

长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响

谢志清¹, 杜 银², 曾 燕^{1,3}, 施雅风³, 武金岗¹

(1. 江苏省气象科学研究所, 南京 210008;

2. 南京大学大气科学系, 南京 210093;

3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据、土地利用统计数据和气象站常规观测资料, 结合 NOAA/AVHRR、MODIS 反演的月地表温度数据, 定量考察了长江三角洲城市群热岛增温效应对区域温度气候趋势的贡献, 结果表明: ① 1992-2003 年长江三角洲城市化经历了一个快速的空间扩展过程, 宁镇扬、苏锡常、上海大城市区、杭州湾 4 个城市群构成了一个“之”字形城市带, 城市群之间出现城市化连片趋势, 城市带区域内 1961-2005 年年平均气温增温速率为 0.28~0.44 °C/10a, 显著高于非城市带区域。② 城市热岛效应对区域平均温度的影响以夏秋季最强, 春季次之, 冬季最弱。③ 长江三角洲城市带热岛强度和城市总人口对数呈线性正相关关系。④ 城市带增温效应使得区域的年平均气温在 1961-2005 年间增加了 0.072 °C, 其中 1991-2005 年间增温幅度为 0.047 °C; 年最高气温升高了 0.162 °C, 其中 1991-2005 年间增温幅度为 0.083 °C, 表明 1991-2005 年间长江三角洲城市带的空间扩展正在改变区域温度变化趋势, 且这种增温趋势显著。

关键词: 长江三角洲; 城市热岛; 城市带; 城市化进程

1 引言

人类活动引起的气候变暖主要包括排放温室气体和改变土地利用类型两个方面^[1,2], 其中城市化建设用地导致的城市热岛效应业已引起人们广泛关注。到目前为止, 大部分城市热岛效应的研究以个例分析为主^[3,4], 并认为城市热岛效应局限在大城市及近郊的小范围局部区域, 不会对大尺度平均温度变化造成显著影响^[5-7], 因此着重强调单个城市热岛度的变化趋势研究^[8-10]。但也有一些学者研究指出, 近几十年来全球快速的城市化进程导致的城市热岛效应不仅对城市本身气候变化趋势影响突出, 而且对区域长期气候趋势也产生了不可忽视的影响^[11-16]; 数值模式敏感性试验结果也证实大规模城市化会引起比较显著的局地气候变化^[17]。1978 年改革开放以来, 中国的城市化进程正在朝大都市区和大城市集群方向发展, 形成了长江三角洲、珠江三角洲、环渤海地区三大城市带, 区域性热岛日益显现。其中, 长江三角洲城市带作为世界六大城市带之一, 是中国城镇最为密集、城市化水平最高的地区, 自 20 世纪 80 年代以来经历了一个城市化进程快速发展时期, 形成了以宁镇扬、苏锡常、沪杭甬为中心的城市带, 发达的工业、频繁的人类活动导致该区域城市热岛现象日趋严重, 形成了一个强大的区域性热岛, 必然对区域气候的自然变化造成不可忽视的影响^[18]。那么, 长江三角洲大规模城市发展的累积增温效应是否会对区域较大尺度的气候趋势产生显著影响? 其影响程度如何? 这方面的研究工作尚不

收稿日期: 2007-02-08; 修订日期: 2007-05-09

基金项目: 国家科技基础性工作专项资金项目 (2005DKA31700-06-20); 江苏省自然科学基金项目 (BK2005163); 中国气象局气候变化专项 (CCSF2006-32) [Foundation: Concentrated fund item of national science and technology foundation work, No.2005DKA31700-06-20; Jiangsu Natural Science Foundation, No.BK2005163; Special Fund from China Meteorological Administration, No.CCSF2006-32]

作者简介: 谢志清 (1977-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事气候变化和气象防灾减灾研究。E-mail: xiezhiqing9896@163.com

多见。本文将以长江三角洲城市带为研究对象,根据观测事实研究城市带空间扩展对区域温度变化的影响,这对城市规划和区域气候变化的预测评估都具有重要的科学参考价值,并为城市群快速发展是否对区域气候趋势造成显著影响这一科学问题提供新的事实依据。

2 资料和研究区

长江三角洲是中国最大经济区之一,也是中国改革开放以来经济发展最为迅速的地区,不同的研究其具体范围也不尽一致。本文所讨论的是长江三角洲经济区,包括上海市、江苏省的苏州、无锡、常州、南京、镇江、扬州、泰州、南通8市和浙江省的杭州、宁波、嘉兴、湖州、绍兴5市。

本研究所用的数据资料主要有遥感资料、城镇建设用地、城市人口统计资料和常规气象观测资料。各种资料的详细说明如下:

遥感资料:1992-2003年1km分辨率的DMSP/OLS非辐射定标夜间灯光数据,用于定量提取区域内城市的空间扩展过程;NOAA/AVHRR反演的1998年1-12月1km分辨率月地表温度数据和MODIS反演的2000年3月-2006年6月5km分辨率的月地表温度数据,用于分析城市热岛强度的季节变化及其对区域温度气候平均态的影响。

统计资料:城镇建设用地面积等土地利用统计数据用于辅助DMSP/OLS夜间灯光数据提取城市带发展的时空特征;区域内14个地级以上城市市区1961-2005年逐年总人口,用来分析城市带人口变化与城市带热岛强度、增温效应变化之间的相关关系。

气象资料:长江三角洲地区99个地面气象观测站(图1a)1961-2005年平均气温、平均最高气温、平均最低气温、极端最高气温、极端最低气温、地表0cm平均温度、地表0cm平均最高温度、地表0cm平均最低温度8个要素项的月值和年值,用来分析长江三角洲地区城市带增温效应对区域温度气候趋势的影响。

