

文章编号:1004-9045(2008)02-0109-05

长江三角洲地区近 50 a 的气温变化特征分析

王体健, 万 静

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘 要:利用线性拟合、小波分析、Mann-Kendall 方法对长江三角洲地区的五个城市(上海、无锡、杭州、湖州、嘉兴)近 50 年的逐日气温资料进行了倾向、周期、突变等特性分析。研究结果表明:近 50 年来,长江三角洲地区气温呈上升趋势,上海升温速度最快,为 $0.73\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其它四个城市的气温增加率为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。气候的长期变化还具有一定的突变性,五个城市的气温均在 20 世纪 90 年代出现显著升高,90 年代各城市的平均气温普遍比前 40 年高出约 $0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 95% 的置信度下,五个城市的气温均呈现 3~4 年的准周期变化。

关键词:长江三角洲;气温变化;小波分析;Mann-Kendall

中图分类号:P467 文献标识码:A

1 引言

近年来,全球增暖及其可能产生的影响越来越受到关注。大多数科学家认为^[1-2],这是人类活动影响及自然的气候波动共同引起的。在当前全球变暖的大背景下,中国气候也在发生变化,且具有明显的季节变化特征和不同的地域特征。余辉^[3]、张一平^[4]对我国城市化对气温的影响作了分析,发现在区域性气候增暖过程中,城市化的影响是不可忽略的。赵宗慈^[5]指出大城市增暖明显,冬季增暖,而夏季变冷。任福民^[6]等指出,最低气温上升明显,特别是冬季的最低气温上升幅度最大。江志红^[7]等研究结果表明,CO₂ 浓度增加所导致的温室效应的加剧,与中国近百年增暖趋势的关系最为密切,其次是太阳活动,进入 20 世纪 80 年代后,温室效应加剧所起的主导作用更加明显,相应敏感区位于华北北部、东北、西北、西部及长江中下游地区。长江三角洲地区作为中国极其重要的经济中心,改革开放以来迅速发展,城市化进程快,人口密度大,同时也产生了一系列环境问题,如农田植被等被破坏,下垫面条件急剧改变,生活生产中排放的温室气体及气溶胶含量不断增多等等,必然对该地区气候产生重大影响,甚至影响经济持续发展和人们生活。该地区的气候变化特征如何?变化趋势怎样?导致这种变化的直接原因是什么?这些都是人们非常关心并值得深入研究的问题。Chen 等^[8]研究表明,在周边地区气温变冷的情况下,长江三角洲地区的气温在迅速变

暖,呈现为一个由上海、南京、杭州、无锡等中心城市的小热岛联合而成的“区域性热岛”,而且热岛强度的长期变化与该地区的经济发展有明显的正相关。

本文试图通过统计分析的手段,对五个城市气温的长时间序列进行分析,进一步揭示长江三角洲地区气温变化的倾向、周期、突变等特征。

2 资料和方法

2.1 资料

本文选取了长江三角洲地区的五个城市近 50 年的逐日气温资料进行分析,其中上海市的资料序列为 1971~2003 年,无锡市的资料序列为 1959~2002 年,杭州市为 1951~2005 年,湖州市为 1957~2005 年,嘉兴市为 1955~2005 年。

2.2 方法

2.2.1 倾向分析方法

利用线性拟合方法进行倾向分析。把气候要素写成时间 t 的线性函数 $y=at+b$,其中 a 、 b 为经验常数。通过实际资料,利用最小二乘法计算出 a 和 b ,其中 a 表示线性函数的斜率,也就是气候要素的线性趋势。 a 为正(负)表示增加(减小)趋势,零表示无变化趋势。对于变化趋势的显著性,采用时间 t 与原序列变量 y 之间的相关系数进行检验,即对给定显著性水平 α ,若 $|r| > r_{\alpha}$,则变化趋势显著。

2.2.2 突变分析方法

利用 Mann-Kendall 法进行突变点检验。对于具有

收稿日期:2007-12-27;定稿日期:2008-03-20

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2006515)及教育部 2006 年“新世纪优秀人才计划”共同资助

作者简介:王体健,男,1968 年生,教授,主要从事大气物理与大气环境、大气化学与气候变化研究。Email: tjwang@nju.edu.cn

n 个样本量的时间序列 x, 构造一秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad (k=2,3,\dots,n) \quad (1)$$

