

# 中国旱涝史料的层次分析

林振山 卞维林

(南京大学大气科学系, 南京, 210093)

金 龙

乐 群

(江苏省气象科学研究所, 南京, 210008) (南京大学大气科学系, 南京, 210093)

## 摘 要

文中用子波变换的方法对中国近 500 年旱涝等级资料进行了分析, 发现在不同气候层次上, 旱涝变化的特征有所差异, 高层次上的旱(涝)期常由若干个低层次的偏旱(涝)期组成; 各层次上气候系统的动力行为也表现出不同的特征, 要对气候的变化趋势作预测必须在具体层次上而言才有意义。不同层次间突变点的变化往往表现为层次升高时部分奇异点(突变点)退化为平常点, 而层次降低时, 又会发生平常点进化为奇异点的现象。此外, 还发现中国总体上说偏涝期长于偏旱期, 但不同地区又有所不同; 中国南北方的旱涝演替存在一定的位相差。

关键词: 气候, 层次, 子波分析。

## 1 引 言

时间序列就是按时间次序排列的观测值集合。气候资料便是一个实例。如何处理和分析数据, 以揭示客观现象本质和内在的规律性, 达到有效地对客观现象及其变化规律进行预报和控制, 是一直没有能够得到很好解决的问题, 尤其对非线性时间序列。

气候资料是一种非线性时间序列, 这是由气候系统本身所固有的非线性决定的。它具有层次性和奇异性。层次性<sup>[1,2]</sup>: 气候系统本身是由各种大小不同时间空间尺度的成分所组成, 分析气候资料必须分析清楚其在不同层次上的不同性态, 即时空域上的精细结构; 奇异性<sup>[2]</sup>(突变性): 这一点已为许多气候工作者所指出, 如王绍武等曾指出中国近代气温变化中, 1920 年左右是一个突变点位置。研究气候资料尤其是对未来气候态作出预测, 判断突变点的位置以及其动力性态无疑是十分重要的。

对时间序列资料进行分析, 过去常用的方法有 Fourier 变换和传统的统计方法等。Fourier 变换从函数  $e^{ix}$  出发, 成功的构造了  $L^2$  空间的一种正交展开, 到目前为止仍不失为一种十分有效的分析工具。但因为其所用函数  $e^{ix}$  不是局部化, 即在时空域上不具有任何分辨率, 不能用作局部分析, 故不能反映不同尺度的不同特征, 更不能揭示出时间序列资

料变化的奇异性位置<sup>[3]</sup>。经典的统计方法也具有类似的局限性。

子波分析<sup>[4]</sup>既保留了 Fourier 分析的优点, 又弥补了它的不足, 它从有限个具有正则性与振动性的子波函数出发, 通过平移和展缩, 为  $L^2$  空间提供了一类新的正交基——子波正交基。从本质上讲, 子波分析是一种局部的带有多种尺度的 Fourier 分析, 它的优点是子波级数集中取值于所研究函数的奇异支集上<sup>[4]</sup>。故其在时空域同时具有良好局部化性质, 而且它可以通过改变位置和放大系数而聚焦到所研究对象的任意微小细节, 从而成为在各层次上研究函数, 研究函数奇异性的有力工具。

作为 Fourier 变换的一种补充, 又因其本身独具的优点, 子波分析正越来越受到人们的重视, 在信号处理、地震勘探、非线性科学等领域均已被应用且取得了不少成果。但如何将其应用到气象资料的分析方面, 至目前尚属初步阶段。

文中将子波变换方法应用来分析中国近五百年旱涝资料(正文简称为 DWGS)的层次结构及特征。第二部分介绍连续子波分析的理论框架; 第三部分, 利用子波变换方法对中国近五百年 DWGS 进行层次分析, 并对不同气候层次的特征以及突变点的情况进行分析, 还对旱涝变化的一些特征进行了总结。

## 2 子波分析理论

子波分析的开创性工作是由 A Grossmann 和 J Morlet<sup>[5]</sup>在 1984 年进行的。它的主要思路是将任一信号分解成时间和频率(尺度)的独立贡献, 同时又不失去原有信号的信息。这种分析方法在选定子波母函数后, 通过平移和伸缩来进行。