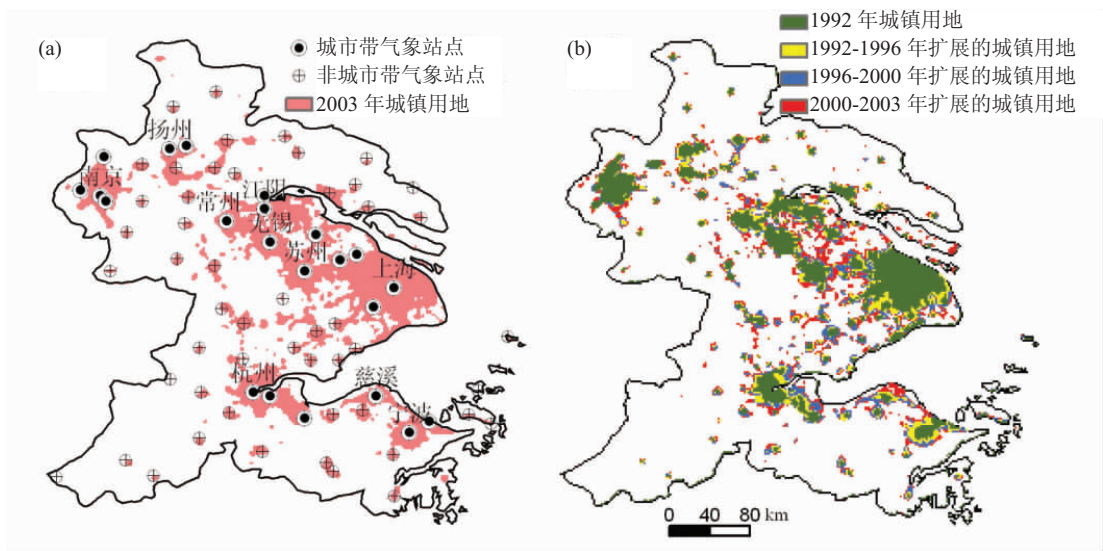


图1 长江三角洲气象站空间分布(a)与1992-2003年城市带空间扩展过程(b)

Fig. 1 Distribution of meteorological stations (a) and urbanization process (b) in the Yangtze River Delta from 1992 to 2003

3 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的城市空间扩展提取

美国军事气象卫星 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 搭载的 Operational Linescan System (OLS) 传感器为大尺度的城市化研究提供了一种新的数据获取手段^[19, 20], 成为快速客观地量测城市化水平的一个有利工具, 国内外许多学者已成功地将 DMSP/OLS 数据应用于城市化研究^[21-25]。

利用 1992-2003 年间的 DMSP/OLS 非辐射定标夜间灯光数据, 采用文献[25]的方法基于江苏、浙江、上海的统计年鉴和土地利用资料提取了 1992-2003 年长江三角洲城市化的空间扩展过程 (图 1b), 并对城市空间分布进行斑块特征分析 (表 1)。结果表明长江三角洲地区共有 4 个典型的城市群: 宁镇扬城市群、苏锡常城市群、上海大城市区、杭州湾城市群, 共同构成了一个沿江沿海的“之”字形城市带; 2003 年城市灯光面积较 1992 年增加了近一倍 (增加了 9839 km²), 城市灯光面积与区域总面积的比值由 1992 年的 11.62% 增加到 2003 年的 21.70%, 表明在 1992-2003 年间长江三角洲地区城市空间覆盖范围处于快速扩张时期。此外, 1992-2003 年间长江三角洲城市连片趋势明显。其中, 1992-1996 年间苏锡常城市群出现城市化连片趋势, 像元数在 501~1000 之间的城市斑块增加了 1 个; 1996-2000 年间以沪杭甬区域城市化最为迅速 (城市灯光面积增加了 1717 km²), 杭州与其邻近的嘉兴、绍兴开始形成连片城市带, 像元数在 101~500 之间的城市斑块增加了 4 个; 在 2000-2003 年之间, 长三角城市带空间发展的重心再一次转到了江苏苏南沿江一带, 形成了一个新的都市圈, 即江阴、靖江和张家港都市圈 (城市灯光面积剧增 2537 km²), 和上海大城市区、苏锡常城市群构成了长江三角洲地区最大的都市连绵带 (图 1b)。如此快速的城镇化进程必将对区域气温变化产生重要影响。

表 1 基于 DMSP/OLS 灯光数据的长江三角洲 1992-2003 年城市灯光斑块分级特征

Tab. 1 Patches of urban areas in the Yangtze River Delta based on DMSP/OLS data from 1992 to 2003

斑块等级 (按像元数计算)	各等级的斑块数			
	1992 年	1996 年	2000 年	2003 年
< 10	91	68	56	45
11-100	83	72	63	63
101-500	8	7	11	15
501-1000	1	2	3	1
> 1000	4	4	3	4
城市灯光面积 (km ²)	11336	15045	17823	21175
城市灯光面积占区域	11.62	15.42	18.26	21.70
总面积百分比 (%)				

4 基于气象站观测数据的气温变化趋势计算

趋势分析的方法很多, 目前常用的有线性倾向估计、滑动平均、累积距平、二次平滑、三次样条函数、Kendall 秩次相关法、Mann-Kendall 秩次相关法等。本研究主要借助于线性倾向估计法^[26]对温度各要素的气候变化趋势进行判别。

为研究温度各要素在气候变化中升降的定量程度, 并可对其进行统计检验, 定义 n 个时刻 (年) 的要素序列与自然数列 1, 2, 3, …, n 的相关系数为气候趋势系数。

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} \quad (1)$$

式中: r_{xt} 为气候趋势系数, n 为年数。 x_i 是第 i 年平均温度, \bar{x} 为温度多年平均值,

$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{t} = (n + 1)/2$ 。温度各要素项的趋势变化用一次线性方程表示, 即

$$\hat{x}_i = a_0 + a_1 t \tag{2}$$

$a_1 \cdot 10$ 称为气候倾向率, 其中 $a_1 = r_{xt} \frac{\sigma_x}{\sigma_t}$, σ_x 是温度 x 的均方差, σ_t 为数列 1, 2, ..., n 的均方差。

