

# 湖北省 1957– 2009 年降水时空变化特征分析

蔡道明<sup>1</sup>, 鄢铁平<sup>2</sup>, 廖 炜<sup>2</sup>, 熊安元<sup>3</sup>, 吴 茜<sup>1</sup>, 吴宜进<sup>1</sup>

(1. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 湖北省水土保持监测中心, 武汉 430069; 3. 国家气象信息中心 气象资料室, 北京 100081)

**摘 要:** 利用湖北省 21 个气象站 1957– 2009 年的逐日降水资料, 采用 EOF、REOF 和小波分析对湖北省年降水的空间分布和周期特征进行初步研究。研究结果表明: EOF 分析得到的前 3 个典型场可以很好的反映湖北降水空间分布的特征, 即具有整体一致、南北相反及中部和周围地区相反。REOF 分析得到的前 6 个空间模态可以较好地代表湖北年降水的 6 个异常敏感区, 分别为鄂西北区、鄂北区、鄂东北区、鄂东南区、鄂中南区、鄂西南区。利用复 Morlet 小波函数对湖北年降水的周期性进行研究, 表明湖北年降水存在着明显的 3 a、7 a、14 a 的特征时间尺度和周期性振荡; 从大的周期转变来看, 今后一段时间内, 湖北省的年降水量会逐年减少, 之后可能进入一个相对干旱时期。

**关键词:** 湖北省; 年降水; EOF; REOF; 小波分析

中图分类号: P426.614

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)06-0237-05

## Analysis on Spatial-Temporal Characteristics of Precipitation During 1957– 2009 in Hubei Province

CAI Dao-ming<sup>1</sup>, YAN Tie-ping<sup>2</sup>, LIAO Wei<sup>2</sup>, XIONG An-yuan<sup>3</sup>, WU Xi<sup>1</sup>, WU Yi-jin<sup>1</sup>

(1. School of Urban and Environmental Sciences, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China;  
2. Soil and Water Conservation Supervision and Monitoring Center, Wuhan 430069, China; 3. National Meteorological Information Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on annual precipitation data over 21 stations during 1957– 2009 in Hubei province, the spatial-temporal characteristics are studied by applying the methods of EOF, REOF and wavelet analysis. The most typical pattern of annual precipitation is the dry-wet consistency. Other typical patterns show the dry-wet difference. For example, it is wet (or dry) in north and dry (or wet) in south, wet (or dry) in center and dry (or wet) in the surrounding area, wet (or dry) in northeast and dry (or wet) in the southwest. The first six rotated loading vector fields represent six principal precipitation anomaly areas: Northwest Hubei, North Hubei, Northeast Hubei, Southeast Hubei, Midsouth Hubei, Southwest Hubei. By using the wavelet analysis on the periodicity and the mutation of precipitation during the rainy season in Hubei, we found that there were 3-year, 7-year and 14-year time scales and main periods of precipitation during the rainy season, and the precipitation during the rainy season in Hubei may will decrease gradually and switch to a dry period in the near future.

**Key words:** Hubei province; annual precipitation; EOF; REOF; wavelet analysis

降水量是一种重要的气候变量, 它对农业生产乃至整个国民经济发展都具有重要影响, 对气候变化也具有十分重要的意义。相对于全球性的持续变暖趋势, 降水量变化格局及其区域分布有更大的不确定性<sup>[1-2]</sup>。因此, 研究全球气候变化背景下的区域降水变化趋势及其时空结构变化规律等问题具有很强的

现实意义<sup>[3-5]</sup>。近一二十年来, 我国一些学者利用不同方法和代表站资料, 对湖北省的降水变化趋势进行了系统分析, 并取得了许多重要研究成果<sup>[6-8]</sup>。但这些研究多侧重于降水量的趋势分析, 对该地区降水量的空间特征和周期特征等研究还不够深入, 而这些特征对于降水量的预报是极其重要的。因此本文利用

收稿日期: 2010-05-30

资助项目: 科技部“气象科学数据共享中心”(2005DKA31700)项目 02 课题“国家级气象科学数据资源建设”; 湖北省水土保持监测中心委托项目: 三峡库区数据库建设及其水土保持系统评估

