

近 44 年南京温度变化的特征及其可能原因的分析

唐国利^{1, 2, 3} 丁一汇¹

1 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 利用 1957~2000 年的气候观测资料, 研究南京的平均温度、平均最高温度、平均最低温度和平均日较差及炎热日和寒冷日的变化趋势和特点, 并分析可能的原因; 以滁县和溧阳为对比城市站, 分析了三种不同类型城市温度变化的异同。结果表明, 近 44 年来南京平均温度显著上升, 其中冬季增暖幅度最大, 但夏季呈变凉趋势。与全国平均温度相比, 线性变化趋势大体相似, 但也存在一定差别。最高温度趋势与平均温度一致, 夏季降温更为明显; 最低温度除夏季外增暖都非常显著, 表明气候变暖在最低温度上表现更加明显; 年和各季日较差均明显减小; 炎热日和寒冷日趋于减少, 其开始和结束时间较以前有明显提前。大气环流系统的变异和调整可能是温度显著升高的直接原因。同样, 长江中下游夏季降水天气增多、云量增加、日照时间减少以及伴随的温度下降可能也与环流系统的调整有关。南京与滁县、溧阳的温度差值分别为减小趋势或趋势变化不明显。三种类型城市增暖幅度的相对大小存在着年代际差异。由于不同类型城市间温度变化差异的复杂特点及其所反映出的城市化影响的复杂性, 在研究温度变化和考虑城市化的影响时, 不仅要考虑大城市, 还应该充分注意中、小城市的发展所带来的影响。

关键词 南京 城市 温度变化 长江

文章编号 1006-9895(2006)01-0056-13

中图分类号 P463

文献标识码 A

The Changes in Temperature and Its Possible Causes in Nanjing in Recent 44 Years

TANG Guo-Li^{1, 2, 3} and DING Yi-Hui¹

1 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Abstract Based on the meteorological data during 1957-2000, the change trends and characteristics of temperature and its possible causes in Nanjing in recent 44 years have been analyzed and studied. By means of the comparison of temperature changes among Nanjing, Chuxian and Liyang, the temperature change of the different cities and their contrasts have been also analyzed and discussed. The results show that the temperature has increased remarkably in Nanjing in recent 44 years, with the most obvious warming occurring in winter, and a cooling trend in summer. Nanjing's linear trend is basically similar to all China's trend in mean temperature, but there is also some difference. The trend in maximum temperature is consistent with that of the mean temperature in Nanjing. It should be noticed particularly that the maximum temperature in summer has a more striking decrease. The fact that the increase in minimum temperature is especially remarkable shows that the effect of climate warming on the minimum

收稿日期 2004-10-29, 2005-02-21 收修定稿

资助项目 国家“十五”科技攻关项目课题“全球与中国气候变化的检测和预测”(2001BA611B-01)和中国气象局气候变化研究基金

作者简介 唐国利, 男, 1960 年出生, 高级工程师, 从事气候变化研究。E-mail: tanggl@cma.gov.cn

temperature is more obvious than others. The annual and seasonal daily range are obviously decreasing, which indicates that Nanjing's climate tend to get milder. The main reason of daily range decreases is that the extent of warming in the minimum temperature is larger than that of the maximum temperature. In summer, however, a larger extent of decrease in maximum temperature is its major cause. The hot and cold days are decreasing, and the dates of the beginning and ending of hot days are obviously earlier in recent 22 years.

The possible causes of the temperature change in Nanjing is closely related to the change of climate background. Then the increase of air temperature there is a response to the global warming and China's climate change. On the one hand, under the global warming, variation of general circulation that can cause China's climate to change is probably a direct cause of the increase of air temperature in Nanjing. In fact, the mean circulation makes intensity of East Asian winter monsoon decline, thus the temperature in winter has an obvious increase. On the other hand, the temperature has a close relation with other weather conditions in summer. Under the influence of general circulation, the stronger north wind anomaly in the lower troposphere in North China leads to the increase of rainfall and cloud fraction, as well as the decrease of sunshine time and temperature along the middle to lower reaches of the Changjiang River in recent 10 or more years. Thus the temperature in summer is on the decrease.