从 1961-2005 年长江三角洲地区年平均气温气候倾向率 (图 2a) 和气候趋势系数 (图 2b) 空间分布可以看出, 年平均气温的增温速率高值区与城市群空间分布呈现出“之”字形带状分布相似, 也呈现出“之”字形带状分布特征。区域内共有 6 个显著的增温高值中心, 分别是扬州、南京、江阴、上海、杭州和宁波, 增温速率在 0.28-0.44 °C/10a 之间, 相应的气候趋势系数均通过 0.05 显著性水平检验, 且显著高于非城市带区域的增温速率。该结果与周秀骥等^[18]、Chen 等^[27, 28]利用 1961-1995 年年平均气温分析获得的 0.1-0.25 °C/10a 的增温速率相比, 增加了近一倍, 表明自 20 世纪 90 年代以来, 长江三角洲地区又出现了一个增温明显加剧的时期, 其中尤其以扬州—江阴—上海一线增温最为明显。与长江三角洲地区 1992-2003 年城市灯光空间分布特征 (图 1b) 对比来看, 增温高值区同样全部都为城镇密集区; 以苏南沿江至上海这部分城市化水平高的地区增温速率最快。

5 长江三角洲城市带增温效应评价

为了定量分析长江三角洲地区城市带的增温效应及其变化趋势, 分别构建三个数据序列:

- (1) 城市带与非城市带温度之差: $T_{CN} = T_C - T_N$ (3)
- (2) 城市带与全区域温度之差: $T_{CD} = T_C - T_D$ (4)
- (3) 全区域与非城市带温度之差: $T_{DN} = T_D - T_N$ (5)

式中: T_C 、 T_N 、 T_D 分别为城市带、非城市带和全区域平均温度; T_{CN} 为城市带的热岛

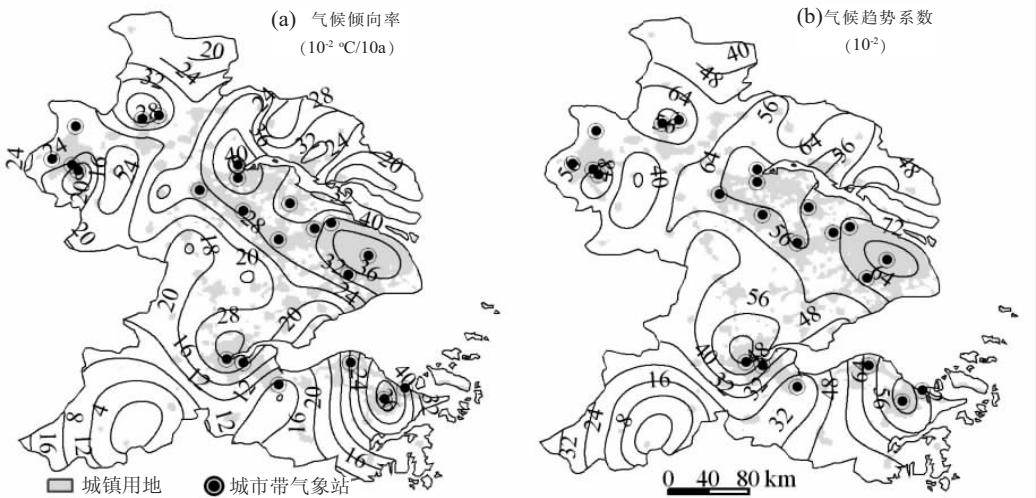


图 2 1961-2005 年长江三角洲年平均气温气候变化趋势

Fig. 2 Changing trend of annual mean temperature in the Yangtze River Delta from 1961 to 2005

强度; T_{CD} 为城市带温度偏离区域平均的程度; T_{DN} 为区域平均温度偏离非城市带的程度, 它反映了城市带热岛效应对区域温度变化的贡献, 本文以 T_{DN} 来表示城市带热岛效应使区域平均温度的增加值。

5.1 基于遥感资料的城市热岛效应季节变化及其对区域气候平均态的影响

以 1998 年为例, 利用 1998 年江苏、上海、浙江的国土资源土地利用类型统计数据 and 1998 年 DMSP/OLS 灯光数据提取的长江三角洲地区城市灯光区, 结合 1998 年 1-12 月 NOAA/AVHRR 数据反演的 1km 分辨率月地表温度, 计算了各月长江三角洲城市热岛强度的统计特征值 (表 2)。以城市区与非城市区平均地表温度之差 T_{CN} 值大于 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为界, 1 月、3 月、12 月基本无显著的城市热岛特征; 热岛强度以夏季的 7、8 月份最强, T_{CN} 值为 $3.6\sim 3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 春秋两季次之, 冬季最弱; 城市带热岛效应使区域平均温度的增加值 (全区域与非城市带区域平均值之差 T_{DN}) 以夏季 7、8 月份最强, 使区域平均温度增高 $0.3\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、春季 4、5 月份次之, 为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冬季最弱, 小于 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

为了分析城市热岛对区域平均温度影响季节变化的多年平均状况, 将 2000 年 3 月-2006 年 6 月 MODIS 数据反演的 5 km 分辨率月地表温度逐月进行多年平均, 以 1 月、4 月、7 月、10 月分别代表冬、春、夏、秋 4 个季节, 结合 2003 年的 DMSP/OLS 灯光数据确定的城市区, 分析长江三角洲城市热岛效应的季节变化 (图 3) 表明: 城市带热岛强度 T_{CN} 和城市带热岛效应使区域平均温度的增加值 T_{DN} 分别为: 冬季, $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$; 春季, $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 夏季, $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 秋季, $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。结合图 3 可以看出, 不论是热岛强度、热岛效应范围还是对区域平均温度的影响都以夏秋两季最强, 春季次之, 冬季最弱, 与 1998 年 NOAA/AVHRR 数据反演的 1 km 分辨率月地表温度数据的个例分析结果基本一致。

