

Morlet 小波在铜陵降水序列分析中的应用

李鹏飞¹, 张庆国^{2*}, 周晓飞³, 严力蛟⁴, 朱雅莉²

(1. 安徽农业大学信息与计算机学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学理学院, 合肥 230036;

3. 铜陵市气象局, 铜陵 244100; 4. 浙江大学生命科学院, 杭州 310058)

摘要: 基于近 49a 来的年均和月均降水资料, 采用 Morlet 小波分析法对长江中下游铜陵站降水序列进行多时间尺度研究, 并用 Mann-Kendall 法对其做了趋势分析。结果表明: (1)1960-2008 年铜陵地区年降水量呈下降趋势, 气候倾向率为 $-11.214 \text{ mm}/10\text{a}$ 。就季节而言, 春、夏、秋季均呈下降趋势, 只有冬季呈显著上升趋势; (2)小波分析显示年降水序列和季降水序列均存在多个主要周期的变化, 小尺度范围内, 年季降水突变点增多; (3)目前研究区处于降水枯水期末段, 预计在 2010 年左右研究区将进入一个新的丰水期。

关键词: 降水序列; 小波分析; Mann-Kendall 检验; 铜陵

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2011)04-0563-06

Applications of Morlet wavelet to the analysis of precipitation series in Tongling city

LI Peng-fei¹, ZHANG Qing-guo², ZHOU Xiao-fei³, YAN Li-jiao⁴, ZHU Ya-li²

(1. School of Information & Computer Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

2. School of Natural Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

3. Tongling Meteorological Bureau, Tongling 244100;

4. College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract: Based on the 49 years annual and monthly precipitation data, Morlet wavelet and Mann-Kendall methods were used to analyze the precipitation series in Tongling city, southern bank of Yangtze River. The results showed that: (1) Annual precipitation decreased at a climate tendency of $-11.214 \text{ mm}/10\text{a}$ during 1960-2008. For seasons, winter precipitation increased significantly while other seasons decreased. (2)The wavelet analysis showed both annual and seasonal precipitation had several kinds of periodic change. Abrupt change points increased on small time scales. (3) The research area was in the terminal cyclical period of low-water. It was predicted that a new cyclical period of high-water would come around in 2010.

Key words: precipitation series; wavelet analysis; Mann-Kendall test; Tongling city

小波分析(wavelet analysis, WA)是 20 世纪 80 年代中后期发展起来的一门新兴的数学分支。小波分析法是一种信号的时频局部分析新方法, 具有多分辨率分析的特点, 在时频两域都能反映出信号的局部变化特征^[1]。小波变换允许把一个时间序列分解为时间和频率的贡献, 它对于获取一个复杂时间序列的特征规律, 诊断出气候变化的内在层次结构, 分辨时间序列在不同尺度上的演变特征等是非常有效, 近年来被广泛应用于多尺度气候分析研究^[2-4]。

长江中下游地区是中国重要的工农业生产区,

同时也是全国旱涝灾害主灾区之一。近年来全球气候变暖以及厄尔尼诺现象的频繁发生, 使长江中下游地区降水异常, 加大了旱涝灾害发生的机率。目前国内有学者对长江中下游地区降水趋势及其影响因素进行了分析研究。缪启龙^[5]等研究发现长江中下游 1951-2004 年 6 到 7 月降水异常与 500 hPa 大气环流有密切关系; 谢月玉^[6]等利用谱分析法, 试析了澳洲冷空气活动和西太平洋副高热带高压对我国长江中下游主汛期降水的影响; 闵锦忠^[7]等研究了夏季热带西太平洋对流与长江中下游降水关系;

收稿日期: 2010-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671117, 40771117)共同资助。