Besides, the temperature differences between Nanjing and Chuxian have largely decreased, and the differences between Nanjing and Liyang have not had obvious change. The relative extents of warming in the different types of cities have some difference from decade to decade. The differences are probably related to the different population growth and economic development speed. According to comparison of the differences of temperature change in the different types of cities, it is not certain that the warming rates in the bigger cities are larger than those in the smaller cities. Because of the complexities of air temperature change in different cities and related urbanization effects, the impacts of large, middle and small cities on temperature change should all be considered when the change in temperature and the effects of urbanization are studied.

Key words Nanjing, city, air temperature change, the Changjiang River

1 引言

据 IPCC 第三次评估报告^[1], 近百年来全球平均地面气温增暖了 0.6°C 。中国近百年的温度变化趋势与北半球大致相似^[2], 其中 1951~1990 年间的平均温度升高了 0.3°C ^[3]。

林学椿等^[4]和陈隆勋等^[5]曾分别研究了 1951~1989 年中国的气候变化, 结果表明: 全国平均温度变暖, 但有明显的区域性, 其中北方大部地区变暖, 长江流域及西南地区变冷。加入新的资料计算 1951~2000 年中国年平均温度变化趋势的全国分布, 发现原来的变暖区范围已经扩大, 而变冷区只剩下西南地区的四川东部、南部和云南的东北部。南京是长江流域著名的所谓三大“火炉”之一, 它的位置处于 20 世纪 90 年代以前变冷区内的长江中下游。在当前全球和中国气候变暖, 特别是 20 世纪 80 年代和 90 年代持续变暖的气候背景下, 南京及其邻近地区的温度变化特征如何? 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。同时, 这种研究对

更大范围气候变化的分析和预测也具有参考意义。

气候变化既包括自然变化过程, 也有人类活动的影响。随着人类活动的不断加剧, 其影响也呈增加的趋势。就温度变化来说, 城市化是其中重要的影响因素之一, 赵宗慈等^[6]曾研究了美国和中国城市化影响, 认为都市化作用使年平均气温与年极端最低气温明显增暖。在另一项研究中, 赵宗慈^[7]将全国城市按人口分为 5 类, 分别研究了各类城市的温度变化, 发现各类城市年平均温度均变暖, 变暖幅度随人口增加而增加, 这同样表明城市化对气候变暖起了一定作用。乔盛西和覃军^[8]曾研究县城城市化对气温的影响, 认为这种影响非常显著。因此, 在研究城市的温度变化时, 不能忽视城市化的影响。

另一方面, 在研究全国范围的温度变化时, 为了去掉城市热岛的影响, 通常采用剔除大城市台站的方法。但对于研究器测时期的温度变化来说, 可能由此产生二个问题, 一是由于历史原因, 在我国现有的气候观测资料集中、具有较长连续资料序列的站点数量较少, 而且大多分布于大城市或特大型

城市,而许多受环境影响较小的县站或乡村站,大部分因建站晚而序列较短;二是近几十年,特别是近二十年来,随着我国经济的高速发展和城市化进程的加快,中、小城市也普遍面临着工业发展、人口增加和城市规模扩大等问题。伴随这种发展而来的城市效应的增强及其对温度变化的影响也应该考虑。换句话说,尽管剔除了大城市站,但所得结果可能仍无法排除城市化的影响。因此,对比分析不同类型城市的气候变化及其异同对于正确认识得到的分析结果也具有重要的实际意义。

鉴于此,在重点分析南京温度变化特征及可能原因的同时,分别选取相邻的滁县和溧阳作为对比城市站,分析了三个不同规模城市间温度变化的异同,并以此为例探讨不同类型城市间温度变化的差异。文中除对 1957~2000 年期间南京的平均气温、平均最高气温、平均最低气温和平均日较差等进行分析以外,还分析了分别表示炎热天气和寒冷天气出现频数的热日数和冷日数的变化特征和趋势。