其中

$$r_i = \begin{cases} +1 & \text{当 } x_i > x_j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i)$$

可见, 秩序列 s_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。在时间序列随即独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

其中 $UF_1=0$, $E(s_k)$, $\text{Var}(s_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差, 在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立, 且有相同连续分布时, 它们可由下式算出:

$$\begin{aligned} E(s_k) &= \frac{n(n+1)}{4} \\ \text{Var}(s_k) &= \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{aligned} \quad (3)$$

UF 系列为标准正态分布, 它是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列, 给定显著性水平 α , 查正态分布表, 若 $|UF_k| > U_{\alpha}$, 则表明序列存在明显的趋势变化。按时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 再重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k$, $k=n, n-1, \dots, 1$, $UB=0$ 。

分析绘出的 UF_k 和 UB_k 曲线图, 若 UF_k 或 UB_k 的值大于 0, 则表明序列呈上升趋势, 小于 0 则表明呈下降趋势。当它们超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著。超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

2.2.3 周期分析方法

利用小波分析进行周期分析。该方法是一种窗口大小(即窗口面积)固定, 但其形状、时间窗和频率窗都可改变的时频局部化分析方法。即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率, 所以被誉为数学显微镜。原则上讲, 传统上使用 Fourier 分析的地方, 都可以用小波分析取代, 小波分析优于 Fourier 变换的地方是它在时域和频域同时具有良好的局部化性质, 克服了窗口 Fourier 变换对有奇异性的信号不很有效的弱点。

设 $\psi(t)$ 为满足下列条件的任意函数:

$$\int_{\mathbb{R}} \psi(t) dt = 0 \quad (4)$$

$$\int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (5)$$

其中 $\hat{\psi}(\omega)$ 是 $\psi(t)$ 的频谱, 称信号 $f(t)$ 的小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (6)$$

其中 b 为平移因子, 反映了时间上相对于 t 的平移。a 为伸缩因子, 反映了小波的周期长度, $1/a$ 相当于频率。 $\psi(t)$ 称为母小波函数, 通过 $f(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 在位置 b 为最大的性质, 可以研究 $f(t)$ 在各时刻或各位置的奇异性, 通过伸缩因子 a 的调节, 可以探讨 $f(t)$ 在不同时间或空间尺度上的演变情况。

目前广泛使用的连续小波函数有墨西哥帽 (Mexican Hat)、dbN 小波系和 Morlet 等小波函数:

$$(1) \text{ 墨西哥帽小波函数: } \psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} (1-x^2) e^{-x^2/2}.$$

它是 Gauss 函数的二阶导数, 不具有正交性。

(2) Daubechies 小波函数是由著名的小波分析学者 Inrid Daubechies 构造的小波函数, 除了 D1 (即 Harr 小波) 外, 其它小波没有明确的表达式, 但转换函数的平方模是很明确的。N 为序号, $N=1, 2, 3 \dots 10$ 。

(3) Morlet 小波可以是复值小波, 也可以是实值小波。复值小波函数表达式为: $\psi(x) = x^{i\Omega} e^{-x^2/2}$, 实值小波表达式为: $\psi(x) = e^{-x^2/2} \cos \Omega x$, 其中 Ω 为常数。

在实际应用中, 连续小波必须加以离散化。这一离散化都是针对连续的时间尺度参数 a 和连续平移参数 b 的, 而不是针对时间变量 t 的。通常, 把连续小波变换中尺度参数 a 和平移参数 b 分别取作 $a = a_0^j$, $b = k a_0^j b_0$, 这里 $j \in \mathbb{Z}$, a_0, b_0 为常数, $a_0 > 1$ 。所以离散的小波函数 $\psi_{j,k}(t)$ 为:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - k b_0) \quad (7)$$

而离散化的小波变换系数则可表示为:

$$C_{j,k} = \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (8)$$

公式中 “*” 表示复共轭。

在改变 a 和 b, 以使小波变换具有“变焦距”功能的过程中, 最常用的是二进制的动态采样网格, 即 $a_0=2$, $b_0=1$, 每个网格对应的尺度为 2, 而平移为 $2k$ 。由此得到的小波也称为二进小波 (Dyadic Wavelet)。二进小波对信号分析具有变焦距的作用。如果想进一步观看信号更小的细节, 就需要增加放大倍数即减小 j 值; 反之, 若想了解信号更粗的内容, 则可以减小放大倍数即加大 j 值。这个意义上, 小波变换被称为数学显微镜。对于湍流信号, 小波函数具有明确的物理意义: 如果 b 是空间参数, 则 ψ_{ab} 表示物理空间 b 处的一个空间尺度为 a 的湍流结构; 如果 b 为时间参数, 则 ψ_{ab} 表

