

长江三角洲气温变化特征及城市化影响

崔林丽¹, 史 军², 杨引明¹, 李贵才³, 范文义⁴

(1. 上海市卫星遥感与测量应用中心, 上海 201100; 2. 上海市气候中心, 上海 200030;

3. 国家卫星气象中心, 北京 100081; 4. 东北林业大学, 哈尔滨 150040)

摘要: 基于长江三角洲国家基本/基准站历史气象资料和区域人口资料, 分析了 1959~2005 年和 1981~2005 年期间长江三角洲气温的年 and 季节变化特征, 气温变化在大城市、中等城市和小城镇站之间的差异, 以及城市化效应对气温的增温率和增温贡献率。结果表明, 过去 47 年和 25 年期间, 长江三角洲年均气温、年均最高和最低气温都显著增加, 增温率都是冬季和春季较高, 夏季最低。大城市站增温率明显高于小城镇和中等城市站, 城市化效应对大城市气温基本上都是增温作用, 其中对平均最低气温的增温率及贡献率最大, 对平均最高气温都最小。长江三角洲气温变化趋势和增温率、城市化效应的增温率及增温贡献率与其他地区具有较好的一致性。

关键词: 气温变化; 城市化效应; 增温率; 增温贡献率; 长江三角洲

文章编号: 1000-0585(2008)04-0775-12

1 引言

近百年来, 地球气候正经历一场以变暖为主要特征的显著变化^[1,2]。据 IPCC 第四次评估报告^[3], 过去 100 年 (1906~2005 年), 全球地表平均气温升高了 0.74℃。近 50 年, 我国气温增暖尤其明显, 年平均地表气温升高了 1.1℃, 增温速率为 0.022℃/年^[4]。区域气候变化, 特别是温度升高已经对许多自然系统产生了影响^[5,6]。因此, 对气候变化的研究日益引起政府部门和科学界的关注。

检测和识别近百年全球和中国气候变化特别是气候变暖的性质和可能原因, 是当前气候研究的一个热点问题^[7]。各种迹象表明, 目前的气候变化不仅只是自然的变化, 在很大程度上可能与人类活动有密切关联^[8,9]。在诸多的人类活动中, 城市化对地面气温序列的影响成为气候变化研究中的一个新热点^[10], 需要在研究中给予密切关注^[11]。

长江三角洲地处东亚季风区, 是我国东部经济最发达、城市最集中、人口最密集的地区。近 50 年来, 尤其是改革开放以来, 伴随着快速城市化和工业化, 长江三角洲气候和生态环境都发生了明显变化^[12,13]。了解该地区气温变化, 明确气温变化中城市化效应的影响和贡献, 是气候变化科学与区域经济可持续发展的需要。

对长江三角洲的气温变化, 已有一些研究成果, 如金龙等^[14]利用上海、南京和杭州三站 1905~1995 年的气象观测资料, 分析讨论了长江三角洲地区近百年的温度变化特征; 徐家良等^[15]使用上海、杭州和南京 3 市的气象资料, 分析了长江三角洲城市 50 年来的气

收稿日期: 2008-01-04; 修订日期: 2008-05-08

基金项目: 上海市科委重大项目 (06DZ12011); 国家 863 计划项目 (2006AA12Z104); 博士点基金 (20070225003); 国家科技支撑项目 (2006BAD 03A 00-6)

作者简介: 崔林丽(1975-), 女, 博士, 副研究员。主要从事气候变化遥感研究。E-mail: cllcontact@yahoo.com.cn

候变化特征；刘春玲等^[16]对长江三角洲地区上海、杭州和南京 3 站 1951~2001 年的年和季节气温变化趋势进行分析。也有一些研究开展城市化对长江三角洲局地气温变化的影响，如李维亮等^[17]研究了长江三角洲的城市热岛效应；谢志清等^[18]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。

然而，以往的研究多是基于长江三角洲 3 个城市站（上海、南京和杭州）的气象资料，研究站点较少，得出的结果基本上是反映长江三角洲城市气温的时间变化特征，没有从空间上分析长江三角洲气温变化，研究结果缺乏普遍性和地域性。个别研究虽然分析了长江三角洲城市化对局地气温变化的贡献^[18]，也只是针对平均气温，没有对其他气温要素，如平均最高和最低气温的分析。因此，本文利用国家基本/基准气象站资料，对长江三角洲地区 1959~2005 年和 1981~2005 年两个时期平均气温、平均最高与最低气温的年和季节变化趋势及城市化效应的增温和贡献进行研究。

2 研究资料与方法

2.1 研究资料

本研究中，长江三角洲主要包括江苏南部、浙江北部、上海市和安徽省东部部分地区（图 1）。研究资料为长江三角洲气象站年和月气温资料，包括年和月平均气温、平均最高气温和平均最低气温，来自国家气象信息中心气候资料室，共获得 44 个气象站数据。气温资料在计算前经质量检查，对于迁站距离较远、海拔较高的站进行了剔除，同时又选取缺测资料非常少的站。在考虑站点资料连续性、站点海拔高度及迁站等因素基础上，选出 32 个国家基本/基准站作为本文的基本资料。其中除江苏高邮站和浙江龙泉站在 1967 和 1968 年有缺测外，其余站都具有从 1959 年 1 月 1 日到 2005 年 12 月 31 日连续 47 年的观测资料^[19]。