这里选取的子波母函数为“墨西哥帽”(MHAT)波:

$$g(t) = (1 - t^2)e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (1)$$

它的形状类似孤立波, 在奇点( $t = 0$ )有极大值, 这将为揭示信号的奇异性(突变点)创造条件。

与式(1)对应的 MHAT 子波为:

$$g^t_p = \frac{1}{a} g\left(\frac{t - t_0}{a}\right) \quad (2)$$

其中  $a$  为伸缩尺度,  $t_0$  为平移因子。式(1)的 Fourier 变换为:

$$g(\omega) = \sqrt{2} e^{-\frac{\omega^2}{2}} \quad (3)$$

与  $g^t_p$  Fourier 变换中心频率  $\omega$  所对应的周期, 即时间尺度为<sup>[4]</sup>:

$$T_a = \sqrt{2} a \quad (4)$$

有必要指出: 式(1), (4)的关系仅对 MHAT 波成立, 它是由其子波基的正交性推出的; (2) 这里的周期  $T_a$  是相对 Fourier 变换而言的, 而不表示子波分析中某层次(或某时间尺度)所表现出的周期长度。  $T_a$  是表征系统某层次的时间尺度, 由于  $a$  与  $T_a$  同量级, 为方便起见常将  $a$  视为时间尺度; (3) 在子波变换中, 同一尺度的变化中可以包含一定范围的周期成分(如 8 a 时间尺度的气温资料的子波变换曲线中可以同时出现 3 a, 5 a, 11 a 等周期特性), 而同一周期也可以出现在多个尺度的变化中。这就是多分辨子波分析优于单分辨 Fourier 分析的所在。在实际工作中, 某时间尺度子波变换曲线所蕴含的周期性(如周

期长度、周期振幅)是直接根据其子波变换图线给出的(周期值是根据横坐标值来确定的,周期振荡的振幅是根据等值线的疏密而决定相对大小的)。设信号(任一函数) $f(t)$ 为任意平方可积函数,则 $f(t)$ 的子波变换为:

$$H_g = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t-t_0}{a}\right) dt \quad (5)$$

将式(1)代入式(4)有:

$$\begin{aligned} H_g &= f(t) * g\left(\frac{t-t_0}{a}\right) \\ &= a^2 \frac{d^2}{dt^2}(f * g) \end{aligned} \quad (6)$$

其中:  $g\left(\frac{t-t_0}{a}\right) = \frac{1}{a} g\left(\frac{t-t_0}{a}\right)$ , 而“\*”为卷积符号。由数学分析知道,一个函数的二阶导数为零时,对应于拐点(突变点)。所以,从式(6)可以看出:MHAT子波变换的零点( $H_g-t$ 的交点)对应于 $f * g$ 的拐点(突变点)。即MHAT子波所诊断出的突变点( $H_g-t$ 曲线的零点)具有数学上的严谨性,这是任何统计方法所不具有的优点。

由式(5)还可以看出,通过改变 $a, t_0$ 的取值,可以将研究目标聚焦在某一点( $t_0$ )上进行放大( $\frac{1}{a}$ )处理。所以子波变换具有“显微镜”的聚焦放大作用,这也是任何传统的统计方法所不具有的特性。

$$\text{文中取} \quad a = 1 \times 2^j \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (7)$$

在实际应用中,只要将资料 $f(t_i)$ ( $i = 1, 2, \dots$ )及 $a$ 的值(式(7))代入式(4)就可以十分方便地画不同时间尺度( $a$ )的子波变换图 $H_g-t$ 。由于资料是离散的,文中均采用龙贝格积分法来实现。

### 3 中国近五百年 DWGS 的层次分析

文中所用资料 $g(t_i)$ ( $i = 1, 2, \dots$ )取自《中国近五百年旱涝等级资料》<sup>[6]</sup>,其中旱涝情况分为5个等级,即1级(涝),2级(偏涝),3级(正常),4级(偏旱),5级(旱),其具体情况以及近代仪器所测降水资料如何划分等级等详见文献[6]。

