数据资料, 才能更好地反映出气候序列的周期变化特征.

3) 由  $R/S$  分析法可以得出, Hurst 指数在 0~0.5 之间, 说明降水序列未来的变化具有反持续性,

即未来的变化将与过去相反。根据过去 60 年的年代变化趋势, 预计未来的一段时间内, 三峡库区年降水将会进入相对多雨的阶段, 张天宇等<sup>[12]</sup>通过研究 1961—2007 年三峡库区最大连续 5 天降水的变化规律, 预测在未来气候背景下三峡库区极端降水将呈现增加趋势, 说明三峡库区年降水的增加极有可能是源于极端降水。

以上结论表明, 三峡库区的年降水量变化波动较大, 这与其特殊的地理位置密不可分。西有青藏高原, 南有印度洋, 再加上本身的复杂地形, 降水可能会受到青藏高原、夏季风和副热带高压等多种因素的综合影响<sup>[23]</sup>。本文利用万州区近 60 年来的降水数据分析了三峡库区过去的降水变化和周期特征, 预测未来的年降水量将增多, 但未来降水的具体变化和年内分配状况等还不明确, 今后还有待于利用降水日数和降水强度以及四季降水量等资料对降水进行更为精细的研究。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers [R/OL]. [2016-01-29]. Http: //www. climatechange2013. org/.
- [2] 常远勇, 侯西勇, 毋 亭, 等. 1998~2010 年全球中低纬度降水时空特征分析 [J]. 水科学进展, 2012, 23(4): 475-484.
- [3] 翟盘茂, 任福民, 张 强. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报, 1999, 57(2): 208-216.
- [4] 张 磊, 缪启龙. 青藏高原近 40 年来的降水变化特征 [J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 240-246.
- [5] 唐红玉, 顾建峰, 俞胜宾, 等. 西南地区降水日变化特征分析 [J]. 高原气象, 2011, 30(2): 376-384.
- [6] 张顺谦, 马振峰. 1961—2009 年四川极端强降水变化趋势与周期性分析 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1918-1929.
- [7] 周 浩, 杨宝钢, 程炳岩. 重庆近 46 年气候变化特征分析 [J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 23-27.
- [8] 张天宇, 范 莉, 孙 杰, 等. 1961~2008 年三峡库区气候变化特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(Z1): 52-61.
- [9] 陈鲜艳, 宋连春, 郭占峰, 等. 长江三峡库区和上游气候变化特点及其影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11): 1466-1471.
- [10] 张树奎, 鲁子爱, 张 楠. 三峡库区蓄水对库区降水量的影响分析 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 21-23, 62.
- [11] 刘晓冉, 杨 茜, 程炳岩, 等. 三峡库区 21 世纪气候变化的情景预估分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(1): 42-47.
- [12] 张天宇, 范 莉, 程炳岩, 等. 1961—2007 年三峡库区极端降水指数 R5d 的变化规律及其未来情景预估 [J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 176-182.
- [13] 孙然好, 潘保田, 牛最荣, 等. 河西走廊近 50 年来地表水资源时间序列的小波分析 [J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 455-459.
- [14] 刘 毅, 杜小玲. 重庆夏、秋季降水异常的多时间尺度特征 [J]. 贵州气象, 2003, 27(5): 15-18.
- [15] 姜晓艳, 刘树华, 马明敏, 等. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析 [J]. 地理研究, 2009, 28(2): 354-362.
- [16] 简 虹, 骆云中, 谢德体. 基于 Mann-Kendall 法和小波分析的降水变化特征研究——以重庆市沙坪坝区为例 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 217-222.
- [17] 冯新灵, 罗隆诚, 邱丽丽, 等. 青藏高原至中国东部年雨日变化趋势的分形研究 [J]. 地理研究, 2007, 26(4): 835-843.
- [18] 白 萌, 沈 冰, 孟海平, 等. 宝鸡市降水和径流的分形特征与 R/S 分析 [J]. 黑龙江水专学报, 2009, 36(4): 6-10.
- [19] 马振锋, 彭 骏, 高文良, 等. 近 40 年西南地区的气候变化事实 [J]. 高原气象, 2006, 25(4): 633-642.
- [20] 刘晓冉, 杨 茜, 程炳岩, 等. 近 46 年重庆地区降水资源的变化特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(7): 93-100.

- [21] 汤龙坤. 太阳黑子数时间序列的 R/S 分析 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2008, 29(4): 627—629.
- [22] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例 [J]. 地理科学, 2004, 24(2): 177—182.
- [23] 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.

## An Analysis of the Characteristics of Precipitation in the Three Gorges Reservoir Area from 1955 to 2014 ——A Case Study of Wanzhou in Chongqing

ZHOU Xiao-ying<sup>1</sup>, XIE Shi-you<sup>1,2</sup>, REN Wei<sup>1</sup>

1. School of Geography Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Key Laboratory of Three-Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of the Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** Linear regression analysis, Morlet wavelet analysis and *R/S* analysis were made of the monthly precipitation data from 1955 to 2014 recorded at Wanzhou National Meteorological Station in Chongqing to study the inter-annual and inter-decade variation, multiple time scale fluctuation and variation trend of precipitation in the Three Gorges Reservoir Area. The results indicated that in the past sixty years the precipitation in Three Gorges Reservoir Area, as a whole, presented a slight linear decreasing trend, with fairly obvious inter-annual and inter-decade variations. Precipitation tended to fluctuate in a “scarce-abundant-scarce” pattern within a decade. The periodic variation of annual precipitation had multiple time scales, which mainly fluctuated with the time scales of 25a, 16a and 8a. The smaller the time scale, the shorter the average period of precipitation variation. It is predicted according to the Hurst index that the annual precipitation in Three Gorges Reservoir Area will increase relatively in the next period.

**Key words:** precipitation; wavelet analysis; inter-annual variation; inter-decade variation; multiple time scale

责任编辑 胡 杨  
崔玉洁