5.2 基于常规气象资料的城市热岛效应季节变化

为了利用常规气象资料分析长江三角洲城市带空间扩展对区域气温变化的影响, 将长江三角洲地区的气象站按所在空间位置分为两类: 城市带气象站和非城市带气象站。具体分类思路为: 根据 2003 年 DMSP/OLS 灯光数据确定的城市区做斑块分析, 将斑块像元数大于 250 个的大城市斑块作为城市带片区, 共有 9 个大的城市斑块满足条件, 分别为: 南京、扬州、苏州、无锡、常州、江阴—常熟、上海、杭州—绍兴、余姚—宁波, 将位于这 9 个城市斑块内的气象站定义为城市带气象站, 共 22 个城市带气象站; 其余定义为非城市带气象站, 共 77 个非城市带气象站 (图 1a)。

表 2 基于 NOAA/AVHRR 数据的长江三角洲 1998 年 1-12 月城市热岛效应的统计特征
(单位: 温度 K)

Tab. 2 Statistics of urban heat island effect in the Yangtze River Delta based on NOAA/AVHRR data of 1998

月份	城市带 平均温度(T_c)	非城市带 平均温度(T_N)	区域 平均温度(T_D)	热岛 强度(T_{CN})	城市带热岛效应使 区域平均温度的增加值(T_{DN})
1	290.0	289.8	289.8	0.2	0.0
2	300.7	299.5	299.6	1.2	0.1
3	302.0	301.6	301.6	0.4	0.0
4	309.3	307.8	308.0	1.5	0.2
5	316.8	314.4	314.7	2.4	0.3
6	319.4	316.1	316.4	3.3	0.3
7	323.2	319.6	320.1	3.6	0.5
8	323.5	319.6	320.4	3.9	0.8
9	316.2	314.6	314.9	1.6	0.3
10	310.9	310.0	310.3	0.9	0.3
11	307.0	305.2	305.5	1.8	0.3
12	296.0	295.3	295.4	0.7	0.1
年平均	308.3	307.1	307.3	1.2	0.2

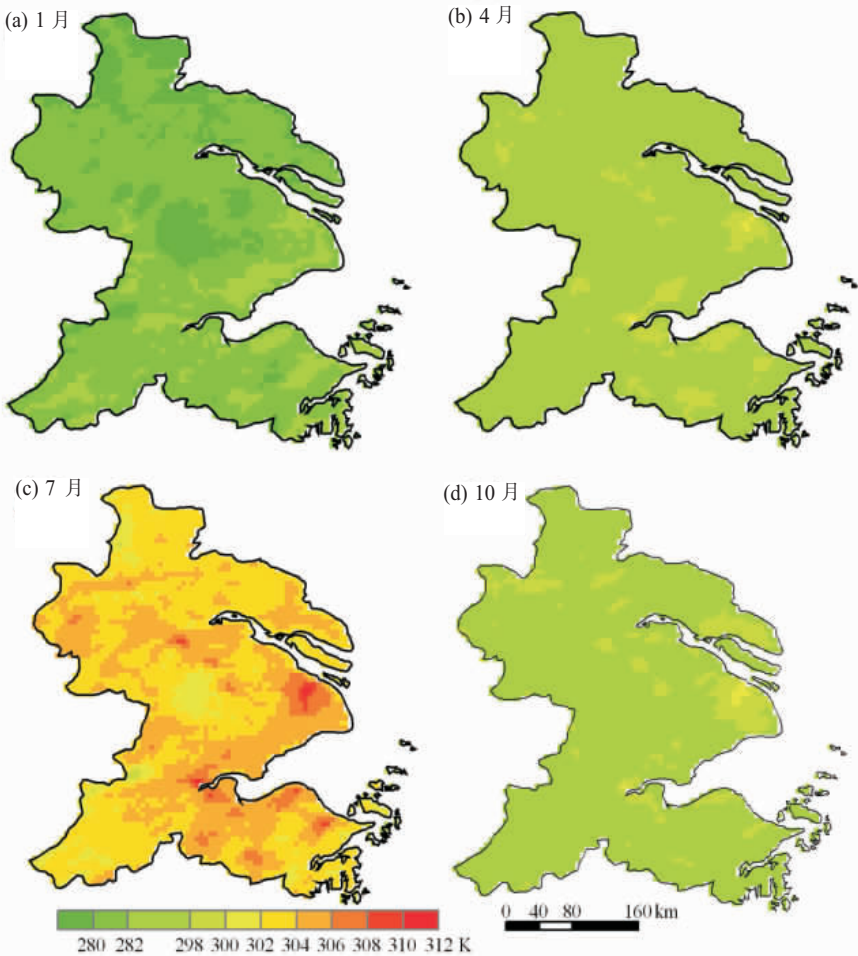


图3 基于MODIS数据的长江三角洲2000-2006年平均地表温度空间分布(单位:K)

Fig. 3 Spatial distribution of monthly mean surface temperature in the Yangtze River Delta based on MODIS data from 2000 to 2006

从1961-2005年不同年代年平均气温城市带和非城市带差值 T_{CN} 的季节变化可以看到(图4),不同年代各月年平均气温 T_{CN} 值存在显著差异,20世纪90年代是年平均气温 T_{CN} 值最大、季节覆盖最全的时期,正好对应于该区域城市带快速的空间扩展。而70年代则是年平均气温 T_{CN} 值最小、季节覆盖范围最小的时期。年平均气温 T_{CN} 值大于 0.5°C 的月份主要是2-10月,不同年代差异明显,但不论是在哪个年代,年平均气温 T_{CN} 值均是在夏季7-8月份为最大,春秋两季次之、冬季最小,这和遥感资料分析的结果相一致。