2.2 研究方法

在本研究中，为了消除海拔高度等地理因子的影响，选取 1971~2000 年共 30 年作为气候参考期，计算各站逐年的季、年平均气温距平值，并由此计算各站季、年气温变化的线性趋势及其变化速率、城市化效应增温率和贡献率。本文采用气象季节定义，即当年 1、2 月和上年的 12 月为冬季，3~5 月为春季，6~8 月为夏季，9~11 月为秋季。气温变化速率采用最小二乘法进行估算，参照已有的研究^[10,20~22]，定义城市站与对比站增温率之差为城市化增温率，城市化增温率在其总增温率中所占的百分比为城市化增温贡献率，它们的单位分别为 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 %。

城市人口增长以及城市用地面积增加是衡量城市发展非常重要的指标，而城市用地面积往往与城市人口之间存在着很强的相关性^[23]，因此，人口变化是检验城市化发展对气候影响的一个理想指标^[24]。本文以台站具体位置和所在地的人口普查资料为主要依据确定台站类型。在长江三角洲地区，城市化相对发达，很难找到真正意义上的乡村站。参照

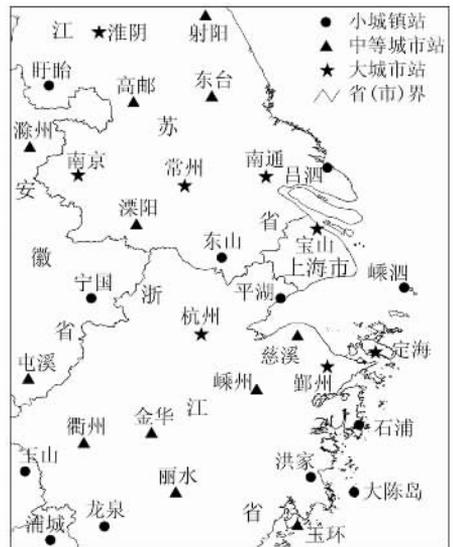


图 1 长江三角洲研究区及各类气象站分布

Fig. 1 The study area and the distribution of meteorological stations in the Yangtze River Delta

华丽娟等^[24]划分方法，文中将 10 万人口以下的气象站作为小城镇站，即城市化效应的对比站，将 50 万人口以上的站点作为大城市站，人口在 10~50 万的气象站作为中等城市站。城市气象站人口就是该城市所有城区街道常住人口的总和，不包括所辖郊县乡镇人口。县气象站的人口是指县城（城关镇）的人口数量，不包括乡镇及村庄的人口。

本文首先利用处于研究区的 32 个气象站气温序列分析了长江三角洲气温在两个时期（1959~2005 年和 1981~2005 年）的年际变化、季节变化、年代际变化和空间变化特征；然后分析了长江三角洲大城市、中等城市和小城镇站的气温变化速率和城市化效应对长江三角洲大城市和中等城市气温变化的影响和贡献；最后讨论和对比分析了长江三角洲和其他地区的气温变化速率及城市化气温效应。

3 研究结果与分析

3.1 长江三角洲气温的时间变化特征

1959~2005 年期间，长江三角洲年平均气温表现为先略有降低，然后快速升高的变化特征（图 2a），在上世纪 70 年代（1971~1980 年）最低（平均为 15.9℃），而在本世纪最初 5 年最高（平均为 17.0℃）。47 年间，年均气温以 0.20℃/10a 的速率极显著增加，其中冬季、春季、夏季和秋季的增温率分别为 0.36、0.25、0.05 和 0.17℃/10a，年均气温在冬季和春季增加极显著，在夏季增加不显著（ $P>0.05$ ）（表 1）。1981~2005 年期间，长江三角洲的年均气温则以 0.63℃/10a 的速率极显著增加（图 2b），其中在冬季、春季、夏季和秋季的增温率分别为 0.86、0.69、0.41 和 0.61℃/10a，冬季、春季和秋季均温增加极显著，夏季均温增加弱显著（表 1）。

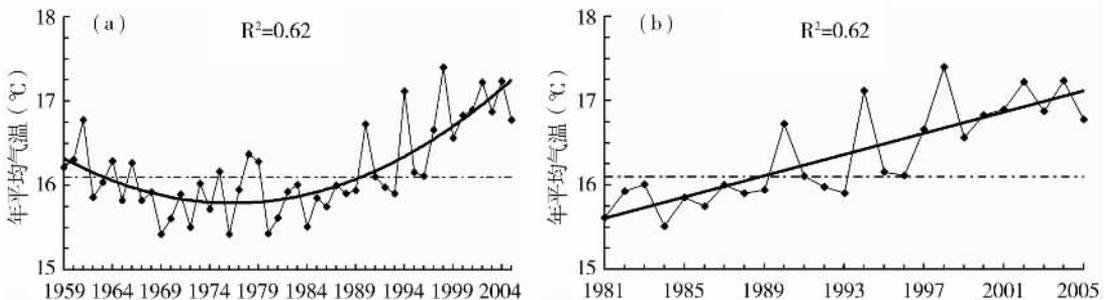


图 2 长江三角洲年平均气温的时间变化

(a: 1959~2005 年; b: 1981~2005 年; 粗实线为趋势线; 细虚线为常年值)

Fig. 2 Temporal variation of annual mean temperature in the Yangtze River Delta (a: 1959-2005; b: 1981-2005; thick solid line is the trendline, and thin dashed line is the average from 1971 to 2000)

与平均气温的变化特征一致，平均最高气温也呈现出高一低一更高的年代际变化，在上世纪 70 年代最低，而在本世纪最初 5 年最高；平均最低气温从上世纪 60 年代到本世纪最初 5 年逐渐在增加，呈现出低一高的年代际变化特征（图 3）。1959~2005 年期间，长江三角洲年均最高气温以 0.17℃/10a 的速率显著增加，年均最低气温以 0.23℃/10a 的速率极显著增加。年均最高和最低气温在冬季分别以 0.25 和 0.43℃/10a 的速率呈弱显著和极显著增加，在春季都以 0.25℃/10a 的速率显著增加，在秋季分别以 0.16 和 0.18℃/10a 的速率弱显著增加，在夏季增加都不显著（表 1）。