作者简介: 李鹏飞, 男, 硕士生。E-mail: guchandavid@163.com

* 通讯作者: 张庆国, 博士, 教授, 硕士生导师。E-mail: qgzhang@ahau.edu.cn

姜彤^[8]等利用宜昌和大通站 1961—2000 年气象资料研究了长江流域气温、降水与径流变化趋势。这些研究均取得了丰硕的成果，但研究时域都是从某季或某月着手，且缺乏近 20 年来研究区年季降水规律的研究。目前利用小波分析方法对长江中下游城市降水变化进行多尺度研究尚不多见。

作者选择长江中下游地区具有代表性的铜陵气象站近 49a 降水资料作为研究对象，利用 Morlet 小波分析法对序列进行多尺度周期分析研究，并结合 Mann-Kendall 法（以下简称为 MK 检验法）对序列做了趋势分析，力图揭示研究区降水变化规律，以期为当地农业生产提供科学依据；为防治旱涝等灾害提供科学建议；为系统全面研究长江流域气候特征和径流规律提供研究基础。

1 材料与方 法

1.1 材 料

降水资料为铜陵市气象站 1960—2008 年的月、年平均降水的观测资料，数据资料由当地气象中心提供。

1.2 方 法

MK 检验法^[9-12]是一种非参数统计检验方法，非参数检验公式如下：对于长度为 n 的时间序列 x ，构造一秩序列： $S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=1}^k \text{sgn}(x_j - x_k)$ 。其中 S 近似服从正态分布，均值为 0，方差为 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。当 $n > 10$ 时，标准正态统计变量计算如下：当 $S \neq 0$ 时， $Z = [S - \text{sgn}(S)] / \sqrt{\text{Var}(S)}$ ；当 $S = 0$ 时， $Z = 0$ 。这样，在双边的趋势检验中，在给定的 α 置信水平上，如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ ，表示时间序列存在明显的变化趋势。统计量 $Z > 0$ ， x 呈上升趋势； $Z < 0$ ， x 呈下降趋势。

小波函数^[1-3]可定义为：设 $\phi(t)$ 为一平方可积函数，即 $\phi(t) \in L^2(R)$ ，若其傅立叶变换 $\psi(\omega)$ 满足容许条件：

$$C_\phi = \int_R \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \tag{1}$$

则 $\phi(t)$ 称为一个小波母函数，将小波函数 $\phi(t)$ 伸缩 α （伸缩因子），平移 β （平移因子），得到连续小波函数 $\phi_{\alpha,\beta}(t)$ ：

$$\phi_{\alpha,\beta}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \phi\left(\frac{t-\beta}{\alpha}\right), \alpha, \beta \in R, \alpha > 0 \tag{2}$$

对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$ 连续小波变换为：

$$W_f(\alpha, \beta) = \left\langle f(t), \phi_{\alpha,\beta}(t) \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_R f(t) \phi\left(\frac{t-\beta}{\alpha}\right) dt \tag{3}$$

式（3）中， $W_f(\alpha, \beta)$ 称为小波系数。将（3）式离散化之后可转化为：

$$W_f(\alpha, \beta) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \Delta t \sum f(k\Delta t) \phi\left(\frac{k\Delta t - \beta}{\alpha}\right) \tag{4}$$

本研究采用常用的复值 Morlet 小波作为小波母函数，它的定义为：

$$\phi(t) = e^{ict} e^{-t^2/2} \tag{5}$$

其中 c 为小波中心频率； i 表示虚部。由式（5）可见，Morlet 小波是经高斯函数平滑而得到的谐波，在时频两域都具有很好的局部性，由于其不具备正交性，所以只能用于连续小波情况。Morlet 小波的实部和虚部存在 $\pi/2$ 的位相差，复值小波系数的模平方表征不同特征尺度在时间轴上能量密度。小波方差为小波系数模平方在时间域上的积分，其定义为：