那么不同季节城市带增温效应对区域温度长期变化趋势的影响如何呢?由1-12月城市带增温效应使区域平均温度各要素项的增加值 T_{DN} 的气候倾向率(表3)可以看出,1961-2005年间,月平均气温的增加在 0.1°C 以上(注: T_{DN} 气候倾向率乘4.5大于0.1,以下同)的月份有3-5月、7、9、10月;月平均最高气温的增加值在 0.1°C 以上的为7、8月份;而月平均最低气温的增加值,除1月、6-8月外,均在 0.1°C 以上;月最高气温增的增加值在 0.1°C 以上的月份为7-9月;月最低气温的增加幅度最大,4-6月达 0.2°C 以上;地表0 cm月平均温度的增加在4-7月达 0.2°C 以上,地表0 cm月最高温度的增加在2-7月达 0.2°C 以上,6月份的地表0 cm最高温度的增加更是高达 0.6°C 。

5.3 城市带增温效应年际变化与市区年末总人口的关系

表 4 给出了长江三角洲城市带、非城市带、全区域温度各要素项年值的气候倾向率。就年平均气温而言：1961-2005 年城市带年平均气温 T_D 升高了 $1.224\text{ }^\circ\text{C}$ (0.272×4.5)，其中年平均气温的 T_{CN} 值升高了 $0.24\text{ }^\circ\text{C}$ ($0.053 \times 4.5\text{ }^\circ\text{C}$)，城市带热岛效应使区域平均温度的增加值 T_{DN} (0.016×4.5) 的增幅为 $0.072\text{ }^\circ\text{C}$ ，占城市带 T_{CN} 增温值的 30%，占区域增温值 T_D 的 5.88%。就区域增温的量值而言，城市带增温效应对区域年平均气温影响程度较小，但从 T_{CN} 的变化趋势来看(图 5a)，该影响程度正在逐渐增大，且增大趋势显著(0.05 显著性水平)。对温度各要素项的 T_{DN} 值年际变化特征分析，表明城市带增温效应对区域平均值的影响在 20 世纪 80 年代末到 90 年代初初期有一个显著增大的转折时期，以 1990 年为界，对比两个时段城市带增温效应对区域平均温度的影响发现，年平

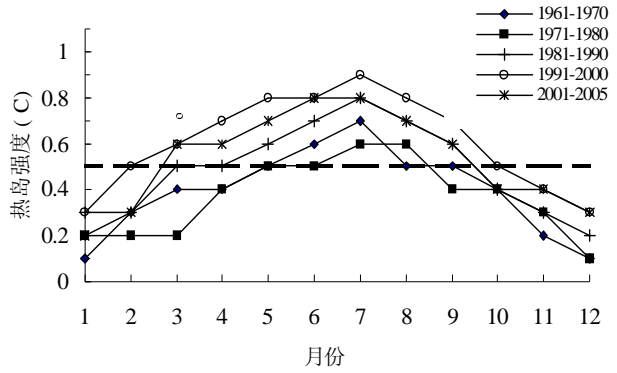


图 4 长江三角洲不同年代年平均气温 T_{CN} 月变化
Fig. 4 Variation of T_{CN} of monthly mean air temperature at different periods in the Yangtze River Delta

均气温影响程度较小，但从 T_{CN} 的变化趋势来看(图 5a)，该影响程度正在逐渐增大，且增大趋势显著(0.05 显著性水平)。对温度各要素项的 T_{DN} 值年际变化特征分析，表明城市带增温效应对区域平均值的影响在 20 世纪 80 年代末到 90 年代初初期有一个显著增大的转折时期，以 1990 年为界，对比两个时段城市带增温效应对区域平均温度的影响发现，年平

表 3 1961-2005 年长江三角洲温度的 T_{DN} 气候倾向率 (单位： $^\circ\text{C}/10\text{a}$)

Tab. 3 Climate change rate of T_{DN} of monthly mean temperature from 1961 to 2005 (unit: $^\circ\text{C}/10\text{a}$)

月份	月平均气温	月平均最高气温	月平均最低气温	月最高气温	月最低气温	地表 0cm 月平均温度	地表 0cm 月最高温度	地表 0cm 月最低温度
1	0.011	<u>-0.002</u>	0.017	<u>0.007</u>	<u>0.02</u>	-0.013	<u>0.001</u>	-0.034
2	0.018	<u>0.002</u>	0.023	<u>0.006</u>	0.024	<u>0.004</u>	0.041	-0.032
3	0.024	<u>0.009</u>	0.035	<u>0.021</u>	0.03	0.024	0.048	<u>-0.009</u>
4	0.034	0.020	0.042	0.037	0.051	0.044	0.070	0.014
5	0.028	0.013	0.038	<u>0.009</u>	0.051	0.054	0.117	0.012
6	0.016	0.013	0.020	<u>0.02</u>	0.047	0.065	0.132	0.026
7	0.022	0.025	0.017	0.036	<u>-0.002</u>	0.046	<u>0.065</u>	0.020
8	0.019	0.022	0.020	0.033	<u>0.004</u>	<u>0.015</u>	<u>0.004</u>	0.018
9	0.025	0.015	0.027	0.034	0.037	<u>0.019</u>	<u>0.044</u>	<u>0.001</u>
10	0.021	<u>0.003</u>	0.033	<u>0.02</u>	0.047	<u>0.000</u>	<u>-0.001</u>	-0.017
11	0.017	<u>0.002</u>	0.025	<u>0.003</u>	0.037	-0.015	<u>-0.025</u>	-0.035
12	0.017	<u>0.000</u>	0.027	<u>-0.011</u>	0.020	-0.022	-0.037	-0.038

注：下划线表示未通过 0.05 显著性水平的显著性检验。

表 4 1961-2005 年长江三角洲城市带、非城市带、全区域温度气候倾向率 (单位： $^\circ\text{C}/10\text{a}$)