下面介绍利用子波变换的方法对中国近五百年旱涝等级资料(DWGS)分析得到的一些结果。

#### 3.1 高层次上的偏旱(涝)期包含有若干个低层次的偏旱(涝)期

图1是北京地区近五百年DWGS子波的分析结果。图中横轴为时间(年代),纵轴 $H_g$ 为DWGS距平值利用公式(4)进行子波变换的结果(下同)。从图中可看出:

(1)对于高层次(图1a),系统存在3个突变点(1601, 1755, 1868)。

(2)对中层次(图1b),相当于60 a时间尺度,系统存在10个突变点,高层次上的偏旱期(1601~1755年)也分解为两个偏旱期(1601~1661年, 1714~1755年)和一个偏涝期(1661~1714年)。

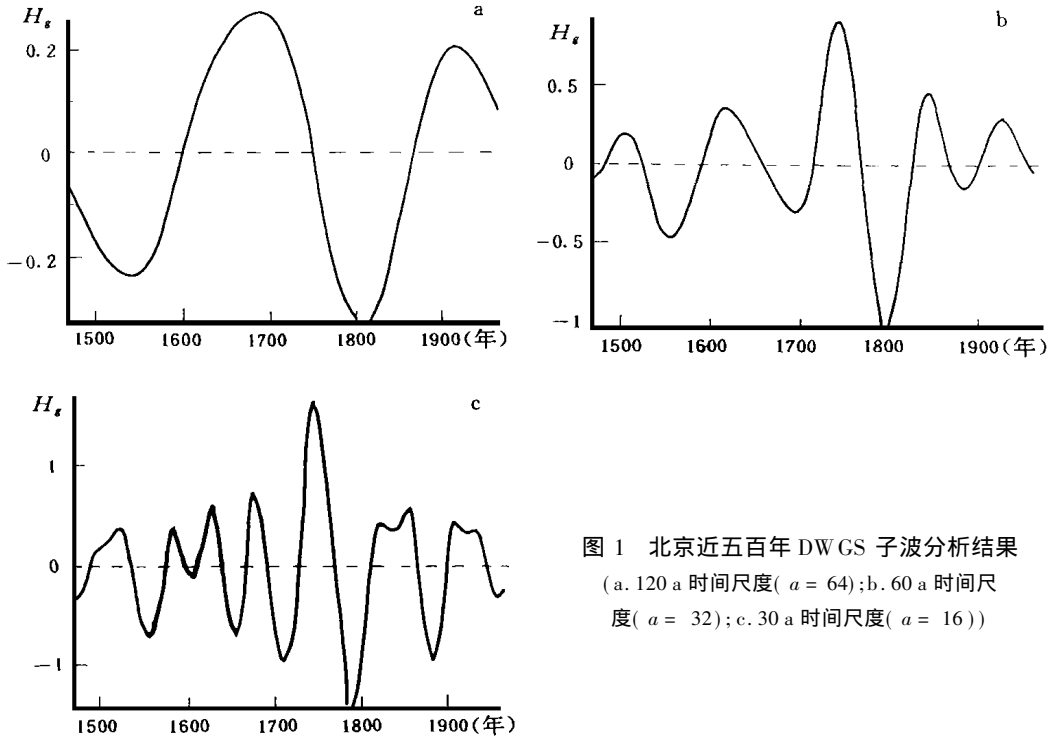


图 1 北京近五百年 DWGS 子波分析结果  
(a. 120 a 时间尺度 ( $a = 64$ ); b. 60 a 时间尺度 ( $a = 32$ ); c. 30 a 时间尺度 ( $a = 16$ ))