$$\text{var}(\alpha) = \int_R |W_f(\alpha, \beta)|^2 d\beta \tag{6}$$

小波方差图可以清晰地显示出不同时间尺度下小波方差的峰值情况，从而可以方便地判断出降水序列的主作用周期。

2 降水序列的小波分析

研究中选取的铜陵站位于长江中下游南岸，东经 $117^\circ 42' \sim 118^\circ 10'$ 、北纬 $30^\circ 45' \sim 31^\circ 07'$ 之间，属于北亚热带湿润季风气候。铜陵市降水最多的季节为夏季（6~8 月），占全年降水量 39.6%；其次是春季（3~5 月），占全年降水量 30.9%；秋季（9~11 月）和冬季（12 月~次年 2 月）较少，分别为 16.9% 和 12.6%。由此可见，铜陵地区降水多发生在春季和夏季，春夏两季对区域水资源贡献起着重要作用。

2.1 降水年际变化特征

由图 1 和表 1 可见，近 49a 来铜陵地区降水序列呈微弱下降趋势，降水变化倾向率为 $-11.214 \text{ mm}/10\text{a}$ 。对降水序列做 MK 检验，得 Z 值为 -0.853 （ $|Z| < 1.96$ ），说明研究区降水序列呈减少趋势，且趋势并不显著（置信水平为 0.05）。

采用复值 Morlet 小波对铜陵地区近 49a 来降水距平序列进行连续小波变换，得小波变换系数的实部等值线图（图 2）。图 2 显示了研究区近 49a 年均降水量在不同时间尺度上存在周期振荡，图中信号的强弱通过等值线色泽来表示，实线颜色越浅表示信号越强，虚线颜色越深表示信号越强。等值线为

正的用实线表示, 表示降水量偏丰; 等值线为负值用虚线表示, 表示降水量偏枯; 小波系数为零处则对应着突变点。

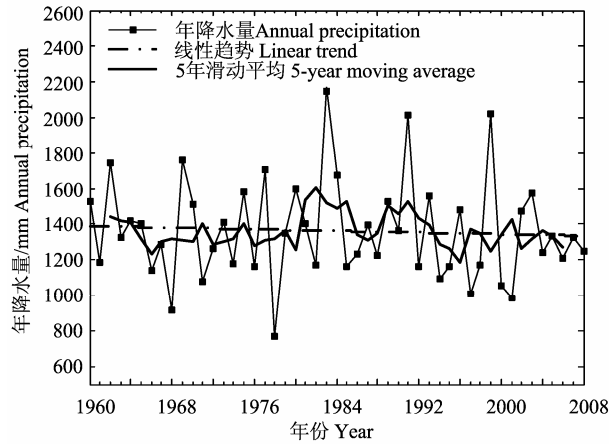


图 1 铜陵市 1960—2008 年降水趋势图

Figure 1 The trend of annual precipitation in Tongling during 1960—2008

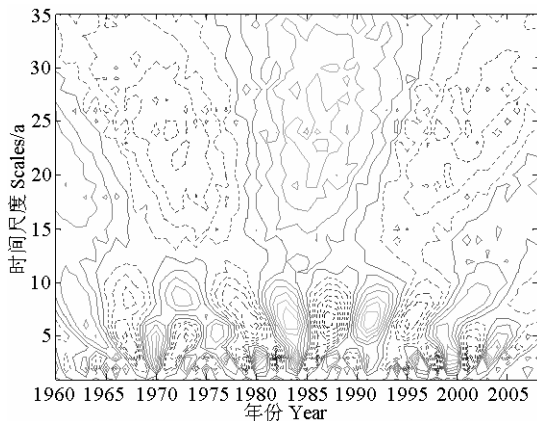


图 2 铜陵地区年降水 Morlet 小波系数实部等值线

Figure 2 The contour lines of Morlet wavelet coefficients of annual precipitation in Tongling during 1960—2008