作者简介: 蔡道明(1983–), 男, 湖北石首人, 硕士研究生, 主要从事资源与环境、水土保持方面的研究。E-mail: edm1528@126.com

通信作者: 鄢铁平(1958–), 男, 湖北天门人, 高级工程师, 长期从事水土保持工作。E-mail: ttpa@163.com

湖北省 1957–2009 年 21 个气象站逐日降水资料, 采用 EOF、REOF 和小波分析等方法, 对降水的空间分布特征和多时间尺度的复杂结构进行分析研究, 以期得到研究区域降水的地区性和周期性变化, 并揭示其长期变化规律, 进而为短期及中长期降水预测提供依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料和计算

选取分布于湖北省境内的 21 个专业气象站( 站点分布如图 1) 的逐日降水数据, 根据日降水数据统计得到 21 个气象站年降水量。由于各站建站时间不一, 所以适当调整各站降水数据的起始时间, 以尽可能保证所有气象站点数据资料长度的统一。本文把起始时间定在 1957 年。对于个别缺测数据, 选用邻近且相关性好的站点进行回归插补, 并采用文献[ 9] 提出的方法对插补后的数据进行修正, 得到 21 个站点 1957–2009 年 53 a 完整的降水序列。湖北省面降水量采用泰森多边形法求得。在进行小波分析时, 由于时间序列较短, 为避免产生边界效应, 采用周期对称延拓方法<sup>[10]</sup> 延长数据, 得到长度为原序列 3 倍的资料序列, 小波变换后, 将延拓的部分舍弃, 保留原始时段内的小波系数进行分析。

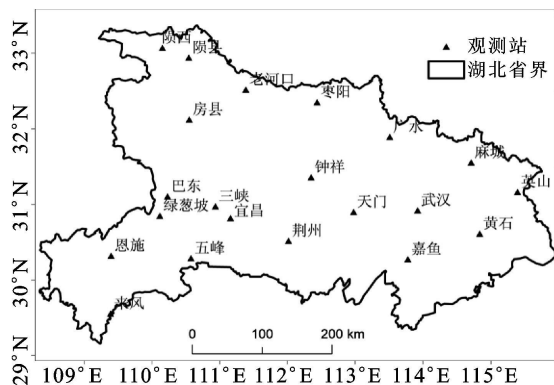


图 1 湖北气象站分布情况

### 1.2 主要分析方法

经验正交展开(EOF)在气象和海洋资料分析中有极广泛的应用, 其功能是用较少的几个新变量序列来反映原多个变量的变化信息, 起到降低资料维数的作用。设气象要素场  $X = (x_{ij})$ ,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。经验正交展开是将气象要素场  $X$  分解成相互正交的时间函数(系数)与相互正交的空间函数(系数)的乘积之和, 矩阵形式即:

$$X = V \cdot Z$$

式中:  $Z$ ——时间函数;  $V$ ——空间函数。这种分解要求正交, 因此,  $V^T \cdot V = I$  和  $Z \cdot Z^T = \Lambda$ , 式中:  $I$ ——单位矩阵,  $\Lambda$ —— $XX^T$  矩阵的特征值构成的对角阵。

$Z$  矩阵由  $V^T X$  解出<sup>[11]</sup>。第  $i$  个特征向量场对  $X$  场的贡献率为:  $\lambda / \sum_{i=1}^m \lambda$ 。其中:  $\lambda$ —— $XX^T$  的特征值从大到小排列中的第  $i$  项。

旋转主成分分析(REOF)是对 EOF 分析结果作旋转变换, 其目的是使特征向量场中列向量元素的方差最大, 每一个空间点上的要素只与几个或一个旋转时间系数存在高相关, 因此能很好的反映要素分布的区域性特征。旋转方法有很多, 本文选用 Horel<sup>[12]</sup> 方差最大正交旋转法, 对 EOF 得到的载荷向量和主成分进行旋转。