1981~2005 年期间，年均最高和最低气温分别以 0.70 和 0.60℃/10a 的速率极显著

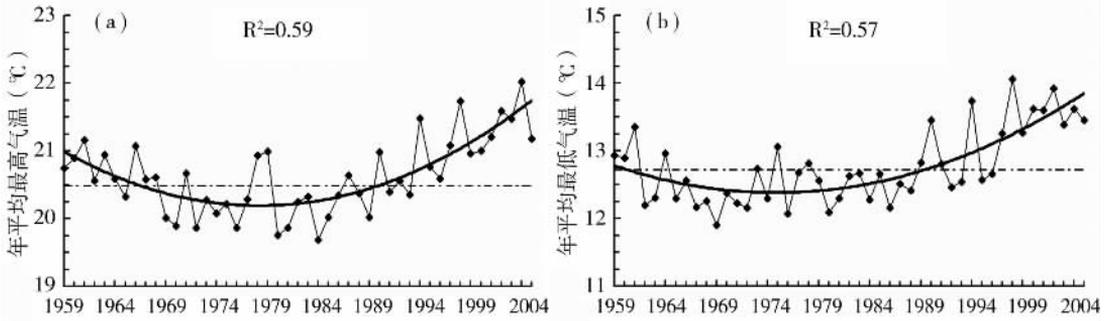


图3 1959~2005年长江三角洲年平均最高(a)和最低(b)气温时间变化(粗实线为趋势线;虚线为常年值)

Fig. 3 Temporal variation of annual mean maximum and minimum temperature in the Yangtze River Delta (thick solid line is the trendline, and thin dashed line is the average from 1971 to 2000)

增加, 平均最高气温在冬季以 $0.80^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率显著增加, 在春季和秋季分别以 0.83 和 $0.75^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率极显著增加, 在夏季则以 $0.47^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率弱显著增加。平均最低气温在冬季以 $0.87^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率极显著增加, 在春季、夏季和秋季分别以 0.61 、 0.38 和 $0.53^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率显著增加(表1)。

表1 长江三角洲地区增温速率($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)及显著性检验

Tab. 1 Averaged warming rate and its significance in the Yangtze River Delta

气温类别	1959~2005年					1981~2005年				
	年	冬季	春季	夏季	秋季	年	冬季	春季	夏季	秋季
平均气温	0.20***	0.36***	0.25***	0.05	0.17*	0.63***	0.86***	0.69***	0.41*	0.61***
平均最高气温	0.17**	0.25*	0.25**	0.01	0.16*	0.70***	0.80**	0.83***	0.47*	0.75***
平均最低气温	0.23***	0.43***	0.25**	0.09	0.18*	0.60***	0.87***	0.61**	0.38**	0.53**

注: ***为0.001显著性水平, 极显著; **为0.01显著性水平, 显著; *为0.05显著性水平, 弱显著

在两个时期, 平均气温、平均最低气温增温率都是冬季最高, 其次是春季和秋季, 夏季最低, 平均最高气温增温率是春季略高于冬季, 夏季最低。1959~2005年期间, 年增温率表现为平均最低气温最高, 平均最高气温最低; 而在1981~2005年期间, 年增温率是平均最高气温最高, 平均最低气温最低。在季节增温率上, 1959~2005年期间, 在冬季、夏季和秋季, 平均最低气温的增温率最高, 平均最高气温增温率最低; 1981~2005年期间, 在冬季, 平均最低气温增温率最高, 平均最高气温增温率最低, 在春季、夏季和秋季则是平均最高气温增温率最高, 平均最低气温增温率最低(表1)。

3.2 长江三角洲气温的空间变化特征

在空间上, 长江三角洲年均气温在过去47年间都呈增加趋势, 以浙江大陈岛站增温速率最高, 达 $0.44^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 其次是浙江鄞州站 ($0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 浙江衢州站最低, 为 $0.06^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。相关分析表明这种增温趋势除在长三角西南部的衢州、玉山、丽水和浦城站外, 在其他站都显著, 在长三角中部及浙江沿海, 年均气温增加趋势都极显著(图4a)。1981~2005年期间, 年均气温在整个长三角都呈增加趋势, 在浙江鄞州站增加最多, 达 $0.90^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 其次是上海宝山站 ($0.86^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 在江苏溧阳、高邮和浙江慈溪站也较高, 分别为 0.82 、 0.77 和 $0.77^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 福建浦城站年均气温增加最低, 为 $0.43^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。相关分析也表明年均气温增加趋势在研究区所有站都极显著(图4b)。