从图 2 可以看出, 铜陵地区近 49a 年降水量包含了多个不同尺度的周期变化, 形成各种尺度正负相间的振荡中心, 存在明显的年代和年际变化。主要存在 3 个明显的周期变化规律, 分别是 2~3a、5~7a、23~25a 左右。从 23~25a 较大尺度分析, 铜陵地区年降水量周期振荡非常显著, 且具有全域性,

经历了 4 个循环交替: 1960~1965 年丰水期 → 1966~1979 年枯水期 → 1980~1994 年丰水期 → 1995~2008 年枯水期, 振荡中心依次为 1971、1986 和 2001 年。在 Matlab 软件中, 对图 2 做 Zoom In (细节放大) 处理, 发现小尺度 2~3a 和 5~7a 的周期振荡均不具有全域性, 5~7a 尺度振荡集中表现在 1972~1998 年, 期间经历 7 次丰枯交替, 后振荡中心又下移为 2~3a 尺度。2~3a 尺度集中表现在 1973~1987 年和 1993~2004 年。从 23~25a 全域尺度周期可看出, 目前研究区仍处于枯水期, 但该振荡周期等值线逐渐趋于闭合, 从 23~25a 尺度小波系数变化 (图 3) 可知铜陵地区将会在 2010 年左右进入一个新的丰水期。

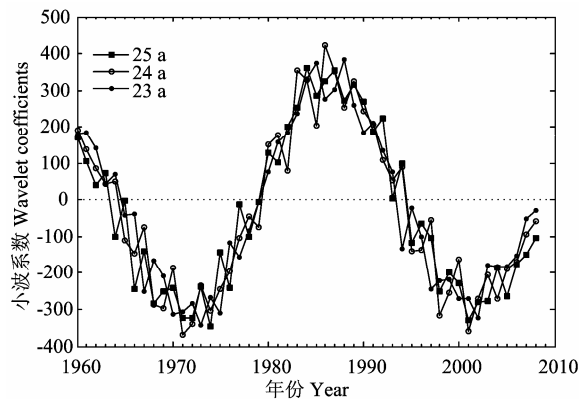


图 3 铜陵降水量 23~25a 尺度上的小波系数

Figure 3 The wavelet coefficients of annual precipitation in Tongling (Time scale 23—25a)

2.2 降水季节性变化特征

由铜陵市四季降水变化趋势图 (图 4) 可看出, 铜陵市 49a 来各季降水量呈波动变化, 变化趋势和幅度各不相同。四季的气候倾向率分别为: 春季 -9.284 mm/10a, 夏季 -2.709 mm/10a, 秋季 -16.071 mm/10a, 冬季 19.178 mm/10a, 春季、夏季、秋季呈现下降趋势, 但趋势均不显著, 冬季降水量具有明显的上升趋势, 且趋势显著, MK 检验中 Z 值为 2.889 ($|Z| > 1.96$)。

表 1 四季降水变化统计值

Table 1 The statistical values of seasonal precipitation change

项目 Item	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	年 Annual
气候倾向率(mm/10a) Climate variation tendency	-9.284	-2.709	-16.071	19.178	-11.214
Z 值 Z Statistical value	-0.784	-0.267	-1.577	2.889*	-0.853

注: * 表示通过 95%置信座检验。Note: The sign “*” means passing 95% confidence test.