2 资料和方法

本文使用的气象观测资料为中国气象局气象信息中心气象资料室整理的月、年平均气温、平均最高气温、平均最低气温、平均日较差和逐日最高、最低气温以及降水量、降水日数、日照时数和云量等。据台站沿革资料,南京等三站曾于 1956 年以前分别迁址 2 次或 1 次,这可能导致序列不均一,影响分析结果的准确性,故以 1957 年作为起始年。

滁县(1982 年设滁州市)和溧阳作为对比城市站,它们与南京之间的直线距离大约为 60 km 和

90 km(见表 1)。根据文献[9]的估算,在一定误差控制标准内,就各季节的温度来说,江淮平原的最佳台站间距为 70~95 km,也就是说在这一距离内温度分布相当连续,可以进行比较。采用与文献[7]同样的划分方法,即城市人口数大于 100 万为大城市,50~100 万为次大城市,10~50 万为中等城市,则南京、溧阳和滁县分别属于大、次大和中等城市(按 2000 年人口数)。

以各项月的月资料为基础,形成冬季(12~2 月)、春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)和秋季(9~11 月)资料序列,然后进行距平化处理,得到各季和年距平序列。

在分析温度等要素的变化趋势时,选用线性方程对原序列 y 进行拟合,即

$$\hat{y} = a_0 + a_1 t,$$

其回归系数 a_1 即反映了气候变量的趋势变化,即

$$a_1 = \frac{d\hat{y}}{dt},$$

式中, a_1 可称为气候变量的倾向率或倾向度, $a_1 \times 10$ 即表示气候变量每 10 年的变化。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^[10],即对给定显著性水平 α ,若 $|r| > r_\alpha$,则变化趋势显著。

关于炎热天气和寒冷天气的变化,利用逐日最高、最低气温,按照 $T_{\max} \geq 35^\circ\text{C}$ 为热日和 $T_{\min} \leq 0^\circ\text{C}$ 为冷日的标准^[11],统计了热日数和冷日数并分析了其变化特征。

为了便于比较,分别计算了南京与滁县和溧阳的平均气温、平均最高气温及平均最低气温的差值,并结合温度变化进行了分析。

表 1 南京等站及所在城市基本信息
Table 1 The basic information about meteorological stations and cities in Nanjing, etc.

测站(城市) Stations (cities)	海拔高度 Sea level elevation/m	距南京距离 Space between Nanjing and other cities/ km	人口数(万人)Population (tenthousand people)	城市类型 City types
南京 (32°00'N, 118°48'E) Nanjing (32°00'N, 118°48'E)	8.9	/	290	大城市 Large city
滁县 (32°18'N, 118°18'E) Chuxian (32°18'N, 118°18'E)	27.5	60	49	中等城市 Middle city
溧阳 (31°26'N, 119°29'E) Liyang (31°26'N, 119°29'E)	7.2	90	79	次大城市 Hypo-large city

3 年和各季节温度变化

3.1 平均温度变化趋势

表 2 和图 1 分别是南京等三站各项温度及冷、热日数线性变化趋势和南京年与各季平均温度距平随时间演变曲线。这里为节省篇幅省略了滁县和溧阳的演变曲线(下同)。可以看到，近 44 年来，南京的年平均温度显著增暖约 0.66℃，其中冬季的增

表 2 1957~2000 年南京等三站各项温度及冷、热日数变化趋势

Table 2 The linear trend of air temperature, hot and cold days in Nanjing, etc. during 1957 – 2000

