

# 近百余年北京气候变化的小波特征\*

谢 庄

曹鸿兴

(北京市气象局,北京,100081) (中国气象科学研究院,北京,100081)

李 慧 张雷刚 陈道东

(北京市气象局,北京,100081)

## 摘 要

文中对 1870~1994 年北京年、季平均气温,以及 1841~1994 年北京年、季降水序列进行了分析和小波变换计算,对所得结果进行了宏观分析。结果表明,温度增暖期和低温期与小波波幅中心间的周期增长、波幅加强相关联。降水距平绝对值越大,相应的小波周期越长和波幅越强。即小波分析在气候变化研究中显现了年与年之间、波长与波长之间的波幅变化形态与特征,从而为了解气温和降水随着年代的变化展示了一个视窗。

**关键词:** 气候变化,小波分析,全球增暖,旱涝趋势。

## 1 引 言

全球增暖和水资源短缺是近年来科学家关注的焦点,中国受上述两个问题干扰最敏感的地区是华北地区。研究表明,中国近百年来来的增温趋势与北半球的情况大致相似<sup>[1]</sup>。此外中国北方大部地区近 40a 来逐步增暖,华北地区 1980 年代气温约比前 30a 平均(1950~1979)升高 0.71℃,大大超过了全球增温率(30a 升高 0.24℃)<sup>[2]</sup>。对 1940 年以来北京气温的研究表明北京的平均气温具有明显的上升趋势,最高气温和最低气温存在非对称变化的趋势。冬季最低气温的增加幅度远比最高气温大得多,夏季最低气温略有上升,最高气温则是下降的。最终导致日较差变小,年较差也变小<sup>[3]</sup>。

华北地区是中国水资源匮乏地区之一,人均水资源的占有量只是全国平均的 1/6,耕地亩均水资源只是全国的 1/10<sup>[4]</sup>,华北自 1950 年代以来,降水持续减少,1980 年代达最低值<sup>[5]</sup>。北京位于华北东北部,文中对北京降水的研究与上述华北的情况基本相同,自 1950 年代以来北京年降水量平均以每 10a 减少 12.2% 的速度持续下降,1980 年代达最低值<sup>[6]</sup>。

这里在简述小波分析原理的基础上,对北京 1870~1994 年气温和 1841~1995 年降水进行小波变换计算,分析冷暖期、干湿期的小波波幅特征。

## 2 小波分析原理

小波分析具有傅氏变换的特征,既可确定函数在整个频域上的频率特点,也具有 1960 年代

\* 初稿时间:1997 年 11 月 20 日;修改稿时间:1998 年 2 月 17 日。  
资助课题:“副热带高压带形态变异机制研究”国家自然科学基金重点项目。

发展起来的窗口傅氏变换的特征。能反映信号在时频域上的总体特征又能提供时域和频域局部化的信息,克服了窗口傅氏变换对带有奇异性的信号不很有效的弱点。小波分析的定义如下:

设  $g(t)$  为满足下列条件的任意函数

$$\int_R g(t)dt = 0 \quad (1)$$

$$\int_R \frac{|G(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (2)$$

其中  $G(\omega)$  是  $g(t)$  的频谱,称信号  $f(t)$  的小波变换为

$$W_f(\tau, \alpha) = |\alpha|^{-1/2} \int_R f(t) \bar{g}\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt \quad (3)$$

其中  $t$  是时间参数,称为平移因子,反映了时间上相对于  $t$  的平移。在实际计算中相当于时间坐标,  $\alpha$  称为放大因子,反映了小波的周期长度,  $1/\alpha$  相当于频率,  $g(t)$  称为母小波函数,从式(1)可看出小波在整个实数域上的积分为零,即具有波动性。从式(3)可看出  $W_f(\tau, \alpha)$  能同时反映时域参数  $t$  和频域参数  $\alpha$  的特性,它是信号  $f(t)$  通过单位脉冲响应的滤波器的输出,亦即小波变换是一系列带通滤波器对信号进行滤波,带通滤波器的带宽随着中心频率的变化自动调节,频率低则带宽窄,否则相反。所以信号变化缓慢的地方与低频相对应。信号变化复杂的地方,跃变比较多,主要是高频成分,且频率范围较大。即小波变换能自动调节带宽,因而可分析局部特征。

取墨西哥帽状小波作母小波函数,其表达式为

$$g(t) = (1 - t^2) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \quad -\infty < t < \infty \quad (4)$$