Tab. 4 Climatic change rate of year average temperature of mega city area, non-mega-city area and the whole study area from 1961 to 2005 (unit: $^\circ\text{C}/10\text{a}$)

要素	年平均气温	年平均最高气温	年平均最低气温	年极端最高气温	年极端最低气温	地表 0 cm 年平均温度	地表 0 cm 年平均最高温度	地表 0 cm 年平均最低温度
T_C	0.324	0.258	0.387	0.341	0.611	0.200	-0.040	0.323
T_N	0.255	0.212	0.300	<u>0.188</u>	0.591	0.156	-0.032	0.327
T_D	0.272	0.223	0.322	<u>0.224</u>	0.596	0.170	-0.036	0.323
T_{CD}	0.053	0.035	0.066	0.117	0.016	<u>0.029</u>	<u>-0.003</u>	<u>0.001</u>
T_{DN}	0.016	0.011	0.022	0.036	<u>0.005</u>	0.015	<u>-0.004</u>	<u>-0.004</u>
T_{CN}	0.069	0.0462	0.087	0.1533	<u>0.020</u>	<u>0.0446</u>	<u>-0.008</u>	<u>-0.004</u>
$T_D/\sqrt{C_N}$	0.232	0.238	0.253	0.235	<u>0.246</u>	<u>0.336</u>	<u>0.506</u>	<u>0.976</u>

注：下划线表示未通过 0.05 显著性水平的显著性检验。

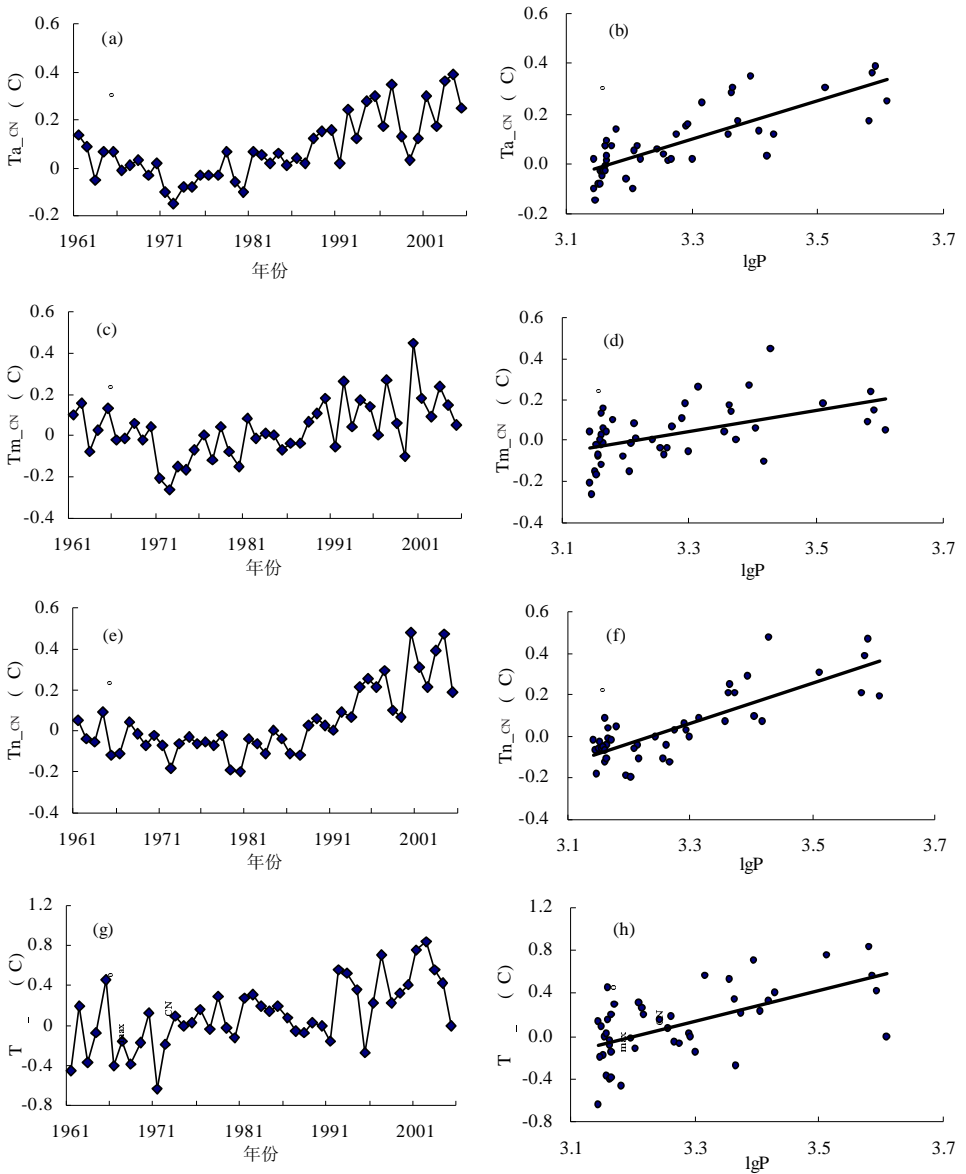


图 5 1961-2005 年长江三角洲气温各要素项的 T_{CN} 年际变化及其与城市总人口 P 的对数关系
 Fig. 5 Changes of T_{CN} and relationship between T_{CN} and logarithmic city population at the Yangtze River Delta from 1961 to 2005

均气温的 T_{DN} 值在 1961-1990 年间增加了 $0.009\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而 1991-2005 年间却高达 $0.047\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；年平均最低温度的 T_{DN} 值在 1961-1990 年间增加了 $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而 1991-2005 年间为 $0.083\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；年极端最高温度的 T_{DN} 值在 1961-1990 年间增加了 $0.078\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而 1991-2005 年间为 $0.083\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此，1991-2005 年间长江三角洲地区城市带热岛效应对区域增温趋势的影响显著，表明这一时期长江三角洲快速的城市化进程正在改变区域温度变化趋势。