季节 Seasons	平均温度趋势 The trend of mean temperature/℃ · (10 a) ⁻¹			最高温度趋势 The trend of maximum temperature/℃ · (10 a) ⁻¹			最低温度趋势 The trend of minimum temperature/℃ · (10 a) ⁻¹			日较差趋势 The trend of mean daily range/℃ · (10 a) ⁻¹			热日数趋势 The trend of hot days/d · (10 a) ⁻¹			冷日数趋势 The trend of cold days/d · (10 a) ⁻¹		
	南京 Nanjing	滁县 Chuxian	溧阳 Liyang	南京 Nanjing	滁县 Chuxian	溧阳 Liyang	南京 Nanjing	滁县 Chuxian	溧阳 Liyang	南京 Nanjing	滁县 Chuxian	溧阳 Liyang	南京 Nanjing	滁县 Chuxian	溧阳 Liyang	南京 Nanjing	滁县 Chuxian	溧阳 Liyang
冬季 Winter	<u>0.28</u>	<u>0.28</u>	<u>0.28</u>	0.11	0.10	0.12	<u>0.38</u>	<u>0.48</u>	<u>0.37</u>	<u>-0.26</u>	<u>-0.38</u>	<u>-0.25</u>	/	/	/	/	/	/
春季 Spring	<u>0.25</u>	<u>0.25</u>	<u>0.21</u>	0.16	0.19	0.14	<u>0.22</u>	<u>0.30</u>	<u>0.24</u>	-0.06	-0.12	-0.10	/	/	/	/	/	/
夏季 Summer	-0.11	-0.13	-0.15	<u>-0.28</u>	<u>-0.28</u>	-0.15	0.02	0.07	-0.03	<u>-0.29</u>	<u>-0.35</u>	<u>-0.12</u>	/	/	/	/	/	/
秋季 Autumn	<u>0.18</u>	<u>0.23</u>	<u>0.17</u>	0.10	0.13	0.12	<u>0.22</u>	<u>0.37</u>	0.16	-0.13	-0.23	-0.03	/	/	/	/	/	/
年平均 Annual mean	<u>0.15</u>	<u>0.16</u>	<u>0.14</u>	0.04	0.05	0.05	<u>0.20</u>	<u>0.30</u>	<u>0.18</u>	<u>-0.15</u>	<u>-0.28</u>	<u>-0.11</u>	-1.43	-1.68	-0.51	<u>-3.63</u>	<u>-5.33</u>	<u>-3.61</u>

注：下划线表示显著性水平在 0.05 以上，下同
Note: Underline denotes significance at 95% (or more) level, thereafter signal is the same