在实数域,式(3)的离散表达式

$$W_f(\tau, \alpha) = |\alpha|^{-1/2} \Delta t \sum_{i=1}^N f(i\Delta t) g\left(\frac{i\Delta t - \tau}{\alpha}\right) \quad (5)$$

式中  $\Delta t$  为样本间隔,  $N$  为样本量,式(4), (5)为文中所采用的计算公式。

由式(5)可见,小波波幅  $W_f(\tau, \alpha)$  随着参数  $t$  和  $\alpha$  变化,通过小波变换(5),由一维要素序列变换成了以  $t$  和  $\alpha$  为坐标的波幅  $W$  的图型。直观地讲,就是由一维图象变换成二维图象,这样通过对二维  $W$  图象的分析得到关于要素变化的特征,也就是获得过去不作小波变换得不到的新的信息。每一年的小波特征通过垂直向截取波幅图来考察,每一种周期的小波随时间的变化通过水平向截取波幅图来考察。这样我们得到随时间坐标、周期坐标而变的局部化特征。

### 3 资料和计算

北京自 1841 年开始有观测记录,但 1870 年以后其平均气温资料才较完整,所以气温记录的计算起始年取为 1870 年,月、季的降水资料较完整,则取 1841 年为起始年,另外鉴于北京冬季降水仅 10 mm 左右,本文只选取年、春、夏、秋 4 个降水资料进行计算。

为计算需要,将资料向前和向后各延拓一个样本长度,变换后再将前后延拓部分舍弃,只留中段。波的最大周期取资料长度的 1/3,以下分别叙述用小波分析探索北京的气

温和降水气候特征概况。

### 4 气温的气候特征

文中取1月代表冬季,7月代表夏季,取日平均气温的月平均值进行研究,并对各序列进行10 a平均距平和线性趋势计算,以便与小波变换值进行对比分析。

#### 4.1 冬季气温的气候特征

1870年代~1980年代和1990~1994年期间1月平均气温的10 a平均距平和5 a距平值分别列于表1。

表1 北京1870~1994年1月平均气温年代距平 (单位C)

年代	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990~1994
10 a距平	-0.87	-0.12	-0.49	-0.01	-0.51	0.54	-0.29	-0.021	-0.04	0.31	0.48	0.72	1.78

从表1中可知19世纪后期气温偏低,20世纪初开始升温,1920年代达次高值,1930~1950年代略偏低,1960年代后又上升,1980年代达最高值,而1990年代前5 a比最高值还高。图1a为1870~1994年逐年1月平均气温图,图中线性趋势为 $1.12^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 。图1b为上述气温序列的小波变换图,图中较好地反映了上述气温的特征。由图中可见12 a周期以下的高频波变化规律不明显,12 a以上周期的低频波发展很强,形成正负相间的振荡形式,在1870年代,中心波长在15 a,随后有小波波长变长,波幅等值线变密的趋势。在1890年代中心波长增为22 a,1910年再增长到24 a,1930年代出现一个转折,随后的小波波型变的与其前的十分不同,中心波波长再次变短,波幅等值线变得稀疏。而从1980年代开始两中心间的长度变长,波幅等值线又明显加密了,但至今尚未形成中心,小波波幅