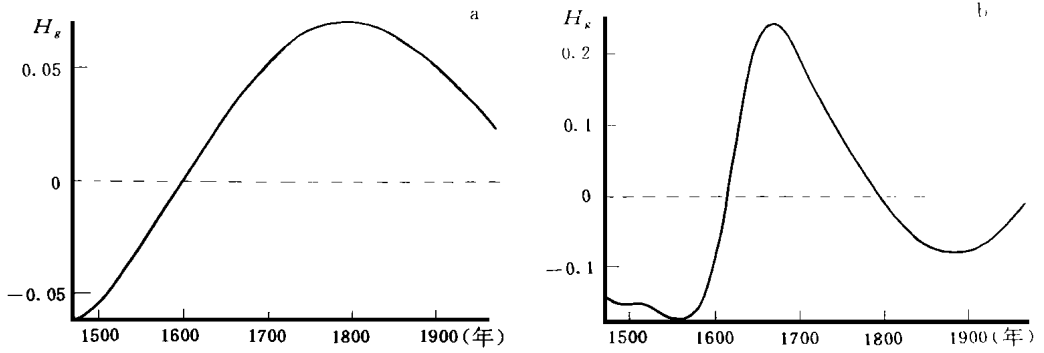
(3) 再降低层次, (图 1c 相当于 30 a 时间尺度), 可以发现突变点个数更多(为 14 个), 而且中层次的偏旱(涝)期在低层次上也同样常是由若干个偏旱(涝)期组成, 如中层次上的偏旱期(1601 ~ 1661 年)又包含着低层次上的一个偏旱期(1614 ~ 1642 年)和两个偏涝期(1601 ~ 1614 年, 1642 ~ 1661 年)。随着层次的降低, 即放大倍数  $a^{-\frac{1}{2}}$  的增大, 可以看到愈加精细的结构。

从上面的分析可以看出, 高层次上的偏旱(涝)期常常包含有若干个低层次上的偏旱(涝)期; 且随着层次的降低, 除原有的突变点外, 还不断地增加突变点, 反之则减少。即高层次上的突变点在低层次依然存在, 而且还会有不少平常点在层次的降低过程中进化为奇异点(突变点); 而低层次上的奇异点(突变点)随着层次的升高, 又常会发生退化, 成为平常点。

### 3.2 气候的变化趋势必须相对一定的气候层次而言才有意义

从上面的分析已知, 对于一个高层次(大尺度)的偏旱(涝)期在低层次上往往有更精细的结构, 表现为包含有若干个低层次的偏旱(涝)期, 这就导致在不同气候层次上, 对气候的变化趋势作判断时, 往往会得出不尽相同的结论。

图 2 给出了上海地区 FWGS 子波分析  $a = 64$  (相当于 120 a 时间尺度) 和  $a = 248$  (相当于 500 a 时间尺度) 的结果。从图中可看到在高气候层次上(图 2a), 旱涝的变化呈单峰状, 而在稍低的层次上(图 2b), 则为一峰两谷状, 以上世纪中后叶到本世纪中叶为例, 在高气候层次上看表现为单一的由偏旱向偏涝转化的趋势, 而在 120 a 时间尺度上则为先由偏旱转向偏涝, 再又从偏涝期走向偏旱期。可见在这两个层次, 以上世纪中后叶至本

图 2 上海 FWGS  $a = 64$  和  $a = 248$  的分析结果

世纪中叶,其旱涝变化的情况是不同的。

总之,气候的变化在不同的气候层次上常表现为不同的趋势(对某一点或一段时间而言)。换句话说,离开具体的气候层次,而谈论气候的变化趋势是没有多大意义的。

### 3.3 中国旱涝变化的一些特征

图 3 中给出了对中国华北(北京、天津、河北一带)、华东(长江中下游)、华南(广东、广西)、福建一带以及全国进行子波分析的结果,时间尺度取为  $50 a$  ( $a = 25$ )。

在表 1 中给出了各区以及全国偏旱(涝)中心年代及突变点年份。可以看出,在  $50 a$  时间尺度上,全国总体来看,近五百年中,比较严重的偏旱期分别位于 16 世纪前半叶(1530 年),17 世纪前半叶(1638 年)以及本世纪初(1919 年),而最严重的偏涝期位于 16 世纪后半叶(1580 年),18 世纪,19 世纪相对比较平稳,旱涝变化不大。几个比较重要的突变点分别是 1501 年,1553 年,1942 年,其中 1553 为中偏涝转向偏旱,而其它两个则为比较严重的偏旱转向偏涝期。