长江三角洲城市带作为中国目前人口和经济最为密集的地区，人口多，国民生产总值高，能源消耗大，城市化水平高，势必影响城市热岛强度的变化。Oke^[29](1973) 的研究指出城市热岛与人口对数存在线性相关，因此本文选取长江三角洲 14 个地级以上城市市区人口总和作为城市总人口，分析城市带增温效应与城市总人口的关系。1961 年城市总

人口为 1512.52 万人, 1978 年为 1482.88 万人, 在 1961-1978 年间城市总人口呈下降趋势, 1990 年城市总人口为 1968.35 万人, 而到了 2005 年末则高达 4073.74 万人, 较 1990 年增加了 1 倍多, 较 1978 年增加了近 2 倍; 与之对应的是, 改革开放前 (1961-1978 年) 城市带年平均气温与非城市带差值 T_{CN} 增幅为 $-0.070\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 而 1978-2005 年间 T_{CN} 增幅为 $0.126\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 表明改革开放后城市面积、经济发展、人口聚集度提高对城市大气热环境产生了重要影响。将城市总人口与计算获得的气温各要素项的 T_{CN} 值进行相关分析 (图 5), 得到相应的对数线性关系为:

$$T_{a,CN} = 0.75901\lg P - 2.4042 \quad R = 0.79 \quad (6)$$

$$T_{m,CN} = 0.52321\lg P - 1.6811 \quad R = 0.53 \quad (7)$$

$$T_{n,CN} = 0.97361\lg P - 3.1487 \quad R = 0.81 \quad (8)$$

$$T_{\max,CN} = 1.41791\lg P - 4.5352 \quad R = 0.59 \quad (9)$$

式中, 下标 CN 表示气温各要素项城市带和非城市带的温差, $T_{a,CN}$ 为年平均气温 T_{CN} 值, $T_{m,CN}$ 为年平均最高气温 T_{CN} 值, $T_{n,CN}$ 为年平均最低气温 T_{CN} 值, $T_{\max,CN}$ 为年极端最高气温 T_{CN} 值, P 为城市总人口, R 为相关系数。回归分析表明气温不同要素项的 T_{CN} 值与城市总人口具有较好的正相关关系, 相关系数均通过 0.05 显著水平的显著性检验, 其中年平均气温和年平均最低气温的 T_{CN} 值与城市总人口的相关为最好。表明长江三角洲城市总人口的快速增加能较好地反映该地区城市热岛效应加剧的趋势。

为分析城市热岛增温效应使区域温度增加值 T_{DN} 与区域城市总人口的相关关系, 将城市总人口与计算获得的气温各要素项的 T_{DN} 值进行相关分析, 得到的回归关系式如下:

$$T_{a,DN} = 0.81601\lg P - 0.5902 \quad R = 0.79 \quad (10)$$

$$T_{m,DN} = 0.24801\lg P - 0.4105 \quad R = 0.51 \quad (11)$$

$$T_{n,DN} = 0.24151\lg P - 0.7804 \quad R = 0.78 \quad (12)$$

$$T_{\max,DN} = 0.33461\lg P - 1.0711 \quad R = 0.60 \quad (13)$$

回归分析表明气温不同要素项的 T_{DN} 值与城市总人口同样具有较好的正相关关系 (通过 0.05 显著水平的显著性检验)。因此, 城市带市区总人口作为反映人类活动的一个指标, 能较好地反映该地区城市热岛效应对区域气温增加趋势的影响。

6 结语

(1) 1992-2003 年长江三角洲经历了一个快速的城市空间扩展过程, 形成了一个以宁镇扬城市群、苏锡常城市群、上海大城市区、杭州湾城市群为组成部分的“之”字形城市带, 城市群之间出现城市化连片趋势。对应于长江三角洲城市带快速的空间扩展, 1961-2005 年年平均气温增温速率 (气候倾向率) 为 $0.28\sim 0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 同样呈现出“之”字形带状分布特征。

(2) 根据 NOAA/AVHRR 反演的 1 km 分辨率、MODIS 反演的 5 km 分辨率月地表温度资料和常规气象资料的研究结果表明: 城市热岛效应对长江三角洲区域平均温度的贡献以夏秋季最强、春季次之、冬季最弱。

(3) 长江三角洲城市带的增温效应使得区域的年平均气温在 1961-2005 年间增加了 $0.072\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年最高气温增加了 $0.162\text{ }^{\circ}\text{C}$, 地表 0 cm 年平均温度增加了 $0.068\text{ }^{\circ}\text{C}$; 城市带增温效应年际变化与城市总人口具有较好的对数正相关关系。城市增温效应对区域平均温度各要素项影响程度的季节变化明显, 夏季平均气温、平均最高气温、最高气温的增温都在 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上; 最低气温的增温在 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上; 地表 0 cm 温度受城市增温效应的影响最强, 增温幅度在 $0.2\sim 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 6 月份的地表 0 cm 最高温度增温速率高达 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

就增温幅度的量值而言, 城市带增温效应对区域年平均气温影响程度较小, 但从变

化趋势来看,影响程度正在持续增大,且趋势显著。

参考文献 (References)