小波分析是傅立叶分析发展史上里程碑式的进展, 也是调和分析这一数学领域半个世纪以来工作的结晶<sup>[13]</sup>。其在信号处理, 图像压缩, 语音编码, 模式识别, 地震勘探, 大气科学以及许多非线性科学领域内取得了大量的研究成果。小波分析之所以广泛得到应用, 在于: 时域和频域同时具有良好的局部性质; 能将信号分解成交织在一起的多尺度成分, 并对各种不同尺度成分采用相应粗细的时域取同样步长, 从而能够不断地聚集到所研究对象的任意微小细节, 同时在数学上具有严格意义上的突变点诊断能力<sup>[14]</sup>。设  $x(t)$  是平方可积函数,  $x(t) \in L^2(R)$ ;  $\phi(t)$  是被称为基本小波或母小波的函数, 小波变换的含义是: 把  $\phi(t)$  作位移  $b$  后, 在不同尺度  $a$  下与待分析信号  $x(t)$  作内积, 得:

$$WT_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \phi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt$$

式中:  $WT_x(a, b)$ —— $x(t)$  的小波变换;  $a$ ——尺度因子;  $b$ ——位移因子;  $\phi^*(t)$  是  $\phi(t)$  的共轭;  $\phi_a(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  是基本小波的位移与尺度伸缩。

满足容许条件<sup>[15]</sup> 的函数都可用作基本小波  $x(t)$ , 几种常用的基本小波有 Morlet 小波, 墨西哥帽小波, 样条小波和 Daubechies 小波。最普遍使用的复值小波为复 Morlet 小波, 在气象应用中标准的复 Morlet 小波有两种形式<sup>[16]</sup>, 本文选择中心周期为 1 的基小波:  $\phi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} e^{i2\pi t}$ , 式中:  $i$ ——虚数单位。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 基于 EOF 计算的空间分析

对湖北省 21 个气象站年降水量进行 EOF 和 REOF 分析, 其特征向量和旋转载荷量能够较好地反映降水的区域分布特征。表 1 是旋转前后的方差贡献率。由表 1 可以得出, 旋转后的各方差贡献比旋转前分布更均匀, 但方差贡献的大小顺序没有改变, 总的方差贡献率也没有发生变化。根据 North 准

则<sup>[17]</sup>, 前 3 个载荷特征向量场具有显著的物理意义, 表 1 中这 3 个特征场的累计贡献达到了 72. 0%。图

2 给出了前 3 个特征场, 它反映出湖北年降水的最主要空间振荡型态。

表 1 旋转前、后 6 个主成分对降水总方差的贡献率 %

序号		1	2	3	4	5	6	7
旋转前	方差贡献率	50. 0	15. 0	7. 0	6. 0	3. 8	3. 7	2. 4
	累积贡献率	50. 0	65. 0	72. 0	78. 0	81. 8	85. 5	87. 9
旋转后	方差贡献率	22. 7	20. 2	14. 1	11. 6	7. 9	7. 7	3. 7
	累积贡献率	22. 7	42. 9	57. 0	68. 6	76. 5	84. 2	87. 9

第一特征向量场图 2( a) 在湖北省区域内均为正值, 这表明湖北省的年降水在空间上有相当的同步性, 即发生降水事件的步调基本一致。这种全省一致的特征占总方差的 50. 0%, 显然这是受大尺度天气系统影响造成的。正值等值线分布总体上是从北向南逐渐减小, 大致呈南北纬向地带性分布, 特征量最大值出现在鄂西南地区, 中心值达到了 0. 87 以上, 说明该地区年降水事件最容易出现异常, 属旱涝异常的敏感区。

第二特征向量场图 2( b) 分布与第一特征向量明显不同, 主要表现为南北反向变化的空间分布特征, 鄂西北为正值、鄂东南为负值, 特征值零线沿大悟、安

陆、钟祥、荆门、枝城、五峰、宣恩一线分布。其中西北特征向量中心值在陨县, 中心值达到了+ 0. 64, 东南中心值在黄石, 中心值为− 0. 59, 这两个站点为该种空间分布类型中降水变化最敏感区。造成这种反位的原因可能与副热带高压的位置及其进退、强弱有关。当副热带高压位置偏南时, 该区域南部受副热带雨带的影响容易出现降水, 而西北部干旱; 当副热带高压北跳, 其北部处于副热带高压边缘位置容易出现降水, 其南部受副高控制高温少雨。