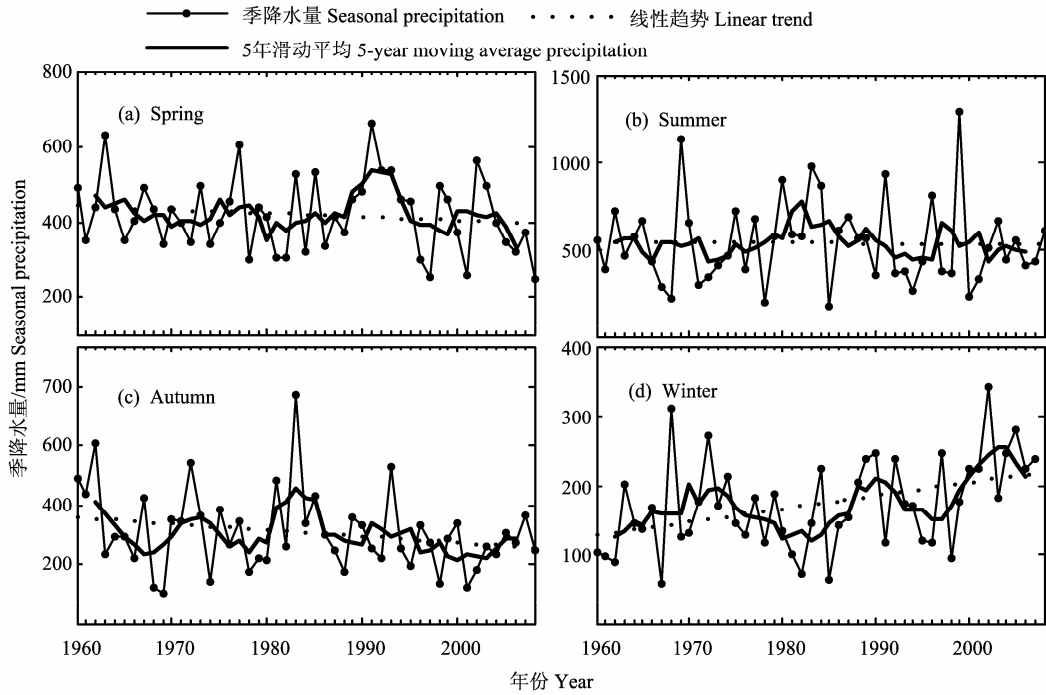


图 4 铜陵市 1960—2008 年四季降水趋势图

Figure 4 The trends of seasonal precipitation in Tongling during 1960—2008

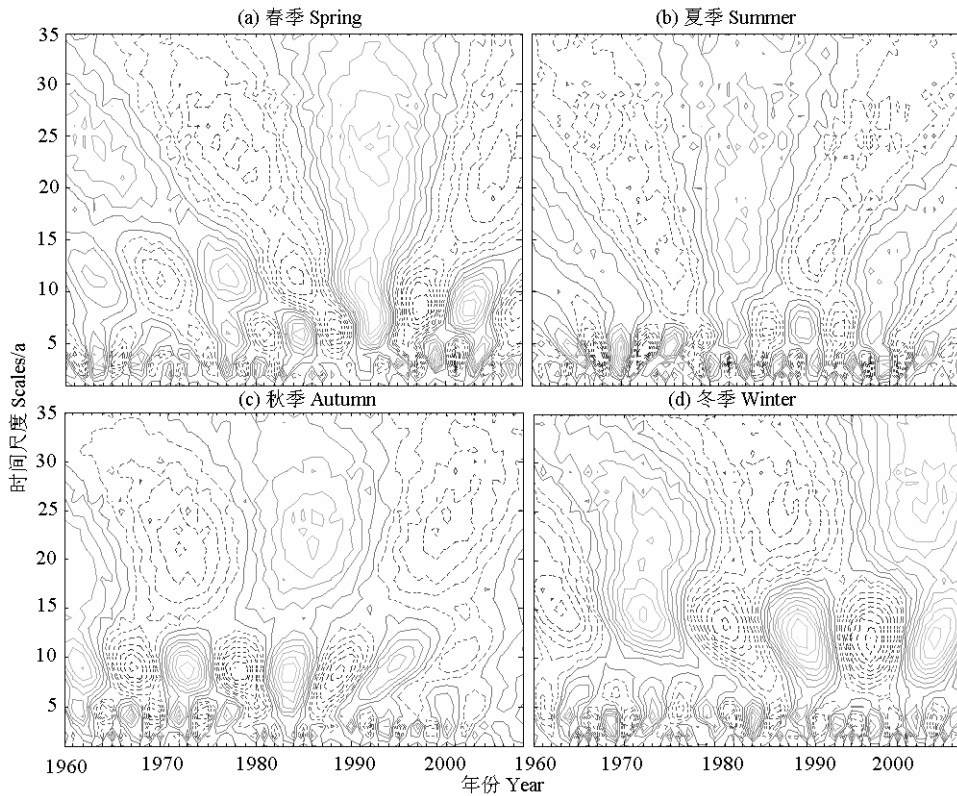


图 5 铜陵地区四季降水 Morlet 小波系数实部等值线

Figure 5 The contour lines of Morlet wavelet coefficients of seasonal precipitation in Tongling during 1960—2008 for spring(a), summer(b), autumn(c) and winter(d)

对研究区四季降水序列进行距平处理，然后将距平序列进行连续小波变换，得四季降水小波变换

系数的实部等值线图(图5)。

图5(a)显示春季降水主要存在5个明显的周期变化规律,分别是2~4、6、7~9、10~13和21~25a左右,其中21~25a周期振荡具有全域性,期间经历了4个循环交替:1960~1970年丰水期→1971~1984年枯水期→1985~2000年丰水期→2001~2008年枯水期,振荡中心依次为1964、1978、1992和2005年。10~13a特征尺度上,研究区降水量存在明显的周期振荡,但并不具有全域性,集中表现在1960~1987年。10~13a尺度周期经历了4个循环交替:1960~1967年丰水期→1968~1973年枯水期→1974~1981年丰水期→1981~1987年枯水期,振荡中心依次为1963、1970、1977和1984年。1985年之后,10~13a周期中心下移到7~9a尺度。7~9a随后经历了4次丰枯交替:丰→枯→丰→枯。在对图像做Zoom In处理,发现2~4a和6a的年际变化尺度均不具有全域性。6a尺度主要表现在1975~1990年,之后周期中心下移至2~4a尺度。