过去47年间, 长三角年均最高气温除在江苏盱眙站降低外, 在其余站都增加, 增温

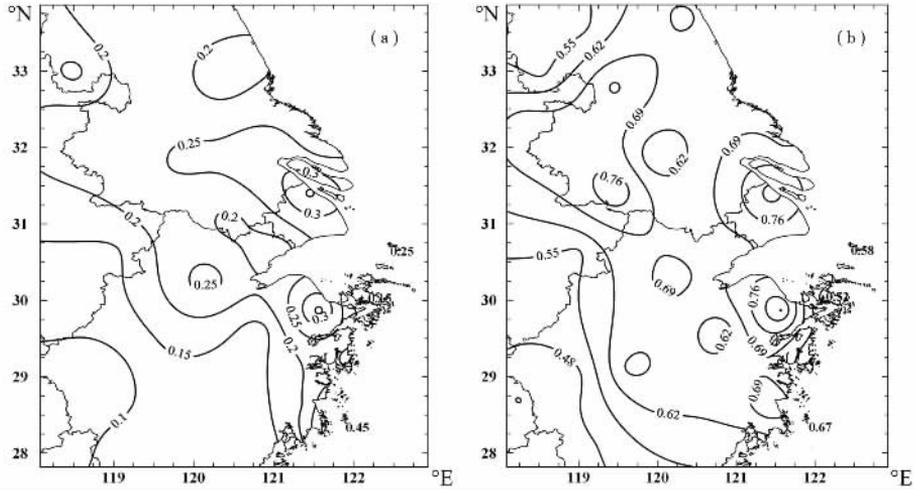


图 4 长江三角洲地区年均气温的空间变化速率 ($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) (a: 1959~2005 年; b: 1981~2005 年)
 Fig. 4 Spatially averaged warming rate of annual mean temperature in the Yangtze River Delta
 (a: 1959-2005; b: 1981-2005)

率介于 $0.06\sim 0.34^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间，以浙江鄞州站最高，福建浦城站最低。年均最高气温增加趋势除在长三角北部和西南部分地区外都显著，在上海和浙江沿海，增温趋势极显著 (图 5a)。年均最低气温在长三角都呈增加趋势，增温率介于 $0.03\sim 0.48^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间，以浙江大陈岛站最高，浙江衢州站最低。年均最低气温增温率总体上北部大于南部，除衢州、嵊州和平湖站外，增温趋势也都极显著 (图 5b)。

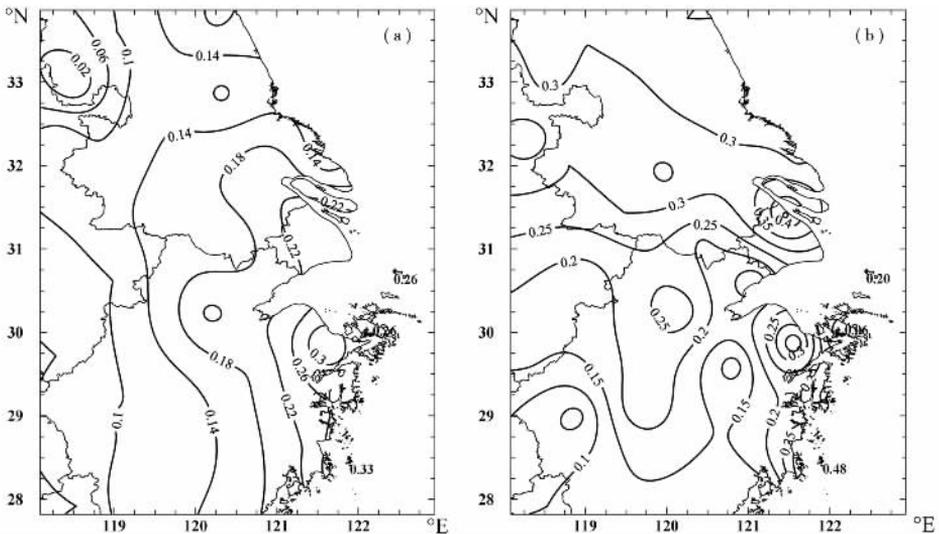


图 5 1959~2005 年长江三角洲地区年均最高 (a) 与最低 (b) 气温的空间变化速率 ($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)
 Fig. 5 Spatially averaged warming rate of annual maximum
 (a) and minimum (b) temperature in the Yangtze River Delta

1981~2005 年期间，长江三角洲年均最高和最低气温都增加。除在江苏盱眙站显著增温外，年均最高气温在长江三角洲其他地区都极显著增温，且南部增温明显高于北部。以浙江鄞州站增温率最高 ($0.97^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)，江苏盱眙站最低 ($0.46^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。年均最低气温

除西南部弱显著增温外,在其他地区都极显著增温,且在北部增温明显高于南部。江苏溧阳站增温最高(0.97℃/10a),而浙江衢州站最低(0.23℃/10a)。

3.3 长江三角洲气温变化特征的站点差异

对长江三角洲 32 个国家基本/基准站气温变化按小城镇站、中等城市站和大城市站分别统计,结果表明(表 2),1959~2005 年期间,除中等城市站在夏季平均最高气温略有降低(-0.02℃/10a)外,长江三角洲其余所有类型台站在年及季节平均气温、平均最高和最低气温都增加。在增温速率上,无论是年还是季节平均气温、平均最高和最低气温,大城市站都明显高于小城镇站和中等城市站,而小城镇站和中等城市站的增温率都很接近,没有表现出明显的差异。在 1981~2005 年期间,长江三角洲所有类型台站的年及季节平均气温、平均最高和最低气温都增加,增温率都明显高于 1959~2005 年期间对应值。大城市站除冬季平均最高气温增温率低于中等城市和小城镇站外,其他年及季节气温增温速率都明显高于小城镇和中等城市站,中等城市站增温率也都高于小城镇站。

1959~2005 年期间,所有类型台站的平均气温、平均最高和最低气温增温率都是以夏季最低,平均气温和平均最低气温的增温率都是以冬季最高。小城镇站的平均最高气温增温率以冬季最高,中等和大城市站的平均最高气温增温率是以春季最高。1981~2005 年期间,所有类型台站平均气温、平均最高和最低气温增温率都是以夏季最低,平均气温和平均最低气温增温率是以冬季最高,平均最高气温的增温率是以春季最高(表 2)。

表 2 不同类型站点平均气温变化速率(℃/10a)

Tab. 2 Averaged warming rate of air temperature in each type of station in the Yangtze River Delta