第三特征向量场图 2( c) 存在一个明显的条带状区域。反映了全省降水变化中部与西北、东南的差异, 即中部多、南北少或者中部少、南北多的分布。

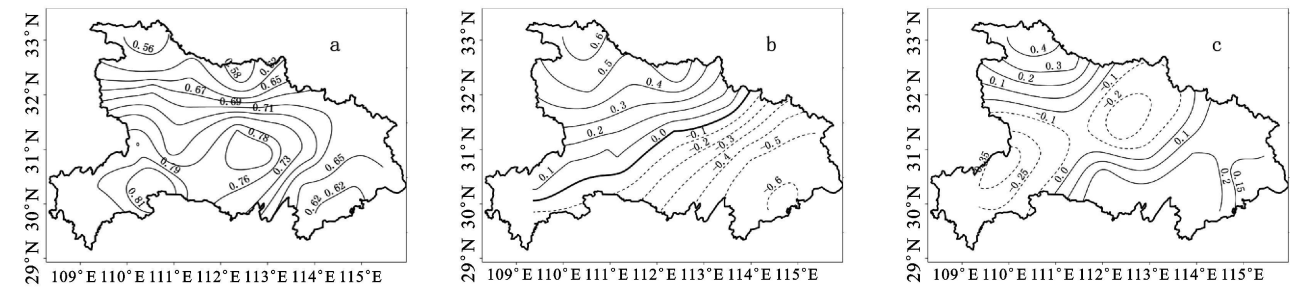


图 2 湖北省年降水量的第一( a)、二( b)、三( c) 载荷向量场

为进一步说明湖北省年降水空间分布特点, 本文在 EOF 的基础上, 做最大正交方差旋转。以累积方差贡献率达到 85% 为标准来确定旋转特征向量的个数。前 6 个主成分的累积方差达到了 85. 5%, 于是选取前 6 个主成分及对应的特征向量进行旋转, 以旋转因子载荷绝对值> 0. 5 作为荷载高值区。分析得到前 6 个向量场中高值区没有重叠的地方, 而且基本上布满了全区, 因此可以将湖北省降水划分为 6 个降水变化敏感区。

第 I 区– 鄂东区( 图 3a), 旋转载荷向量最大值区集中在麻城、英山、新洲、武汉、黄石、黄梅、嘉鱼、咸宁、监利、通山、崇阳, 其方差贡献率为 24. 4%, 最大值为 0. 87, 代表站是英山站。该区夏季东南季风来临早( 4 月、5 月), 江南气旋过境频繁, 静止锋面多, 加上幕阜山的强迫抬升, 使暮春初夏降水多而集中, 易发生渍( 涝) 灾<sup>[18]</sup>。第 II 区– 鄂西南区( 图 3b), 旋转载荷向量最大值集中在巴东、五峰、恩施、鹤峰、来凤、利川, 其方差贡献率为 22. 6%, 最大值为 0. 84, 代表站是绿葱坡站。

30° N 横贯该区中部, 接近水汽源地的南方海洋, 加之武陵山对夏季东南季风暖湿气流的被迫抬升, 成为湖北省的多雨区之一。第 III 区– 鄂西北区( 图 3c), 旋转载荷向量最大值区集中在陨西、郧县、房县、竹山、十堰、丹江口, 其方差贡献率为 15. 3%, 最大值为 0. 95, 代表站是陨西站。该区域由于相对纬度较高、距海较远、受北方干冷空气控制时间较长, 所含水汽较少, 成为湖北省年降水量最少的区域<sup>[19]</sup>。第 IV 区– 鄂中南区( 图 3d), 旋转载荷向量最大值区集中在当阳、荆州、宜昌、枝城、松滋, 其方差贡献率为 8. 4%, 最大值为 0. 74, 代表站是宜昌站。第 V 区– 鄂北区( 图 3e), 旋转载荷向量最大值区集中在襄樊、枣阳、老河口、宜城、南漳, 其方差贡献率为 7. 4%, 最大值为 0. 69, 代表站是老河口站。鄂北岗地由于位于大洪山等山地的背风处, 形成雨影区<sup>[20]</sup>。第 VI 区– 鄂东北区( 图 3f) 旋转载荷向量最大值区集中在随州、广水、钟祥、安陆、京山, 其方差贡献率为 7. 6%, 最大值为+ 0. 80, 代表站是广水站, 是湖北省的少雨区之一。