表 1 华南、华东、华北和全国偏旱(涝)中心年份及突变点年份

地 区	旱涝情况 和突变点	年 份
华 南	偏 旱	1533, 1682, 1763, 1906
	偏 涝	1485, 1573, 1628, 1728, 1801, 1854, 1953
	突变点	1508, 1559, 1651, 1703, 1746, 1787, 1876, 1931
华 东	偏 旱	1536, 1644, 1793, 1872, 1933
	偏 涝	1491, 1588, 1693, 1750, 1836, 1895
	突变点	1568, 1559, 1620, 1677, 1770, 1814, 1864, 1881, 1907
华 北	偏 旱	1515, 1626, 1750, 1846, 1927
	偏 涝	1563, 1665, 1712, 1791, 1887, 1966
	突变点	1488, 1538, 1598, 1651, 1728, 1770, 1819, 1865, 1907, 1950
全 国	偏 旱	1530, 1638, 1765, 1919
	偏 涝	1480, 1580, 1721, 1840, 1959
	突变点	1501, 1553, 1615, 1696, 1746, 1797, 1890, 1942

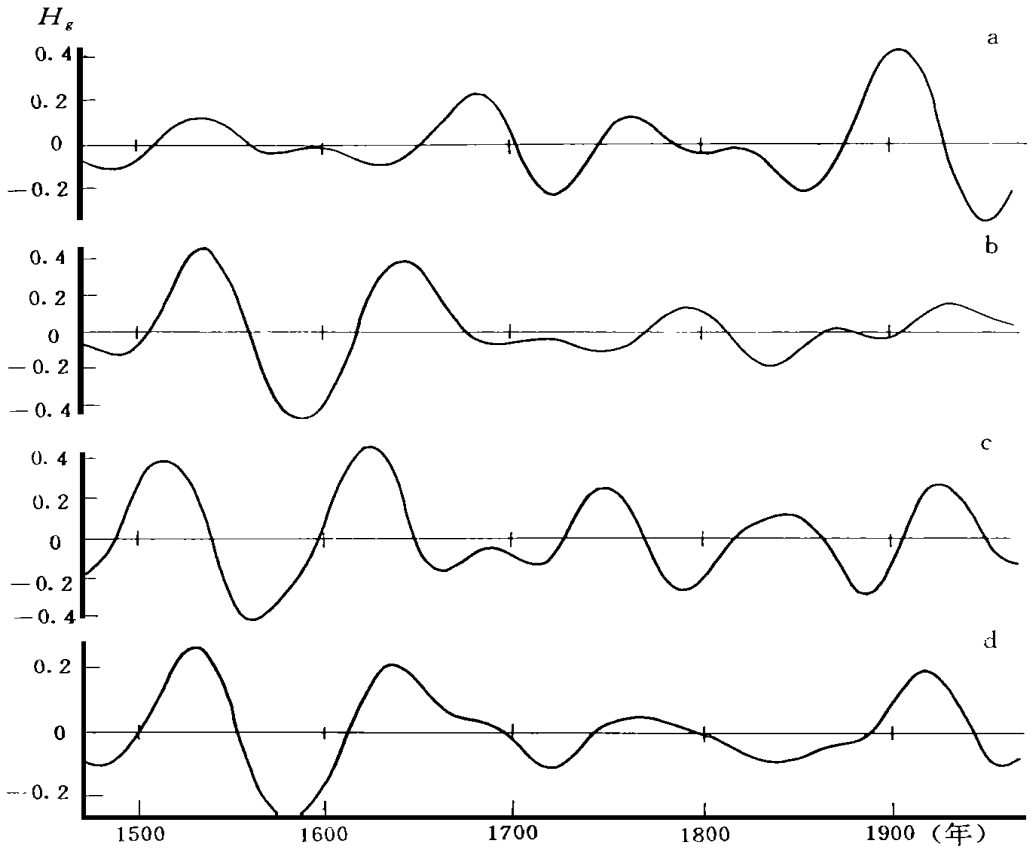


图3 1470~1969年DWGS 50 a时间尺度的分析结果

(a. 华南; b. 华东; c. 华北; d. 全国)

如把  $H_g$  随年代变化的波状曲线理解为一个时间域上的流动,称之为“时间流”,表示一种与空间流相类似,不过流动方向不是空间上的某个方向而是时间域上的过去或未来方向。