示时刻 b 发生了一个时间尺度为 a 的事件。

3 结果与分析

3.1 年平均气温变化趋势

图 1 给出了长江三角洲五个城市年均气温变化, 由图可知, 杭州、湖州、嘉兴、上海、无锡近 50 年来的年均温变化趋势基本一致。20 世纪的 50 年代到 70 年代是相对冷期, 1980 年左右开始升温, 90 年代以后变暖十分明显, 90 年代后的平均气温依次比前 40 年的平均气温约高出 0.9、0.8、1.0、1.3、0.8 (平均 0.96)。在 1990、1994、1998 年出现 3 次暖峰, 一次比一次更暖, 其中 1998 年为 50 年来的最暖年。杭州、湖州、嘉兴、上海、无锡的年均气温分别达到 17.9、17.4、17.3、18.0、17.1。湖州、嘉兴、无锡的最低年均气温出现在 1980 年, 分别为 15.1、15.1、14.7, 杭州和上海的最低年均气温出现在 1957 年和 1972 年, 分别为 15.7、15.1。

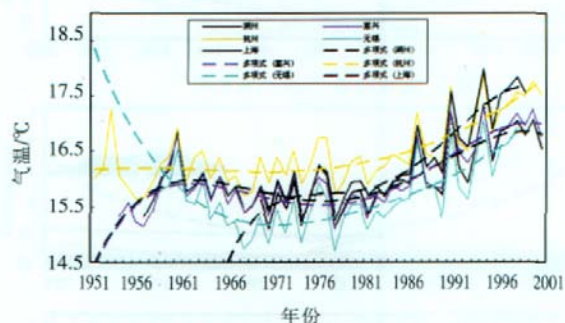


图 1 长江三角洲五个城市年均气温变化图

表 1 给出了统计结果, 由表中可知, 50 年来, 长江三角洲地区整体的趋势是增暖的, 其中上海升温速度最快, 为 0.73 /10a。其它四个城市的气温增加率平均为 0.23 /10a。五个城市的相关系数均通过了置信度 99% 的显著性检验。

表 1 长江三角洲五城市年均气温线性倾向估计结果

城市	回归系数	相关系数
杭州	0.0234	0.6404
湖州	0.0216	0.5524
嘉兴	0.0257	0.6444
上海	0.0727	0.8616
无锡	0.0229	0.4780

3.2 年均气温突变检验

对长江三角洲地区五个城市近 50 年的年均气温做趋势分析及突变检测, 结果如图 2 所示。可见, 在 0.01 的显著性水平下, 杭州地区从 60 年代开始气温持续上升, 到 1992 年发生突变, 增温趋势十分显著。

湖州地区 50 年代末到 60 年代末持续升温, 从 70 年代初到 80 年代有降温趋势, 1993 年左右发生突变, 1999 年开始气温显著上升。嘉兴地区从 50 年代末开始持续升温, 1993 年左右发生突变, 1995 年开始气温显著上升。上海地区从 70 年代中期开始气温持续上升, 在 1989 年左右发生突变, 气温显著上升。与上述