图5(b)显示夏季降水主要存在4个明显的周期变化规律,分别是3、4~5、6和12~17a左右。从20a以上较大尺度看,研究区降雨虽呈现丰枯交替状,但并没有形成显著的周期震荡中心。12~17a特征尺度存在4个明显的正负震荡中心:1960~1966年丰水期→1967~1979年枯水期→1980~1988年丰水期→1989~1996年枯水期。可见在12~17a时间尺度上,降水周期振荡不具有全域性。对图像细节进行放大处理。小尺度振荡分析表明3a、4~5a和6a年际变化尺度同样不具有全域性。6a尺度周期集中表现在1981~1999年,历经5次循环交替后,振荡中心下移到4~5a尺度。4~5a尺度周期集中表现在1960~1979年。之后中心下移到3a尺度。

图5(c)可见秋季降水主要存在4个明显的周期变化规律,分别是2~3、4、8~11和20~25a左右,其中8~11a周期振荡具有全域性。20~25a的特征尺度,经历了3次丰枯交替:1967~1978年枯水期→1979~1993年丰水期→1994~2008年枯水期,振荡中心依次为1972、1986和2000年。8~11a特征尺度上,经历了9个循环交替。细节分析结果表明,2~3a和4a年际变化尺度均不具有全域性,4a周期振荡表现在1961~1979年,期间经历了7次循环交替,后中心下移至2~3a尺度。2~3a周期振荡表现在1980~2003年。

图5(d)显示冬季降水主要存在3个明显的周期变化规律,分别是3~5、11~16和23~27a左右,其中11~16a周期振荡具有全域性。11~16a特征尺度

经历了6个循环交替:1960~1967年枯水期→1968~1977年丰水期→1978~1985年枯水期→1986~1993年丰水期→1994~2000年枯水期→1994~2000年枯水期→2000~2007年丰水期,振荡中心依次为1963、1972、1981、1989、1997和2004年。23~27a特征尺度不具有全域性,周期振荡为1980~1994年枯水期,1995~2007年丰水期。细节分析表明:3~5a特征尺度具有全域性,在研究时域内呈现多次丰枯交替。