分析图3a—图3c,不难发现其“时间流”波形相当类似,只是随着地理位置的由北向南(图3c—3a),波动存在一定的位相差;或者说,波动发生了向“下游”(即未来)的移动。图3c中的第一个峰位于1515年,在图3b中移到了1536年,而到了华南(图3a)发生了减弱,成为一个弱偏涝峰,位置在1594年;再看华北旱涝变化的第二个峰值(位于1626年),在华东图上位于1644年,到了华南仍然表现为一个偏旱峰,位于1682年;类似的可分析其余的波峰和波谷移动。总体上说,在50 a时间尺度上,华东的旱涝变化相对于华北而言,落后一个大约为20 a的位相,而华南比华东则又落后40到50 a的位相。

另外,分析不同层次上各区及全国(偏)旱涝演替的周期值。限于篇幅及图的限制,这里只给出分析结果。表2中,分别给出了  $a = 4, 8, 16, 25, 50$  的各区及全国(偏)旱涝演替的平均周期、旱半周、涝半周的平均值。

表 2 1470 ~ 1696 年华南、华东、华北及全国旱涝等级子波分析结果(变化周期)

地区	旱涝情况	$a = 4$	$a = 8$	$a = 16$	$a = 25$	$a = 50$
华 南	平均	15.7	32.2	63.8	103.2	178.7
	旱	7.9	16.2	31.5	51.7	86.9
	涝	7.8	16.0	32.3	51.5	91.8
华 东	平均	16.3	31.9	64.1	103.7	183.3
	旱	8.0	15.3	32.1	50.1	86.1
	涝	8.3	16.6	32.0	53.6	97.2
华 北	平均	16.6	32.7	63.5	94.2	187.1
	旱	8.3	16.4	32.0	47.4	96.8
	涝	8.3	16.3	31.5	46.8	90.3
全 国	平均	16.1	32.3	63.8	100.5	181.7
	旱	8.0	15.9	31.8	49.4	88.4
	涝	8.1	16.4	32.0	51.1	93.3

从表中可以看出:

(1) 不同的层次上, (偏)旱涝演替的周期有明显的不同;

(2) 从总体上看, 全国(偏)旱涝演替的周期中, 涝半周比旱半周长, 但各区又各有其特点, 具体表现为华东区的涝半周比旱半周长, 而华北区则与之相反, 表现为旱半周比涝半周长。这与中国的地理情况及季风、梅雨等天气过程的活动是有一定的关系的。

### 3.4 在不同层次上作气候预测

通过上面的分析知道, 不同层次上, 气候系统的动力性态亦各有特点, 主要表现在高层次上的偏旱(涝)期常常由若干个低层次的偏旱、涝期组成; 随着层次的升高和降低, 突变点往往会表现出退化和进化的动力行为, 不同层次上突变点出现的周期差异很大, 气候的变化必须相对于不同层次而言才有意义。

所以, 文中提出作气候预测必须在不同的层次上进行, 已是顺理成章的事了。作为佐证, 在图 4 中给出全国 1470 ~ 1969 年 DWGS 距平子波分析的结果。对未来的一段时间内作旱涝变化趋势预测, 可以发现在不同层次上, 中国近期所处的旱涝演替的阶段也不完全相同。至于在不同层次上, 如何相应的进行预测, 发现必须根据各层次本身所具有的特点进行。这有待以后的工作作详细的阐述。

## 4 结 语

文中用子波变换这一有力的数学工具, 对中国近五百年旱涝等级资料(DWGS)进行分析, 得到以下几点结论:

(1) 高气候层次的偏旱(涝)期常常是由若干个低层次的偏旱(涝)期组成。

(2) 随着气候层次的变化, 突变点的动力性态亦有所不同。高层次的平常点随着层次的降低往往会进化为突变点, 而低层次的突变点, 随着层次的提高又常常会退化为平常

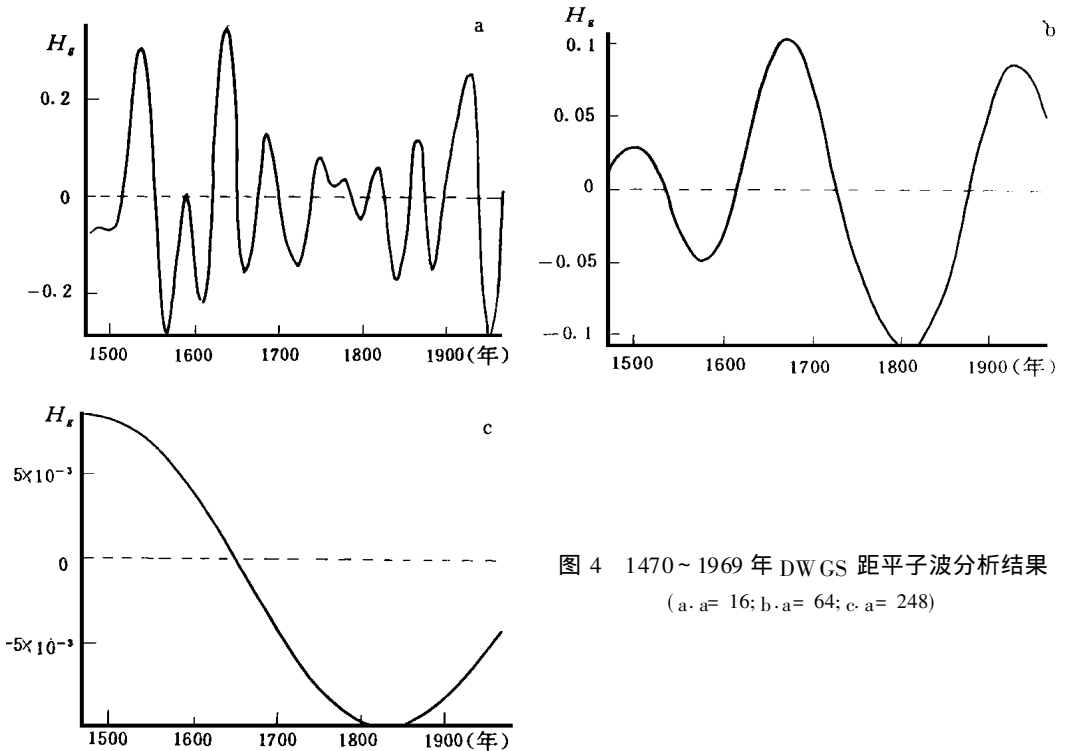


图 4 1470~1969 年 DWGS 距平子波分析结果  
(a.  $a=16$ ; b.  $a=64$ ; c.  $a=248$ )

点; 不同层次上, 突变点出现的时间间隔也有不同的特征。

(3) 判断和预测气候变化的趋势, 必须相对于具体气候层次而言才有意义。

(4) 在不同气候层次上, 中国南方旱涝变化比北方有一定的位相落后。

## 参考文献

- 1 林振山. 长期预报的相空间理论和模式. 北京: 气象出版社, 1992. 96~103
- 2 卞维林, 林振山, 邓自旺. 上海气温资料的子波分析. 高原气象, 1995, 14(3): 359~364
- 3 刘式达, 刘式适. 分形和分维引论. 北京: 气象出版社, 1993. 50~64
- 4 Y 迈耶, 尤众译. 小波与算子第 1 卷: 小波. 北京: 世界图书出版公司, 1992. ~
- 5 Grossmann A and Morlet J. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape, SIAM, J Math Anal 1985, 15: 723- 726
- 6 中央气象局气候科学研究所主编. 中国近五百年旱涝等级资料. 北京: 地图出版社, 1982. ~



# LEVEL ANALYSIS OF DRYNESS AND WETNESS GRADES SERIES

Lin Zhenshan Bian Weilin

(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093*)

Jin Rong

(*Research Institute of Meteorological Science of Jiangsu Province, Nanjing, 210008*)

Yue Qun

(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093*)

## Abstract

In this paper, the waveletic analysis is used to focus on the dryness and wetness grades series in 500 years. The results show that the characters of xerasium are different in different levels, dry (waterlogging) phase in upper level is made up of several dry (waterlogging) phase in lower level. The dynamic properties of climatic system in different level have different characters. The singular points often degenerate to normal points when the level changes from lower to upper, vice versa, the normal points will evolve to singular points. The results also show that the waterlogging semi-period is longer than dry semi-period in generally, but it has different character in different area. It also find there is phase difference between the south and the north.

**Key words:** Climate, Level, Waveletic analysis.