项目	站点 类型	1959~2005 年					1981~2005 年				
		年	冬季	春季	夏季	秋季	年	冬季	春季	夏季	秋季
平均气温	小城镇	0.18	0.35	0.22	0.05	0.13	0.58	0.85	0.66	0.32	0.56
	中城市	0.17	0.32	0.23	0.03	0.15	0.65	0.88	0.70	0.45	0.65
	大城市	0.27	0.43	0.35	0.09	0.25	0.69	0.90	0.75	0.51	0.68
平均最高气温	小城镇	0.15	0.26	0.22	0.01	0.14	0.67	0.80	0.82	0.39	0.73
	中城市	0.15	0.22	0.24	-0.02	0.16	0.73	0.82	0.85	0.48	0.78
	大城市	0.21	0.27	0.32	0.05	0.20	0.75	0.79	0.88	0.60	0.79
平均最低气温	小城镇	0.20	0.41	0.21	0.08	0.14	0.53	0.89	0.55	0.31	0.47
	中城市	0.21	0.40	0.23	0.08	0.18	0.64	0.98	0.66	0.42	0.56
	大城市	0.31	0.52	0.35	0.14	0.27	0.65	0.99	0.66	0.46	0.61

3.4 城市化对长江三角洲气温的影响和贡献

以小城镇站增温率为基准,分析了长江三角洲城市化增温率及其贡献率,结果表明(表 3),在 1959~2005 年期间,城市化对中等城市气温影响很小,对大城市为增温;而在 1981~2005 年期间,城市化对中等城市和大城市基本都起着很明显的增温作用。在两个时期,城市化对年及季节平均最低气温的增温率及增温贡献率基本上都大于其对平均气温的增温率及增温贡献率,以平均最高气温的增温率及增温贡献率最小。

1959~2005 年期间,由于中等城市平均气温、平均最高和最低气温与小城镇站差异很小,所以中等城市城市化增温率较低,在-0.04~0.04℃/10a 之间,城市化增温贡献率在-100~23.1%。年平均气温和平均最高气温、冬季和夏季的平均气温、平均最高和最低气温的增温率都为零或负值,即城市化对长三角中等城市年及冬季和夏季气温多数都为降温作用,在春季和秋季都为增温作用。在 1981~2005 年期间,中等城市城市化增温

率都为正值, 介于 $0.02 \sim 0.13^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 以夏季增温率和增温贡献率最高, 冬季增温率和增温贡献率最低 (表 3)。

表 3 长江三角洲城市化增温率及其增温贡献率

Tab. 3 Warming rate of urbanization and its relative contribution to regional warming in the Yangtze River Delta

气温	增温率 ($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)					贡献率 (%)				
	年	冬季	春季	夏季	秋季	年	冬季	春季	夏季	秋季
中等城市 (1959~2005 年)										
平均	-0.01	-0.03	0.01	-0.02	0.02	-5.9	-9.4	5.5	-87.2	15.0
平均最高	0.00	-0.04	0.02	-0.04	0.02	0.0	-18.2	9.3	-100	11.7
平均最低	0.01	-0.01	0.02	0.00	0.04	4.8	-2.5	8.9	0.7	23.1
中等城市 (1981~2005 年)										
平均	0.07	0.03	0.04	0.13	0.09	10.8	3.4	5.7	28.9	13.8
平均最高	0.06	0.02	0.03	0.09	0.05	8.2	2.4	3.5	18.8	6.4
平均最低	0.11	0.09	0.11	0.11	0.09	17.2	9.2	16.7	26.2	16.1
大城市 (1959~2005 年)										
平均	0.09	0.08	0.13	0.04	0.12	33.3	18.6	37.0	47.1	47.2
平均最高	0.06	0.01	0.10	0.04	0.06	28.6	3.7	32.1	77.9	29.8
平均最低	0.11	0.11	0.14	0.05	0.14	35.5	21.2	39.7	40.1	50.2
大城市 (1981~2005 年)										
平均	0.11	0.05	0.09	0.19	0.12	15.9	5.6	12.0	37.3	17.6
平均最高	0.08	-0.01	0.06	0.21	0.06	10.7	-1.3	6.8	35.0	7.6
平均最低	0.12	0.10	0.11	0.15	0.14	18.5	10.1	16.7	32.6	23.0

1959~2005 年期间, 城市化对大城市平均气温、平均最高和最低气温的增温率在春季最高, 其次是秋季, 在夏季和冬季增温率较低。城市化对平均气温和平均最高气温的增温贡献率在夏季最大, 对平均最低气温的贡献率则以秋季最大, 对平均气温、平均最高和最低气温增温贡献率都是在冬季最小。1981~2005 年期间, 除冬季平均最高气温外, 城市化对大城市都为增温过程, 平均气温、平均最高和最低气温的增温率在夏季最高, 其次是秋季, 在春季和冬季较低, 其增温贡献率都是夏季最大, 其次是在秋季和春季, 在冬季最小 (表 3)。

4 讨论

4.1 气温变化趋势与速率

长江三角洲国家基本/基准站年及季节平均气温、平均最高和最低气温的变化趋势与全国、华北地区和表 4 中多数省市基本/基准站的气温变化趋势一致, 即基本都为增温。长江三角洲年平均气温增温率高于湖北省 ($0.12^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 接近于北京市和全国平均增温率 (分别为 0.22 和 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 但低于华北地区其他一些省市和甘肃省、武汉市; 季节平均气温增温率与全国、华北地区、华北一些省市和武汉市一致, 都是冬季最大, 春秋季节次之, 夏季最小。长江三角洲年平均最高气温增温率高于武汉市、湖北省和全国平均增温率, 但低于甘肃省和天津市增温率。在季节变化上, 长江三角洲平均最高气温增温率与全国和多数省 (市) 结果不完全一致, 长江三角洲表现为春季略大于冬季, 夏季最小, 而