年降水和各季降水中,2~4a周期振荡与平流层大气环流的准2a周期振荡存在一致性。大尺度20~25a的周期与太阳黑子的准22a周期具有一定相关性,说明铜陵地区降雨可能受太阳活动异常影响^[13]。从图2、5可见,在小尺度范围内,年、季降水正负交替频繁,突变点增多。不同尺度下,突变点个数和位置均不相同。就年降水而言,当前研究区降水处于枯水期,预计在2010年左右将进入一个新的丰水期,因此,防汛工作尤为重要。季降水方面,夏季降雨小尺度周期振荡显著,丰枯交替频繁,突变点多,应做好旱涝灾害防范措施。冬季降水有增长态势,目前处于丰水期。因此,应做好预防雪灾与冻灾工作。

3 降水序列的小波方差分析

以上分析了研究区年降水和各季降水小波变化特征,研究结果表明铜陵地区近49a年、季降水均存在明显的周期振荡。小波方差^[3]反应了能量随时间尺度(a)的分布情况,可以确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度,对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度,用以反应时间序列的主要振荡周期。根据公式(6),本研究计算了研究区年降水序列和各季降水序列的小波方差,据此确定各序列中存在的主要时间周期(图6)。

图6(a)显示铜陵地区年降水序列小波方差在不同的时间尺度上存在3个峰值,对应的时间尺度分别为3a、6a和24a。其中尺度3a峰值最高,能量最大;其次是6a时间尺度;第三峰值是大尺度24a。这3个主振荡周期决定着铜陵地区降水序列在整个研究时域内的变化特征。

图6(b)中铜陵地区春季降水序列小波方差存在3个峰值,对应的时间尺度分别是3a、10a和23a。峰值最高能量最大的是23a,说明春季降水在23a左右的周期振荡最强;其次是10a时间尺度,峰值也很显著;小尺度3a周期振荡相比稍弱。

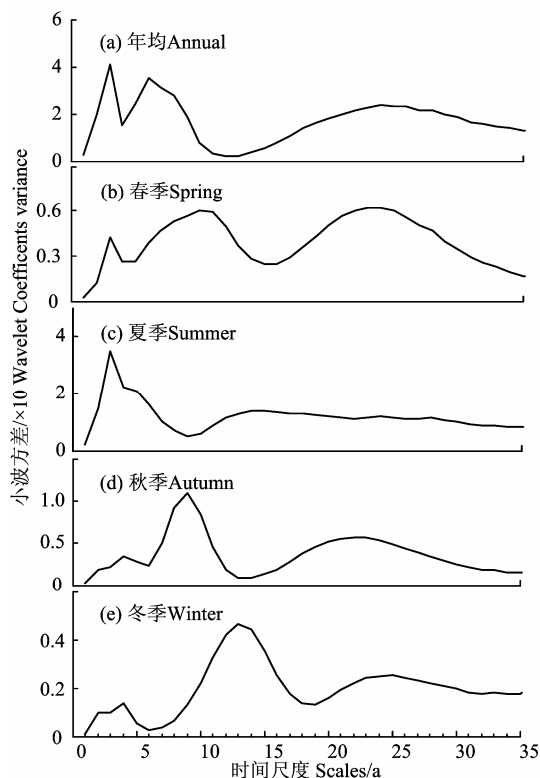


图 6 年降水及季节降水序列小波方差图

Figure 6 Wavelet variance of annual precipitation (a) and spring(b),summer(c),autumn(d) and winter(e)