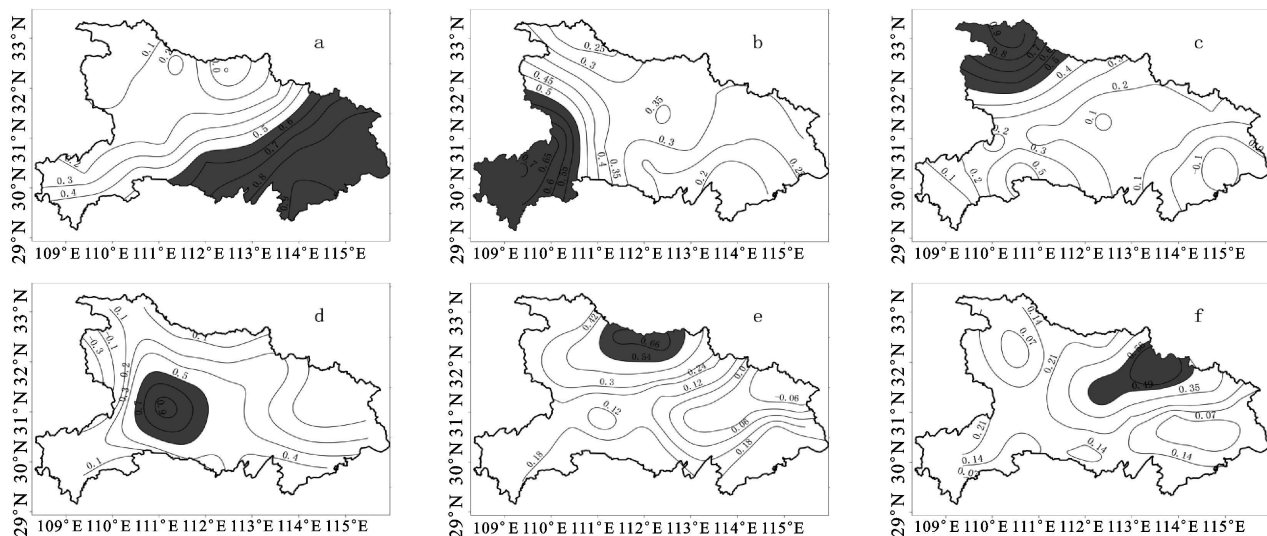


图 3 湖北省年降水量的第一(a)、二(b)、三(c)、四(d)、五(e)、六(f)旋转载荷向量场及降水分区

## 2.2 基于小波分析的时间序列的周期分析

为分析不同时间尺度下降水序列的变化特征,特选用复 Morlet 小波变换对湖北省 53 a 降水序列进行多时间尺度分析。

2.2.1 小波变换系数模平方时频特性分析 图 4 是降水小波变换模平方的时频变化图。年降水量在小波变化域中能量最强的区域有 1 个,它的中心点是 A (1982, 3), 还有 2 个能量较强的区域,中心点分别是 B (1966, 5) 和 C (1989, 7)。在中心 A 处,年降水量在小波

变化域中的能量十分强,主要发生在 1973–1993 年,尺度中心在 3 a 左右,振荡中心在 1982 年左右,影响尺度的范围是 1~4 a。在波动能量相对较弱 B 和 C 处,其主要影响区域和外围比 A 处要大。4~7 a 时间尺度信号主要发生在 1957–1973 年,尺度中心在 5 a 左右,振荡中心在 1966 年左右;6~14 a 时间尺度信号主要发生在 1966–2002 年。其余时间尺度信号能量变化则较弱。这 3 个尺度(周期)的波动,在年降水时间序列的多时间尺度变化当中具有重要的地位。