全国及多数省市都是冬季最大, 夏季最小。长江三角洲年平均最低气温增温率也是高于湖北省 ($0.19^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 但低于全国平均及其他一些省(市), 季节增温率与全国及多数省(市)一致, 都是冬季最大, 春秋季节次之, 夏季最小(表4)。

表4 一些国家基本/基准站增温率 ($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)

Tab. 4 Averaged warming rate of mean temperature in some basic/reference climatological surface stations

气温	地点	时期	年	冬季	春季	夏季	秋季	文献
平均气温	华北地区	1961~2000	0.29	0.62	0.24	0.09	0.21	[7]
	北京市	1961~2000	0.22	0.53	0.27	0.12	0.15	[21]
	天津市	1964~2003	0.56	0.80	0.63	0.41	0.34	[26]
	河北省	1961~2003	0.36	0.67	0.37	0.19	0.19	[10]
	山东省	1963~2002	0.33	0.65	0.36	0.13	0.17	[20]
	济南市	1963~2002	0.30	0.66	0.33	0.09	0.13	[20]
	甘肃省	1961~2002	0.29	0.55	0.15	0.18	0.26	[22]
	湖北省	1961~2000	0.12	0.32	-0.17	-0.12	0.13	[27]
	武汉市	1961~2000	0.31	0.57	0.35	0.04	0.30	[27]
	中国	1951~2004	0.25	0.39	0.28	0.15	0.20	[11]
长三角	1959~2005	0.20	0.36	0.25	0.05	0.17	本文	
平均最高气温	甘肃省	1961~2002	0.24	0.42	0.05	0.13	0.24	[22]
	湖北省	1961~2000	0.09	0.20	0.18	-0.22	0.19	[27]
	武汉市	1961~2000	0.06	0.17	0.17	-0.21	0.12	[27]
	天津市	1964~2003	0.41	0.57	0.51	0.33	0.16	[26]
	中国	1951~2002	0.12	0.25	0.10	0.03	0.09	[11]
长三角	1959~2005	0.17	0.25	0.25	0.01	0.16	本文	
平均最低气温	甘肃省	1961~2002	0.29	0.65	0.19	0.21	0.25	[22]
	湖北省	1961~2000	0.19	0.44	0.18	0.02	0.19	[27]
	武汉市	1961~2000	0.55	0.88	0.52	0.29	0.49	[27]
	天津市	1964~2003	0.67	0.97	0.74	0.45	0.41	[26]
	中国	1951~2002	0.28	0.49	0.28	0.15	0.22	[11]
长三角	1959~2005	0.23	0.43	0.25	0.09	0.18	本文	

在年及季节增温速率上, 无论是长江三角洲还是全国及一些省市, 总体来讲, 都表现出比较一致的规律, 即最低气温增温率最高, 平均气温次之, 最高气温增温率最低。长江三角洲年平均气温增温率也与基于基本/基准站和一般站估算出的西北地区 1961~2000 年增温率 ($0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[25] 接近。

4.2 城市化效应及其增温率和贡献率

在本研究中, 小城镇站是人口在 10 万以下的气象站, 中等城市站是人口在 10~50 万的气象站。研究发现, 1959~2005 年期间, 年及季节平均气温、平均最高和最低气温增温率在小城镇站和中等城市站间很接近, 中等城市城市化增温率很小, 在 $-0.04 \sim 0.04^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间, 其中城市化对中等城市年及冬季和夏季气温多数都为降温作用。这可能是本文所用的对比站“小城镇站”造成的。在一些地方, 小城镇站城市化增暖可能比中等城市更明显。如 Jones 等^[28] 对前苏联、中国东部、澳大利亚东部以及美国的城市和农村站平均气温变化比较认为, 在中国东部, 农村站的升温甚至比城市站还大。方锋等^[25]

对中国西北地区不同级别的城市效应进行了检验，发现人口在 10~50 万城市城市效应最不稳定，易随温度的自然变化而变化。

Karl 等^[29] 研究认为，1901~1984 年期间美国年平均温度序列中城市化影响为 0.12℃。Ren 等^[30] 对中国华北地区 1961~2000 年地面年平均气温趋势研究认为，大城市站受城市化的影响最明显，热岛引起的增温达 0.16℃/10a，小城市站热岛引起的增温为 0.07℃/10a，国家基本/基准站的热岛增温率为 0.11℃/10a，占总增温速率的 38% 左右。与华北地区、华北一些省市和甘肃省、武汉市一样，城市化效应对长江三角洲年及季节平均气温、平均最高和最低气温都为增温作用（表 5）。城市化效应对长江三角洲大城市年平均气温的增温率和增温贡献率低于华北地区、河北省、北京市和武汉市，但高于甘肃省和济南市。城市化效应对长江三角洲冬、春和秋季平均气温的增温率居于表 5 所列 9 个省市增温率的中间，但夏季平均气温的增温率偏低，仅高于甘肃省。城市化效应对各省市四季平均气温的增温率没有明显的季节规律性，但增温贡献率季节规律性较明显，多数省市表现为夏季最大，秋季和春季次之，冬季最小。

表 5 一些国家基本/基准站城市化增温率及增温贡献率

Tab. 5 Warming rate of urban heat island and its relative contribution to regional warming in some basic/reference climatological surface stations