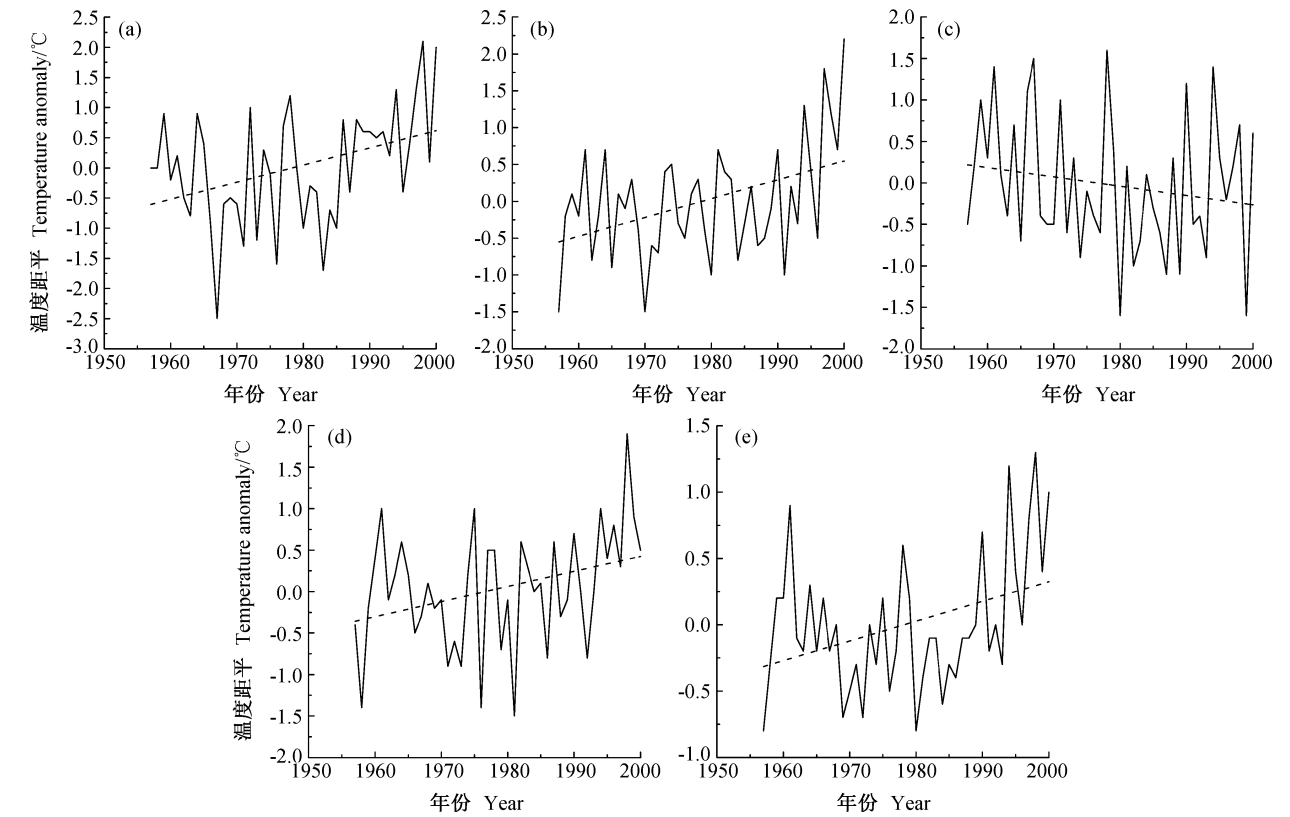


图 1 1957~2000 年南京平均温度距平随时间演变曲线及趋势：(a)冬季；(b)春季；(c)夏季；(d)秋季；(e)年平均
Fig. 1 Average air temperature anomalies and their trends in Nanjing during 1957 – 2000 for (a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn and (e) annual mean

暖幅度最大,春、秋两季次之,它们的增暖幅度分别为 1.25℃、1.08℃和 0.80℃;与其他各季相反,南京的夏季温度呈下降趋势,幅度为 0.56℃。滁县和溧阳的年及各季变化趋势均与南京一致,只是变化速率上有微小差异。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。与全国平均温度^[12, 13]比较,南京年平均温度线性变化趋势大体相似,但也有一定差别,如南京 80 年代的气温比多年平均值偏低。

3.2 最高温度变化趋势

最高温度是反映某地炎热状况最直接的指标。图 2 是南京平均最高温度距平随时间演变曲线。南京及另外两个城市的年和各季最高温度变化趋势与平均温度一致,其变化速率大都小于平均温度。但特别值得注意的是,南京夏季最高温度不仅同平均温度一样呈下降趋势,而且其速率还大于平均温度,显示出夏季最高温度的降温幅度大于平均温度。同南京一样,滁县夏季的最高温度下降也非常显著,两者分别达到 1.24℃和 1.22℃,并且都具有统计意义。

表 3 给出了南京夏季温度每 10 年的平均值,从中可以看到,60 年代南京夏季的平均最高温度是 31.68℃,而 80 年代和 90 年代分别为 30.64℃和 30.78℃,比 60 年代下降了 1.04~0.90℃。可见,虽然近 44 年来南京年平均温度呈上升趋势,但夏季平均温度和最高温度却表现出下降趋势,两者之间的这种不一致性是南京温度变化的一个重要特点,表明在气候变暖的同时,南京的夏季却比以前变凉。

表 3 南京夏季温度每 10 年平均值(单位:℃)

Table 3 Average summer temperature for each decade in Nanjing (units: ℃)

温度 Temperature	1961 - 1970	1971 - 1980	1981 - 1990	1991 - 2000
最高温度 Maxi- mum temperature	31.68	30.93	30.64	30.78
最低温度 Minimum temperature	23.07	23.15	22.97	23.31
平均温度 Average temperature	26.93	26.61	26.40	26.66