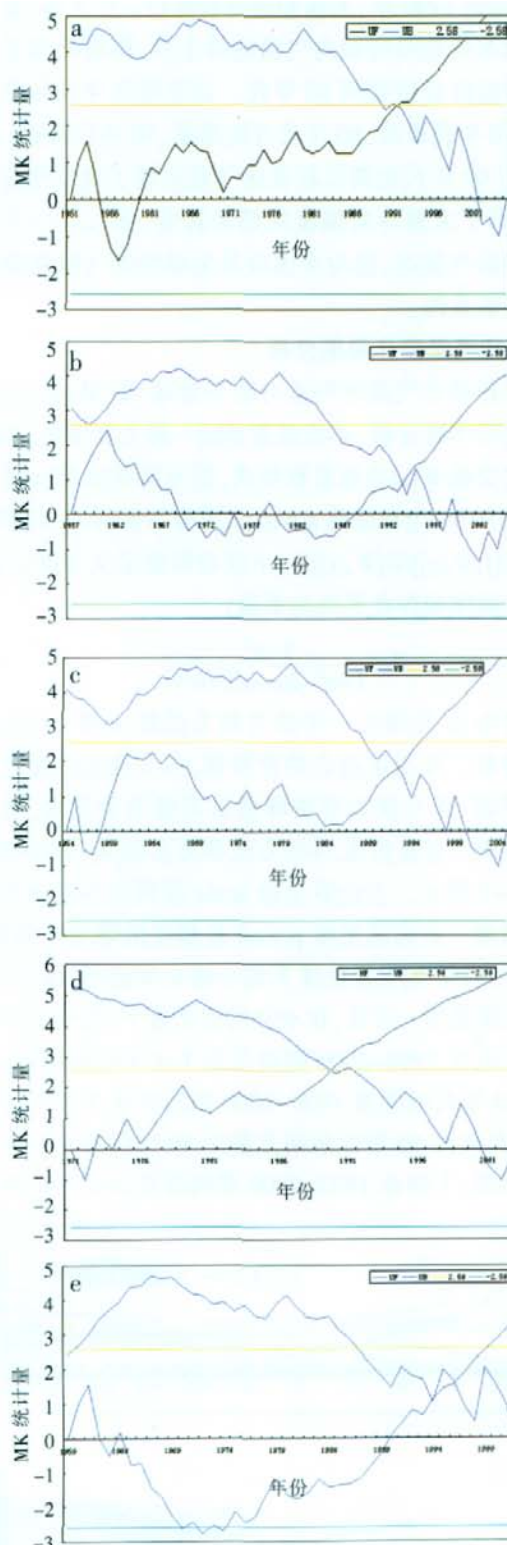


图 2 杭州(a)、湖州(b)、嘉兴(c)、上海(d)、无锡(e)年均气温 M-K 统计量

四个站点不同的是,无锡从 60 年代中期起,气温一直处于下降趋势,1971~1974 年下降趋势显著,到 90 年开始呈上升趋势,1995 年左右发生突变,1999 年开始显著上升。综上所述,所选长三角各城市站点年均气温变化过程类似,都在 90 年代发生突变,且进入显著上升阶段,但上海发生突变和进入显著上升期的年份最早,均是 1990 年,无锡和湖州较滞后。且上海、嘉兴和杭州在所选时间段内气温持续上升,但湖州和无锡有个降温阶段持续到 80 年代。这说明从年代际变化上看,70 年代最冷,80 年代开始增温,90 年代最暖。在 20 世纪 90 年代初期以后该区气温出现了突发性的上升,经历了由偏冷向偏暖的趋势转变,进入了一个相对偏暖的气候态,这与全国以及全球性的气候变暖是有直接联系的。

3.3 年均气温变化周期分析

对各站点气温序列进行距平处理,取 Morlet 小波基数进行小波分析。小波函数 $\psi(n)$ 一般为复函数,相应的小波变化 $W(n)$ 也是复数形式,而小波变化 $W(n)$ 可分为实部 $R\{W_n(s)\}$ 和虚部 $I\{W_n(s)\}$,或分为振幅 $|W_n(s)|$ 和位相 $\tan^{-1}[I\{W_n(s)\}/R\{W_n(s)\}]$ 。小波功率谱定义为 $|W_n(s)|^2$ 。假定时间序列存在平均功率谱:

$$P_k = \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos(2\pi k/N)} \quad (9)$$

其中, α 是滞后一年的自相关系数, $k=0 \dots N/2$, 是频率指数。先选定适合的背景谱,本文选定红噪声谱做背景谱,若小波功率谱峰值显著超出背景谱,则可认为达到一定置信度,详细方法参见文献[9]。分析结果如图 3~7 所示,左边纵坐标 $scale$ 是利用小波分析得出的周期,右边纵坐标 $period$ 是相应的傅立叶周期。其中图(a)是 95%置信度下的小波功率谱图,图(b)是小波实部谱图。可见,在 95%的置信度下,杭州的年均气温变化在 1990~2000 期间存在 3~4 年的准周期;湖州在 70 年代后期及 1990~2000 期间存在 3~4 年的准周期;嘉兴在 60 年代前期及整个 90 年代存在 3~4 年的准周期;上海在 1992~2000 期间存在 3~4 年的准周