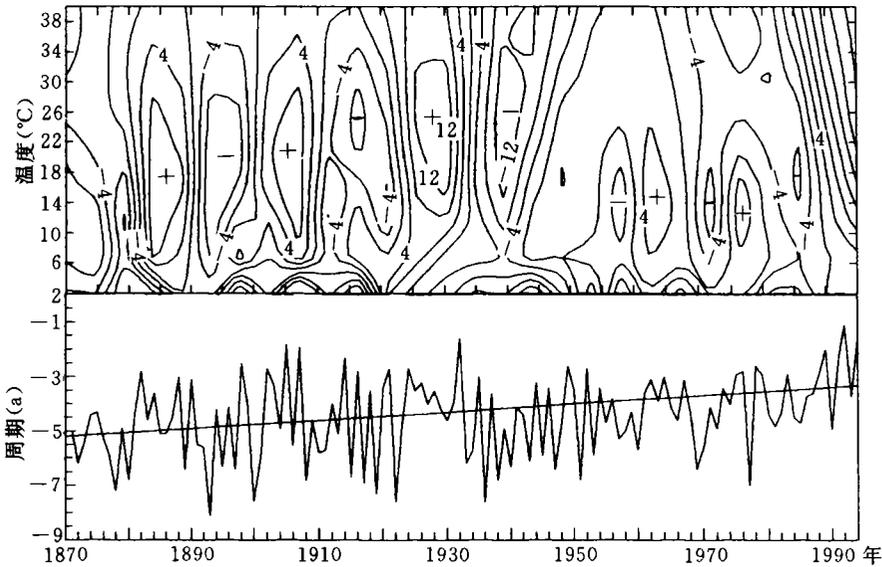


图1 北京1月平均气温及小波波幅变化图

值已超过 1920 年代的波幅值,且仍在逐年增大,上述迹象表明 1980 年代开始的这一暖期还将持续或发展。此外在 19 世纪末至 20 世纪初的偏冷期,小波的负中心也很强,振幅也很大,即低频波波幅绝对值的增强和气温的偏暖期与偏冷期很好地对应。

综上所述,目前冬季(即 1 月)平均气温处在自有观测纪录以来的暖期,从小波的波幅分析可知,目前低频小波正处在较强的发展状态,从而估计 1980 年代开始的暖期还将持续一段时间。

近 2 a 以来的实况 1995 年 1 月平均气温为  $-0.7^{\circ}\text{C}$ , 平均最低气温为  $-5.4^{\circ}\text{C}$ , 1996 年分别为  $-2.2^{\circ}\text{C}$  和  $-6.2^{\circ}\text{C}$ , 均高于平均气温的常年值( $-4.5^{\circ}\text{C}$ )和平均最低气温的常年值( $-9.2^{\circ}\text{C}$ ),也就是近两年实况与估计一致。

#### 4.2 夏季气温的气候特征

1870~1980 年代和 1990~1994 年期间 7 月平均气温的 10 a 平均距平和 5 a 距平值列于表 2。

表 2 北京 1870~1994 年 7 月平均气温年代距平 (单位  $^{\circ}\text{C}$ )

年 代	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990~1994
10 a 距平	-0.25	-0.52	-0.60	-0.24	-0.38	0.69	0.42	0.39	-0.38	0.16	-0.49	0.21	0.14

从表 2 可知,7 月的平均气温在上世纪后期至本世纪初期偏低,1920—1940 年代偏高,1950 年代以后高低相间,在 1980 年代和 1990 年代前 5 a ( $0.14^{\circ}\text{C}$ )虽然平均距平仍略高于常年,但负距平的年数较多,1990 年前 5 a 比 1980 年代有降低的趋势。图 2a 为 1870~1994 年期间逐年 7 月平均气温曲线,其线性增长率为  $0.2^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 。图 2b 为上述气温的小波变换图。与冬季小波类似,高频波的变化规律不显著,10 a 以上的低频波也呈现为