图 6(c)可见铜陵地区夏季降水序列小波方差存在 2 个峰值, 对应的时间尺度分别是 3a 和 14a。峰值最高能量最大的是 3a, 说明夏季降水在小尺度 3a 左右的周期振荡最强; 其次是 14a; 铜陵地区夏季降水变化异常, 小尺度周期振荡明显, 降水突变点较多, 给预防旱涝灾害工作带来更大的难度, 这和文献^[5,7]研究结果基本一致。

图 6(d)表明铜陵地区秋季降水序列小波方差存在 3 个峰值, 峰值从高到低依次为 9a、22a 和 4a。说明铜陵地区秋季降水序列存在 9a、22a 和 4a 的主周期, 其中 9a 尺度周期振荡最为强烈。

图 6(e)显示铜陵地区冬季降水序列小波方差存在 3 个峰值, 分别为 4a、13a 和 25a。峰值最高能量最大的是 13a, 其次是 25a 和 4a。

从图 6 可知, 铜陵地区年降水小波方差趋势与各季降水小波方差趋势具有一定差异性, 说明在研究时域内, 年降水量变化是由四季降水量共同决定的。小尺度 3a 上看, 春季、夏季对年降水量贡献较大。大尺度 24a 左右春季、秋季贡献较大。小波方差分析结果与图 2、图 5 信息相吻合。

4 结论

通过对铜陵站近 49a 年降水量进行小波分析,

发现年季降水量均具有明显的多时间尺度特征。就年降水量而言, 2~3a 和 23~25a 为主作用周期。季降水量方面, 春夏秋冬四季主作用周期分别为 21~25a、3a、8~11a 和 11~16a。

目前铜陵地区处于枯水期末段, 该振荡周期逐渐趋于闭合, 预计铜陵地区将会在 2010 年左右进入一个新的丰水期。因此, 有关部门应做好防汛措施。

铜陵地区主要降水多发生在春季和夏季。因此, 春季和夏季降水对区域水资源贡献起着重要作用。近 3a 小尺度上看, 春季、夏季对年降水量变化贡献较大。近 24a 大尺度上, 春季、秋季对年降水量变化贡献较大。

由铜陵地区近 49a 降水情况可以看出, 研究区夏季降雨变化异常, 小尺度周期振荡明显, 加大了治理旱涝灾害工作的难度。冬季降水存在显著上升趋势, 有关部门应加强预防雨雪灾害措施。

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] 刘刚, 刘纪平, 赵荣, 等. 小波方法在澜沧江降水量周期变化分析中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(8): 236-241.
- [3] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2006, 42(4): 503-509.
- [4] 毛军军, 朱良燕, 张学友, 等. 基于小波变换的气温趋势和分形特征分析[J]. 计算机工程, 2010, 36(2): 18-24.
- [5] 缪启龙, 吴燕. 长江中下游 6-7 月降水异常与 500 hPa 大气环流的关系[J]. 气象与减灾研究, 2009, 32(4): 18-24.
- [6] 谢月玉, 王式功, 董安祥, 等. 澳洲冷空气活动与长江中下游降水的联系分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(7): 625-629.
- [7] 闵锦忠, 李春, 吴芑. 夏季热带西太平洋对流与长江中下游降水关系的研究[J]. 大气科学, 2005, 29(6): 947-954.
- [8] 姜彤, 苏不达, 王艳君, 等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 65-68.
- [9] 王国庆, 张建云, 贺瑞敏, 等. 黄河兰州上游地区降水、气温变化及趋势诊断[J]. 干旱地区资源与环境, 2009, 1(23): 77-81.
- [10] 张宝军, 马金珠, 赵鑫, 等. 近 50 年来民勤县气温变化特征及其原因分析[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 226-229.
- [11] 符淙斌. 气候突变现象的研究[J]. 大气科学, 1994, 18(3): 373-384.
- [12] 李鹏飞, 周晓飞, 张庆国, 等. 铜陵市近 49 年气温变化特征及其趋势分析[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(2): 346-351.
- [13] 段长春, 孙继华. 太阳活动异常与降水和地面气温的关系[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 382-386.