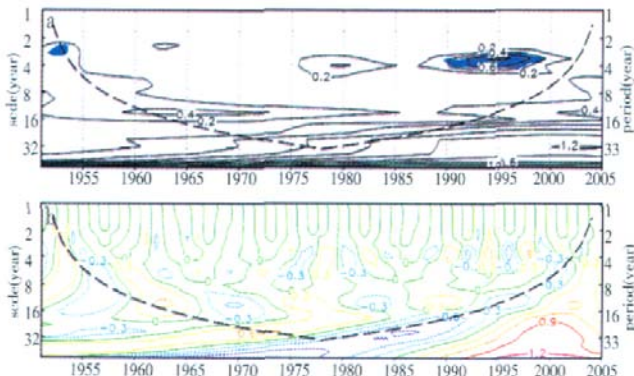


图 3 杭州年均气温小波分析

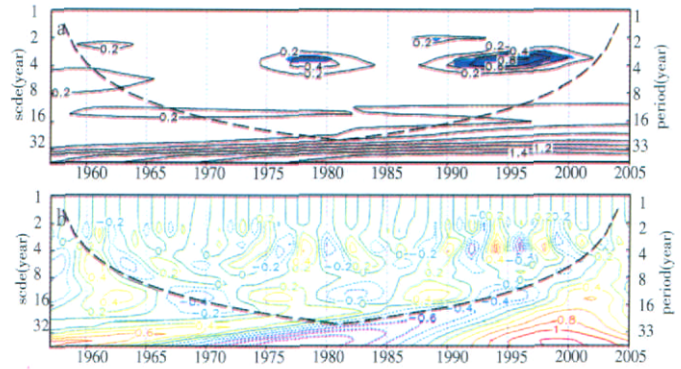


图 4 湖州年均气温小波分析

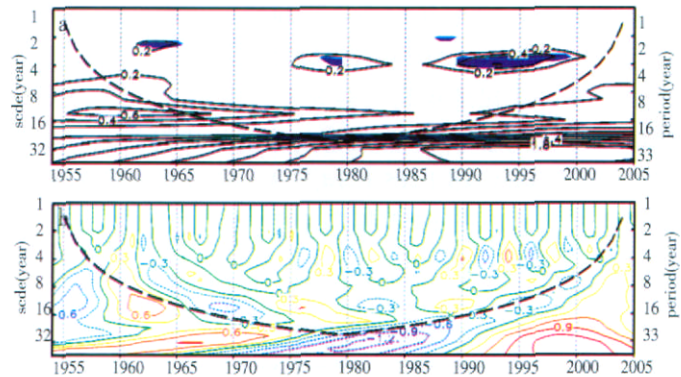


图 5 嘉兴年均气温小波分析

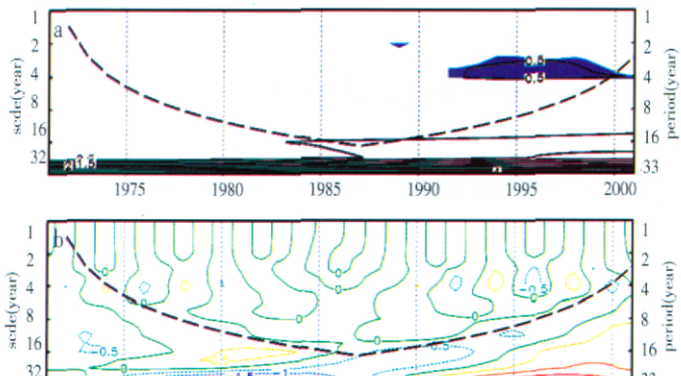


图 6 上海年均气温小波分析

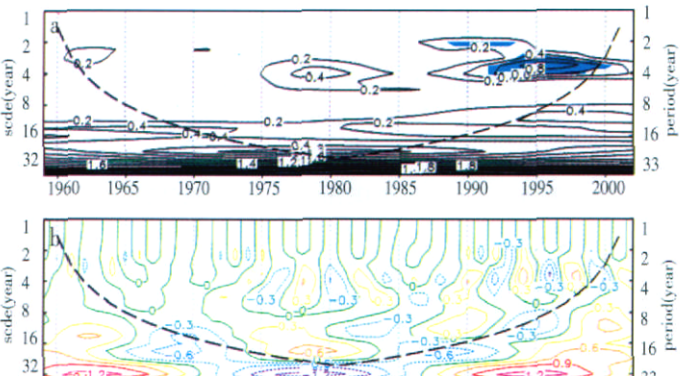


图 7 无锡年均气温小波分析

期;无锡在 90 年代前中期存在 2 年的准周期,1990~2000 期间存在 3~4 年的准周期。总的来说,长江三角洲地区年均气温在 90 年代存在 3~4 年的显著周期。