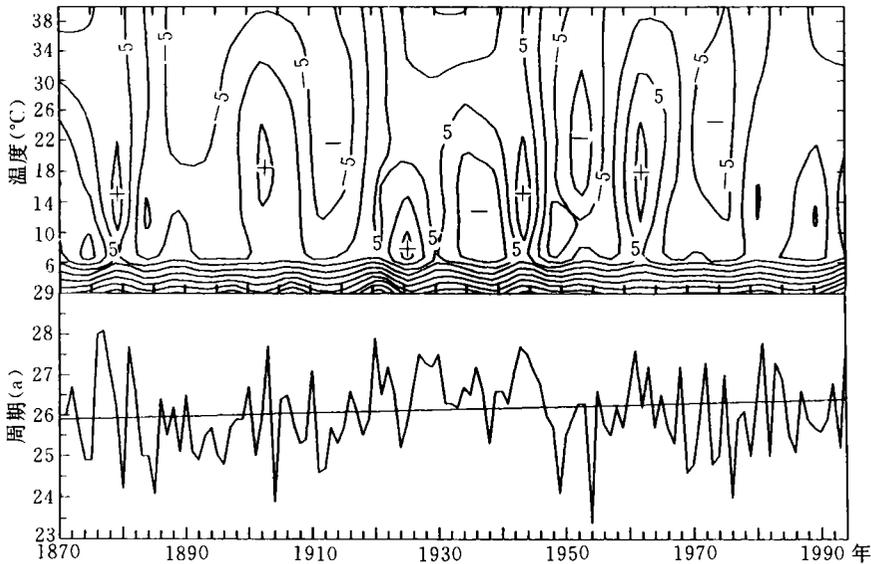


图 2 北京 7 月平均气温及小波波幅时间变化图

正负相间的振荡型,与图 2a 对照可知,与最冷段 1890 年代和次冷段 1880 年代及最暖段 1920 年代相对应的低频波周期均在 20 年以上,且发展强盛,在冷段 1970 年代、1900 年代和次暖段 1930 年代和 1940 年代则有 14~20 a 周期的低频波中心与之对应,1990 年代初一个 6~14 a 周期的小波正在发展,即预示着未来夏季(7 月)的平均气温仍维持正常或略偏高趋势。

### 4.3 年平均气温特征

1870~1980 年代距平和 1990~1994 年 5 a 平均距平值列在表 3 中。

表 3 1870~1994 年北京年平均气温年代距平 (单位 C)

年代	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990~1994
距平	-0.05	-0.40	-0.36	-0.16	-0.42	0.64	0.03	0.14	-0.34	-0.01	-0.03	0.46	1.0

从表 3 中可见年平均气温在 1920 年代以前偏冷,以后冷、暖相间,主要趋势为偏暖<sup>[6]</sup>,一共有 4 个冷期,两个暖期分别为 1920 和 1980 年,而 1990~1994 年,5 a 平均距平达 1.0 C,比最暖的 1920 年代还暖。

1860~1994 年逐年年平均气温的线性趋势为 0.6 C/100 a,其小波变换(图略)与上述冬、夏的小波变换具有类似的特征,不再赘述。

上述分析表明,小波波幅的增强,等值线加密与气温的偏暖(冷)期对应,正的波幅对应偏暖期,反之则与偏冷期对应,另外波幅中心所在周期长度也与气温的暖(冷)期相对应,气温距平绝对值越大,小波中心之间的周期越长,即小波波幅较好地反映不同阶段气温变化的特征,从而有助于了解气候变化的阶段性及对未来变化进行估计。

## 5 降水的气候特征

### 5.1 夏季降水的气候特征

1841~1980 年代距平百分率  $P = (R - \bar{R})/\bar{R}\%$  和 1990~1994 年 5 a 距平百分率平均值列在表 4 中(1840 年代为 9 a),  $R$  为实测值,  $\bar{R}$  为 1841~1994 年平均值。

年代	1840	1850	1860	1870	1880	1890	1900	1910
距平	6.2	-15.3	-32.2	11.3	12.0	41.9	-12.8	-0.9
年代	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990~1994
距平	3.5	-8.8	-17.0	27.8	-4.2	-1.7	-15.0	0.0

从表 4 可见,夏季降水的首要特点是年代负距平多于正距平,亦即少雨年代多于多雨年代。少雨干旱是主要的特征,其特点之二是只有 3 个年代际距平百分率绝对值大于 20%,

即有两个多雨段(1890 年代和 1950 年代),一个干旱段(1860 年代),意味着大部分年代降水在正常值左右。其特点之三是从 1960 年代起北京持续少雨,1990 年代前期降水已转为正常年代,1994 年夏季雨量达 697.0 mm,是自 1959 年以来降水量最多的年份。图 3a 为北京 1841~1994 逐年夏季(6~8 月)降水量图,图中线性增长率为 -0.103(mm/a),即以 10.3% 的趋势下降。其对应的小波图上(图 3b),形成正负相间的振荡中心,上述的多雨或少雨段都有周期为 30 a 以上的波幅强,疏密度大的低频波正负中心与之对应,如 1890 年代的低频波波幅强度最大,其波幅中心在 50 a 周期以上,且波幅比 1950 年