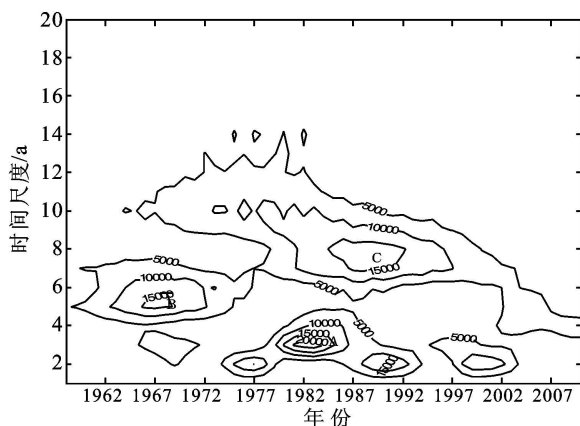


图 4 年平均降水序列小波变换系数模平方分布

2.2.2 小波变换系数实部时频特性分析 图 5 是降水小波变换实部的时频变化图。图中可以显示出降水量时间尺度变化、旱涝交替变化,1~4,4~7,6~14 a 时间尺度表现最明显,正负位相交替出现。小波方差<sup>[21]</sup>可以用来确定降水序列中存在的主要周期。从图 6 中可以看出降水序列有 3 个明显的峰值,分别对应 3 a、7 a、14 a 的时间尺度,第一峰值是 7 a 尺度对应的小波,说明 7 a 左右的周期振荡最强,为第一主周期,第二、第三主周期分别为 3 a 和 14 a。同时也说明这三个周期的波动,决定着湖北降水量的整个时间域内变化的特性。

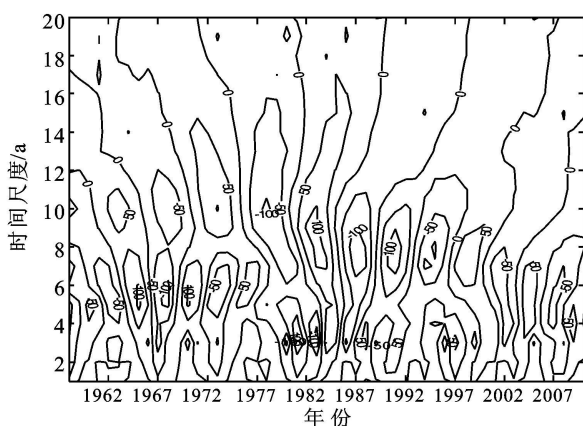


图 5 年平均降水序列小波变换系数实部时频分布

为进一步说明湖北降水序列旱、涝交替变化的波动特性,在图 7 上固定时间尺度的值,分别取 3, 7, 14 a, 作小波变换系数的实部随时间变化的过程线。图 7 给出了 3 种不同时间尺度的小波变换系数实部图,现以 7 a 时间尺度为例分析降水旱涝变化及正负位相转变点的位置。1959 年以前、1962–1965 年、1969–1971 年、1975–1977 年、1981–1984 年、1989–1991 年、1996–1998 年、2003–2005 年、及 2009 年以后为正位相,表示降水量偏多;而 1959–1961 年、1966–1968 年、1972–1974 年、1978–1980 年、1985–1988 年、1992

–1995 年、1999–2002 年、2006–2008 年年为负位相,表示降水量偏少。正负位相转变点在 1959 年、1962 年、1966 年、1969 年、1972 年、1975 年、1978 年、1982 年、1985 年、1989 年、1993 年、1996 年、2000 年、2003 年和 2006 年。通过分析各个主周期的变化趋

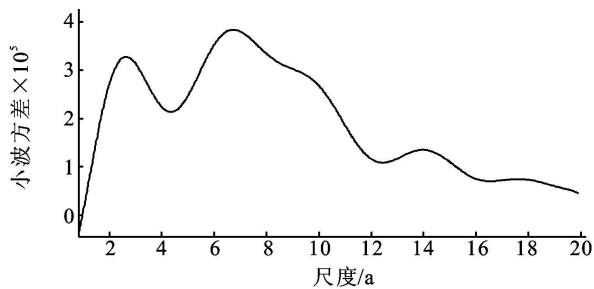


图6 湖北省年平均降水小波变换方差(经平滑处理)