气温	地区	增温率 (°C/10a)					贡献率 (%)					文献
		年	冬季	春季	夏季	秋季	年	冬季	春季	夏季	秋季	
平均气温	华北	0.11	0.12	0.10	0.09	0.10	38	19	42	100	48	[7]
	北京	0.16	0.15	0.17	0.13	0.19	71	29	63	100	100	[21]
	天津	0.11	0.10	0.06	0.11	0.16	20	13	10	27	47	[26]
	河北	0.14	0.15	0.16	0.13	0.12	40	22	43	68	60	[10]
	山东	0.09	0.03	0.16	0.10	0.07	27	5	44	77	41	[20]
	济南	0.07	0.01	0.12	0.09	0.07	23	1	35	100	51	[20]
	甘肃	0.05	0.08	0.04	0.03	0.02	19	14	28	14	6	[22]
	湖北	0.09	0.08	-0.23	0.09	0.10	75	25	0	100	77	[27]
	武汉	0.20	0.20	0.20	0.21	0.23	65	35	57	100	77	[27]
长三角	0.09	0.08	0.13	0.04	0.12	33	19	37	47	47	本文	
平均最高气温	湖北	0.07	0.05	0.09	0.07	0.07	78	25	50	100	37	[27]
	武汉	0.00	-0.05	0.03	0.00	0.03	0	-29	18	0	25	[27]
	天津	0.06	0.08	0.05	0.07	0.06	15	14	10	21	38	[26]
	长三角	0.06	0.01	0.10	0.04	0.06	29	4	32	78	30	本文
平均最低气温	湖北	0.09	0.10	0.09	0.06	0.17	48	23	50	100	90	[27]
	武汉	0.37	0.39	0.33	0.34	0.39	67	44	64	100	80	[27]
	天津	0.10	0.12	0.02	0.04	0.16	15	12	3	9	39	[26]
	长三角	0.11	0.11	0.14	0.05	0.14	36	21	40	40	50	本文

注：各地区的统计时段同表 2，表中所列本文数据为大城市站的对应值。

城市化效应对长江三角洲大城市年平均最高气温的增温率与湖北省和天津市接近，增温贡献率介于天津和湖北之间。城市化效应对四季平均最高气温增温率和增温贡献率与湖北省一致，增温率是春季最高，秋季和夏季次之，冬季最低；增温贡献率是夏季最高，其次是春季和秋季，冬季最低（表 5）。城市化对长江三角洲大城市年平均最低气温的增温率

也与湖北省和天津市接近, 增温贡献率介于天津市和湖北省之间。在长江三角洲和其他省市, 城市化效应对四季平均最低气温的增温率都是以秋季最高。城市化的增温贡献率在湖北省和武汉市是夏季最高, 冬季最低; 在长江三角洲是秋季最高, 冬季最低(表5)。

除地域差异外, 不同研究对城市站和对比站划分各异, 也是造成各地季节增温率大小缺乏一致性的重要原因。在本研究中, 城市化增温效应是以小城镇站增温率为对照, 即假设小城镇站城市化效应的增温率为0。Karl 等^[31]通过分析美国的温度资料发现, 在美国即使是1万人口的小城镇也存在明显的城市化增暖倾向。正如前面所述, 在长江三角洲地区, 很难找到真正意义上的乡村站, 文中用作对比的小城镇站实际上也都受到城市化的影响, 使得文中估算的大、中城市化增温率和贡献率都偏低。此外, 台站密度、分析方法和序列年代长度也造成研究结果的差异, 未来研究应该采用更完全的台站资料。

5 结论

本文分析了1959~2005年和1981~2005年期间长江三角洲气温的时间和空间变化趋势和变化速率, 对比研究了两个时期长江三角洲大城市、中等城市和小城镇站气温变化特征及城市化效应对大、中城市气温的增温率和贡献率, 得出以下几点结论:

(1) 过去47年和25年期间, 长江三角洲年均气温分别以0.20和0.63°C/10a的速率极显著增加, 年均最高气温分别以0.17和0.70°C/10a的速率显著和极显著增加, 年均最低气温分别以0.20和0.60°C/10a的速率极显著增加。在两个时期, 平均气温、平均最高和最低气温在空间上基本都呈增加趋势, 增温率都是冬季和春季较高, 夏季最低。

(2) 在两个时期, 所有类型站的年及四季平均气温、平均最高和最低气温基本都增加。1959~2005年间, 大城市站增温率明显高于小城镇和中等城市站, 小城镇和中等城市站增温率很接近, 而在1981~2005年间, 除冬季平均最高气温外, 大城市站增温率明显高于小城镇和中等城市站, 中等城市站增温率高于小城镇站。

(3) 1959~2005年间, 城市化对中等城市气温影响很小, 对大城市为增温, 其增温率在春季最高, 夏季和冬季较低, 增温贡献率是冬季最小。1981~2005年间, 城市化对中等城市和大城市基本都起着很明显的增温作用, 其增温率在夏季最高, 春季和冬季较低, 增温贡献率是夏季最大, 冬季最小。两个时期, 城市化对平均最低气温的增温率及贡献率基本上都最大, 对平均最高气温都最小。

(4) 长江三角洲气温的变化趋势与全国、华北地区和我国一些省市一致, 即基本上都为增温, 在增温速率上, 也都表现比较一致, 即最低气温增温率最高, 平均气温次之, 最高气温增温率最低。城市化效应的增温作用也与华北地区、华北一些省市和甘肃省、武汉市一致。地域差异、城市站和对比站划分各异、对比站不同程度地受到城市化的影响、台站密度、分析方法和序列年代长度等, 都会对研究结果造成差异。

参考文献:

- [1] 王绍武, 叶谨林. 近百年全球气候变暖的分析. 大气科学, 1995, 19(5): 545~553.
- [2] 王绍武, 龚道溢. 对气候变暖问题争议的分析. 地理研究, 2001, 20(2): 153~160.
- [3] IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- [4] 《气候变化国家评估报告》编写委员会编著. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007. 3.