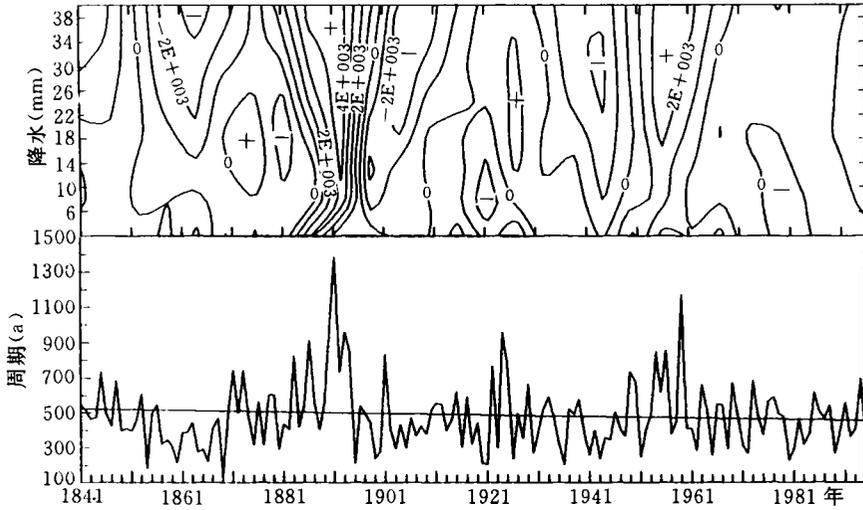


图 3 北京夏季降水及小波波幅变化图

代的强,而 1950 年代又比 1920 年代及其它几个正常略多雨期的波幅强且周期长。干旱少雨段则 1860 年代的小波振幅比其它几个干旱期的波幅强,中心之间的周期也长。另一显著的特征就是 1990 年代前期低频波波幅正在发展增强,从而估计 1990 年代前期这种降水增加的趋势还将继续,北京将迎来一个多雨期。1996 年降水为 612.5 mm,与估计相符。

### 5.2 春、秋季降水的气候特征

1841~1980 年代际春季降水距平百分率和 1990~1994 年 5 a 平均距平百分率列于表 5 中(1840 年代为 9 a 平均)。

表 5 1841~1994 年北京春季降水年代距平百分率 (%)

年代	1840	1850	1860	1870	1880	1890	1900	1910
距平	4.4	-5.0	7.8	-12.0	-7.2	-3.9	-19.3	4.1
年代	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990~1994
距平	-34.3	11.0	-0.4	42.3	6.7	-18.9	25.7	55.3

表 5 中 8 个年代为负距平,意味着北京春季降水与夏季降水一样具有干旱少雨的特征,其次年代际的距平百分率绝对值大于 20% 的也只有 3 a,即 2 个多雨段(1950 年代和 1980 年代),1 个干旱段(1920 年代),其余距平百分率绝对值小于 20%,即降水正常略多(或少)的年代占半数以上。第三特征则是降水呈上升趋势,图 4 中线性增长率为 0.076(mm/a),尤其 1930 年代以后降水呈明显的上升趋势,如表中有 8 个年代是负距平,其中 6 个在 1930 年代之前,估计这就是以前人们常说的“北京春季,十年九旱”的由来。1930 年代之后,除两个年代距平为负值外,其它均为正值,1930~1994 年平均值为 63.9 mm,1840~1929 年平均值为 55.0 mm,即 1930 年以后比以前春季降水增加 16.2%。上述分析表明,虽然少雨干旱仍是春季降水的主要特征,但自 1930 年以来春季降水维持增多的趋势直至 1990 年代前期,亦即近几十年来春季少雨干旱的状况有所缓和。

图 4b 为其小波波幅图,与上述特点对应,在降水的多雨段(1950,1980 和 1930 年代)

及少雨段(1920,1970,1900 和 1870 年代)有中心之间的周期大于 14 a 的正负中心与之对应,另外图 4b 的一个显著特点是 1930 年代以后小波波幅中心之间的周期增长,波幅增强,密度加大,1980 年代后期至 1990 年代前期周期大于 20 a 的低频波仍在发展。