4 结论

本文利用线性拟合、小波分析、Mann-Kendall 方法对长江三角洲地区的上海、无锡、杭州、湖州、嘉兴等五个城市近 50 年的逐日气温资料进行了倾向、周期、突变等特性分析。主要研究结果如下。

(1) 近 50 年来, 长江三角洲地区气温有上升趋势, 尤其在 20 世纪 90 年代显著升高, 90 年代各城市的平均气温普遍比前 40 年高出约 0.96 。上海升温速度最快, 为 0.73 /10a, 其它四个城市的气温增加率平均为 0.23 /10a。据林学椿、丁一汇研究^[10-11], 1951~1990 年全国年平均气温总的趋势是增暖 (气温上升率 0.104 /10a), 可见近 50 年来长江三角洲地区的气温上升率高于全国平均水平。

(2) 从年代际变化上来看, 气候的长期变化还呈现一定的突变特征, 70 年代最冷, 80 年代开始增温, 90 年代最暖。在 20 世纪 90 年代初期以后该区气温出现了急剧的上升, 经历了由偏冷向偏暖的趋势转变, 进入了一个相对偏暖的时期。

(3) 在 95% 的置信度下, 五个城市的气温均呈现 3~4 年的准周期变化。

感谢上海气象台戴建华、浙江省气象台潘劲松、江阴气象台阮蔚林提供本文所需的气温资料。

参考文献:

- [1] 田中正之(日). 地球在变暖[M]. 石广玉, 李昌明译. 北京: 气象出版社, 1992: 66-87.
- [2] 叶笃正. 中国的全球变化预研究[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 40-53.
- [3] 余晖, 罗贤哲. 气温长期演变趋势中城市化的可能影响[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(3): 450-454.
- [4] 张一平, 何云玲, 马友鑫. 中国不同地区城市化对室内外气温影响的比较研究[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 42-48.
- [5] 赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响 [J]. 气象, 1991, 17(4): 14-17.
- [6] 任福民, 翟盘茂. 1951~1990 年中国极端气温变化分析[J]. 大气科学, 1998, 22(2): 217-227.
- [7] 江志红, 丁裕国, 金莲姬. 中国近百年气温场变化成因的统计诊断分析[J]. 应用气象学报, 1997, 8(2): 175-185.
- [8] Chen Longxun, Zhu Wenjin, Zhou Xiuji. Characteristics of environmental and climate change in Changjiang Delta and its possible mechanism[J]. Acta Meteor Sinica, 2000, 14(2): 129-140.
- [9] Christopher Torrence, Gilbert P Compo. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society[J]. American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [10] 林学椿, 于淑秋. 近 40 年我国气候趋势 [J]. 气象, 1990, 16(10): 16-21.
- [11] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象, 1994, 20(12): 19-26.

Air Temperature Variation in Recent 50 Years over Yangtze River Delta Region

WANG Ti-jian, WAN Jing

(Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract: In order to investigate the characteristics of air temperature variation over the Yangtze River Delta region, the daily air temperature data from the five cities (Shanghai, Wuxi, Hangzhou, Huzhou and Jiaxing) through the past 50 years are analyzed by using the methods of linear regression, wavelet analysis and Mann-Kendall. The results show that a rising trend of air temperature exists in the study region in recent 50 years, with 0.73 /10a in Shanghai and 0.23 /10a in other four cities. Abrupt change is found in the long term variation of the climate. Air temperature increase significantly in the beginning of the 1990s, and the average air temperature in all five cities of 0.96 higher than that in the previous 40 years. All five cities exhibit quasi-periodic variations of 3-4 years, with a 95% degree of confidence.

Key words: Yangtze River Delta; Air Temperature; Wavelet Analysis; Mann-Kendall