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J T et al. (eds). New York: Cambridge University Press, 2001, 881.
- [2] Pielke R A Sr et al. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: Relevance to climate-change policy beyond the radiative effects of greenhouse gases. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 2002, A360: 1-15.
- [3] Xie Zhuang, Cao Hongxing. A symmetric changes in maximum and minimum temperature in Beijing. *Theoretical and Applied Climatology*, 1996, 55: 151-156.
- [4] Ding Jincai, Zhang Zhikai, Xi Hong et al. A study of the high temperature distribution and the heat island effect in the summer of the Shanghai area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 26(3): 412-420. [丁金才, 张志凯, 奚红等. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究. *大气科学*, 2002, 26(3): 412-420.]
- [5] Thomas C Peterson. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *Journal of Climate*, 16(18): 2941-2959.
- [6] David E Parker. A demonstration that large-scale warming is not urban. *Journal of Climate*, 2004, 19: 2882-2895.
- [7] David E Parker. Large-scale warming is not urban. *Nature*, 2004, 432: 290-290.
- [8] Chu Ziyang, Ren Guoyu. Change in urban heat island magnitude and its effect on mean air temperature record in Beijing region. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(4): 534-540. [初子莹, 任国玉. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响. *气象学报*, 2005, 63(4): 534-540.]
- [9] Lin Xuechun, Yu Shuqiu. Interdecadal changes of temperature in the Beijing region and its heat island effect. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(1): 39-45. [林学椿, 于淑秋. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 39-45.]
- [10] Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. Impact of urban growth on the heat island in Beijing. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 69-77. [季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69-77.]
- [11] Kalnay Eugenia, Cai Ming. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528-531.
- [12] Zhou Liming, Robert E Dickinson, Tian Yuhong et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *PNAS*, 2004, 101(26): 9540-9544.
- [13] Lim Young-kwon, Cai Ming, Kalnay E. Observational evidence of sensitivity of surface climate changes to land types and urbanization. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32, L22712, doi: 10.1029/2005GL024267.
- [14] Kalnay Eugenia, Cai Ming, Li Hong et al. Estimation of the impact of land-surface forcings on temperature trends in eastern United States. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D06106): 1-13.
- [15] Li Q, Zhang H, Liu X et al. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 79(34): 165-174.
- [16] Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Wu Lingyun. Impact of land use changes on surface warming in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(3): 343-348.
- [17] Li Weiliang, Liu Hongli, Zhou Xiuji. Analysis of regional atmospheric circulation influence on the urban heat island at Taihu Lake in Yangtze River Delta. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(2): 97-104. [李维亮, 刘洪利, 周秀骥. 长江三角洲城市热岛与太湖对局地环流影响的分析研究. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(2): 97-104.]
- [18] Zhou Xiuji. Research of Near Stratum Atmosphere and Ecosystem Interface of Delta of the Yangtze River. Beijing: China Meteorological Press, 2004. [周秀骥. 长江三角洲地区近地层大气和生态系统相互关系的研究. 北京: 气象出版社, 2004.]
- [19] Sutton P. Modeling population density with nighttime satellite imagery and GIS. *Computers Environment and Urban Systems*, 1997, 21(3-4): 227-244.
- [20] Imhoff M L, Lawrence W T, Stutzer D C et al. A technique for using composite DMSP/ OLS city lights satellite data to accurately map urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61: 261-370.
- [21] Imhoff M L, Lawrence W T, Elvidge C et al. Using nighttime DMSP/ OLS images of city lights to estimate the impact of urban land use on soil resources in the US. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59: 105-117.
- [22] Imhoff M L, Bounoua L, Defries R et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 434-443.
- [23] He Chunyang, Li Jinggang, Chen Jin et al. The urbanization model and process in Bohai Sea surrounding area in the 1990s by using DMSP/OLS data. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(3): 409-417. [何春阳, 李景刚, 陈晋等. 基于夜

- 间灯光数据的环渤海地区城市化过程. 地理学报, 2005, 60(3): 409-417.]
- [24] Zhuo Li, Li Qiang, Shi Peijun et al. Identification and characteristics analysis of urban land expansion types in China in the 1990s using DMSP/OLS data. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(2): 169-178. [卓莉, 李强, 史培军等. 基于夜间灯光数据的中国城市用地扩展类型. 地理学报, 2006, 61(2): 169-178.]
- [25] He Chunyang, Shi Peijun, Li Jinggang et al. Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radiance-calibrated DMSP/OLS nighttime light imagery and statistical data. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(13): 1614-1620.
- [26] Shi Neng, Chen Jiaqi. 4-phase climate change features in the last 100 years over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 18(5): 552-560. [施能, 陈家其. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征. 气象学报, 1995, 53(4): 431-439.]
- [27] Chen Longxun, Zhu Wenqin, Zhou Xiujie. Characteristics of environmental and climate change in Changjiang Delta and its possible mechanism. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 14(1): 129-140.
- [28] Chen Longxun, Zhu Wenqin, Zhou Xiujie et al. Characteristics of the heat island effect in Shanghai and its possible mechanism. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, 20(6): 991-1001.
- [29] Oke T R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 1973, 7: 769-779.

Impact of Urbanization on Regional Temperature Change in the Yangtze River Delta

XIE Zhiqing¹, DU Yin², ZENG Yan^{1,3}, SHI Yafeng³, WU Jingang¹

(1. *Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008, China;*

2. *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;*

3. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)*

Abstract: Based on non-radiance-calibrated DMSP/OLS nighttime light imagery from 1992 to 2003, urban land area statistical data, meteorological data and land surface temperature data retrieved by MODIS and NOAA/AVHRR data, the influence of urbanization on regional climate trend of temperature in the Yangtze River Delta was analyzed. Conclusions are as follows: (1) There is a significant urbanization process from 1992 to 2003 in the Yangtze River Delta, and the annual mean air temperature increased at a rate of 0.28-0.44 °C/10a in mega city. (2) The urban heat island (UHI) effect on regional mean air temperature in different seasons is summer > autumn > spring > winter. (3) The UHI intensity and the urban total population logarithm are creditable correlated. (4) The UHI effect made the regional annual mean air temperature increased 0.072 °C from 1961 to 2005 and 0.047 °C from 1991 to 2005, and the annual maximum air temperature increased 0.162 °C and 0.083 °C from 1991 to 2005, all indicating that the urban expansion in the Yangtze River Delta from 1991 to 2005 may be regarded as a serious climate signal.

Key words: Yangtze River Delta; urban heat island; mega city; urbanization process