- [5] IPCC, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, *et al.* (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 976.
- [6] 钟永德, 李迈和, Norbert Kraeuchi. 地球暖化促进植物迁移与入侵. 地理研究, 2004, 23(3): 347~356.
- [7] 周雅清, 任国玉. 华北地区地表气温观测中城镇化影响的检测和订正. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 743~753.
- [8] 邓莲堂, 束炯, 李朝颐. 上海城市热岛的变化特征分析. 热带气象学报, 2001, 17(3): 273~280.
- [9] 任春艳, 吴殿廷, 董锁成. 西北地区城市化对城市气候环境的影响. 地理研究, 2006, 25(2): 233~241.
- [10] 刘学锋, 于长文, 任国玉. 河北省城市热岛强度变化对区域地表平均气温序列的影响. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 763~770.
- [11] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701~716.
- [12] 刘晶森, 周秀骥, 余锦华, 等. 长江三角洲地区水和热通量的时空变化特征及影响因子. 气象学报, 2002, 60(2): 139~145.
- [13] 何剑锋, 庄大方. 长江三角洲地区城镇时空动态格局及其环境效应. 地理研究, 2006, 25(3): 388~396.
- [14] 金龙, 刘雅芳, 陶玫, 等. 长江三角洲近百年的温度变化及未来趋势预测研究. 南京气象学院学报, 1999, 22(增刊): 553~557.
- [15] 徐家良, 柯晓新, 周伟东. 长江三角洲城市地区近 50 年气候变化及其影响. 大气科学研究与应用, 2005, 28: 8~16.
- [16] 刘春玲, 许有鹏, 张强. 长江三角洲地区气候变化趋势及突变分析. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2005, 31(1): 109~114.
- [17] 李维亮, 刘洪利, 周秀骥, 等. 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] 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响. 地理学报, 2007, 62(7): 717~727.
- [19] 国家统计局人口和社会科技统计司编. 中国乡、镇、街道人口资料. 北京: 中国统计出版社, 2002. 218~385.
- [20] 张爱英, 任国玉. 山东省城市化对区域平均温度序列的影响. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 754~762.
- [21] 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.
- [22] 白虎志, 任国玉, 张爱英, 等. 城市热岛效应对甘肃省温度序列的影响. 高原气象, 2006, 25(1): 90~94.
- [23] 李卓仑, 王乃昂, 轧靖, 等. 近 40 年兰州城市气候季节性变化与城市发展. 高原气象, 2007, 26(3): 586~592.
- [24] 华丽娟, 马柱国, 曾昭美. 中国东部地区大城市和小城镇极端温度及日较差变化对比分析. 大气科学, 2006, 30(1): 80~92.
- [25] 方锋, 白虎志, 赵红岩, 等. 中国西北地区城市化效应及其在增暖中的贡献率. 高原气象, 2007, 26(3): 579~585.
- [26] 韩素芹, 郭军, 黄岁梁, 等. 天津城市热岛效应演变特征研究. 生态环境, 2007, 16(2): 280~284.
- [27] 陈正洪, 王海军, 任国玉, 等. 湖北省城市热岛强度变化对区域气温序列的影响. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 771~779.
- [28] Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, *et al.* Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. Nature, 1990, 347: 169~172.
- [29] Karl T R, Jones P D. Comments on "Urban bias in area averaged surface air temperature trends" Reply to GM Cohen. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1990, 71: 571~574.
- [30] Ren Guoyu, Zhou Yaqing, Chu Ziyang, *et al.* Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. Journal of Climate, 2008, 21(6): 1333~1348.
- [31] Karl T R, Diaz H F, Kukla G. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record. Journal of Climate, 1988, 1(11): 1099~1123.

Temperature change characteristics and its influence by urbanization in the Yangtze River Delta

CUI Lin-li¹, SHI Jun², YANG Yin-ming¹, LI Gui-cai³, FAN Wen-yi⁴

(1. Shanghai Center for Satellite Remote Sensing and Application, Shanghai 201100, China;

2. Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China; 3. National Satellite Meteorological Center,

Beijing 100081, China; 4. Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: With global climate change and rapid regional urbanization, temperature and environment changed significantly in the Yangtze River Delta. Based on regional meteorological data from basic/reference climatological surface stations and population data, annual and seasonal temperature change characteristics, the difference of temperature change in big cities, middle cities and small towns, and the urbanization warming and its relative contribution to the total amounts of temperature change was analyzed covering the periods from 1959 to 2005 and from 1981 to 2005. The result indicates that in the past 47 years and 25 years, annual mean temperature, annual mean maximum and minimum temperature increased significantly, with the highest warming rate in winter and spring, and the lowest warming rate in summer. For all types of stations, the annual and seasonal mean temperature, mean maximum and minimum temperature generally increased in the two periods of time. The warming rate in big cities was significantly higher than that in middle cities and small towns, and urbanization warming was almost in annual and seasonal temperature in big cities. The warming rate of urbanization and its relative contribution to the total amounts of temperature change was highest in mean minimum temperature, and lowest in mean maximum temperature. From 1959 to 2005, the warming rate in small towns was close to that in middle cities, and the influence of urbanization on the temperature in middle cities was small, but from 1981 to 2005, the warming rate in middle cities was higher than that in small towns, and the warming rate of urbanization for middle cities was significant. In the Yangtze River Delta, the changing trend and warming rate of temperature, the warming rate of urbanization and its relative contribution to the total amounts of temperature change were basically consistent with that in other places. Causes for the differences between our result and those found by other researchers are likely to be related to regional extent, the criteria for defining urban and contrasting stations, the different influence of urbanization on the contrasting stations, station network density, analytical methods, time periods, and etc.

Key words: temperature change; urbanization; warming rate; relative contribution; Yangtze River Delta