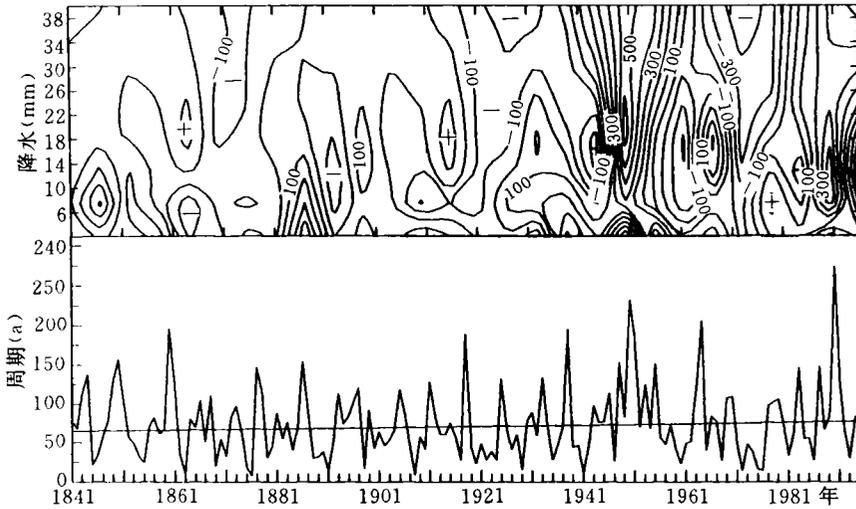


图 4 北京春季降水及小波波幅变化图

### 5.3 秋季降水的气候特征

1841~1980 年代秋季降水的线性趋势为  $-0.042 \text{ mm/a}$ ,各年代距平百分率和 1990~1994 年 5 a 平均距平百分率列于表 6 中(其中 1840 年代为 9 a 平均)。

表 6 与前两表的显著不同是秋季降水正负距平年代差不多,即相对春、夏两季而言秋季多雨和少雨的机率差不多。其二是距平百分率绝

表 6 1841~1994 年北京秋季降水年代距平百分率 (%)

年代	1840	1850	1860	1870	1880	1890	1900	1910
距平	-4.8	5.5	-7.5	23.2	12.8	-27.7	25.9	5.9
年代	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990~1994
距平	-48.1	-3.2	12.3	38.1	-4.9	0.1	-21.13	-15.4

对值大于 20% 的有 5 个年代,即 3 个多雨段(1870 年代,1900 年代,1950 年代),2 个干旱段(1920 年代,1980 年代),7 个距平百分率绝对值小于 10%,意味着秋季降水略多或少的正常年代占半数。第三个特点是从 1960 年代开始至 1990 年代前期持续负距平。

1840~1994 年秋季降水与小波波幅图略,图中小波波幅密集区中心之间的周期长度分别与表 6 中的最大正负距平中心对应,1960 年代开始其周期长度减小,强度减弱,密度变小,1990 年代前期达最弱。

文中还对年降水进行了小波变换(图略),结果与夏季降水的变换基本一致,估计与北京地区夏季降水占年降水的 70% 以上有关。

## 6 结束语

小波分析能在波幅的时间一周期图上进行宏观分析,且低频小波波幅的发展、加强与

气温的偏高、偏低段及降水的偏多、偏少段相对应,距平绝对值越大(气温增暖期或低温期;多雨期或少雨期),小波中心之间的周期越长,波幅越强,密度越大,即小波分析可以作为气候分析和预测的一个工具,并可预计其在气象上的发展是无限的。

### 参考文献

- 1 王绍武. 近百年我国及全球气温变化趋势. 气象. 1990. 16 (2): 11~15
- 2 陈隆勋等. 近四十年我国气候变化的初步分析. 应用气象学报. 1991. 2 (2): 164~173
- 3 谢庄, 曹鸿兴. 北京最高和最低气温的非对称变化. 气象学报. 1996. 54 (4): 501~507
- 4 中国科学院地学部. 前言. 见: 华北地区水资源合理开发利用. 北京: 水利电力出版社. 1990
- 5 黄荣辉, 张庆云. 华北降水的年代与年际变化. 见: 华北地区水资源合理开发利用. 北京: 水利电力出版社. 1990. 95~101
- 6 谢庄, 王桂田. 北京地区气温和降水百年变化规律探讨. 大气科学. 1994. 18 (6): 683~690

## WAVELET CHARACTERISTICS OF CLIMATE CHANGE IN BEIJING SINCE THE 19TH CENTURY

Xie Zhuang

(Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100081)

Zhang Leigang Chen Daodong

(Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089)

### Abstract

The annual and seasonal temperatures during 1870-1994 and the annual and seasonal precipitations during 1841-1994 are studied and calculated with the wavelet transformation in this paper. The calculation results are analyzed synoptically. The results shows that the warming term and cooling term of temperatures correspond with the period extending between wavelet amplitude centers and the strengthening of wavelet amplitude. The greater the absolute value of precipitation anomaly is, the longer the corresponding wavelet period is, as well as the stronger wavelet amplitude. Namely in climate change study, wavelet analysis can demonstrates the characteristics of the amplitude variation patterns among years and wavelet-lengths. So it exhibits a layout to understand the temperature and precipitation changes with interdecadal.

Key words: climate change. wavelet analysis global warming drought and wetness trend.