### 3 结论

(1)通过 EOF 和 REOF 分析,研究了湖北降水场的典型分布。第一典型场表明全省干湿具有一致性特征。其他典型场主要表现了天气系统、地理位置和地形等因素造成的局部地区之间的差异。通过 REOF 分析可以将湖北降水划分为鄂西北、鄂北、鄂东北、鄂东、鄂中南、鄂西南 6 个异常区。

(2)通过小波分析,湖北省年平均降水量存在多时间尺度特性,在长期的变化中存在 3 a、7 a 和 14 a 左右的周期变化。

(3)通过对湖北省年降水量 3 个周期的旱、涝交替特征分析得到,无论是 7 a 还是 14 a 的周期变化趋势,2008 年以后湖北省降雨偏多,并会持续若干年,2014 年之后降雨将会投入下个干旱期。

#### 参考文献:

- [1] 匡正,季仲贞,林一骅. 华北降水时间序列资料的小波分析[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 312-317.
- [2] 吕学梅,高安春,王新,等. 1961–2008 年临沂降水变化特征的气候分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(35): 17567-17570.
- [3] 黄强,赵雪花. 河川径流时间序列分析预测理论与方法[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2008: 9-10.
- [4] 任国玉. 气候变化与中国水资源[M]. 北京:气象出版社, 2007: 5-6.
- [5] 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.
- [6] 刘可群,陈正洪,张礼平,等. 湖北省近 45 年降水气候变化及其对旱涝的影响[J]. 气象, 2007, 23(11): 58-64.
- [7] 李帅,汤振权,匡亚红. 湖北省近 50 年来的气温和降水

势可以看出,2011 年左右湖北的降水量将处于偏少期,2012–2013 年以后年降水量将进入偏多期;分析较大尺度 14 a 的变化趋势可以得出,2008–2014 年左右,湖北的年降水将处于偏多期,而 2014 年以后的 6, 7 a 内,湖北的年降水将处于偏少期。

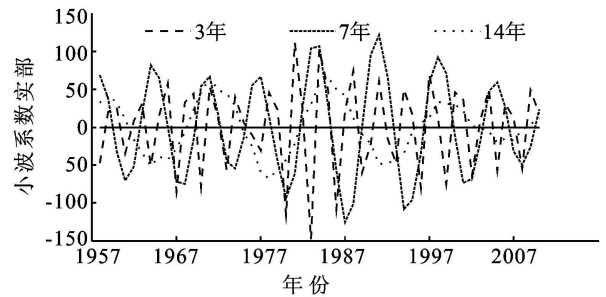


图7 不同尺度下小波变换实部变化过程

变化趋势分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(4): 1652-1655.

- [8] 吴宜进,邓先瑞. 湖北省降水量的周期分析[J]. 热带地理, 1998, 18(3): 201-204.
- [9] 杨远东. 水文水资源插补延长系列的计算方法[J]. 水资源研究, 2008, 29(1): 13-15.
- [10] 董富通,张雄. 类星体 3C345 的光变周期特性[J]. 物理学报, 2009, 58(11): 16-22.
- [11] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法[M]. 北京:气象出版社, 2002: 143-154.
- [12] Horel J D. A rotated principal component analysis of the interannual variability of the Northern Hemisphere 500 mb height field[J]. Mon. Wea. Rev., 1981, 109: 2080-2092.
- [13] 葛哲学,沙威. 小波分析理论与 MATLAB2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2007: 1-3.
- [14] 王文圣. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2005: 4-5.
- [15] 葛哲学,沙威. 小波分析理论与 MATLAB2007 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2007: 29-30.
- [16] 吴洪宝,吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京:气象出版社, 2005: 208-225.
- [17] North G R, Bell T L, Cahalan R F. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. Mon. Wea. Rev., 1982, 110(7): 699-706.
- [18] 刘敏,李书睿. 湖北省雨涝灾害的指标和时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 1995, 4(2): 149-143.
- [19] 邓先瑞,黄建武,朱吉英. 湖北省降水量分布特征与蒸发力的初步研究[J]. 华中师范大学学报, 1987, 2(2): 283-290.
- [20] 黄建武. 湖北省旱涝灾害基本特征与成因分布[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 482-487.
- [21] 刘东,付强. 基于小波变换的三江平原井灌区主汛期降水序列多时间尺度分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 42-45.