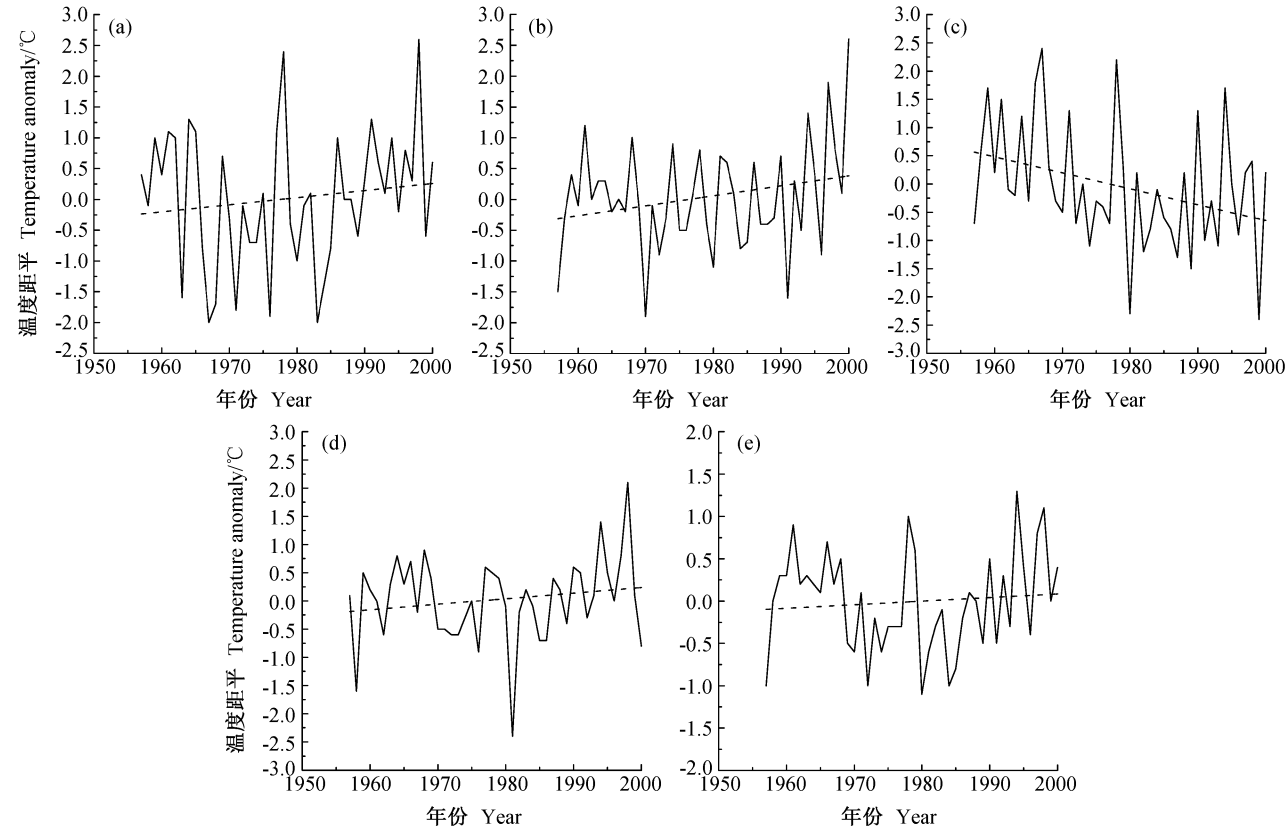


图 2 1957~2000 年南京平均最高温度距平随时间演变曲线及趋势:(a)冬季;(b)春季;(c)夏季;(d)秋季;(e)年平均
Fig. 2 Average maximum temperature anomalies and their trends in Nanjing during 1957 - 2000 for (a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn and (e) annual mean

3.3 最低温度变化趋势

图 3 是南京平均最低温度距平随时间演变曲线。可以看到，南京年的平均最低温度增暖非常显著，幅度达到 0.86°C 。同平均温度一样，最大的增暖发生于冬季，幅度为 1.68°C ；春季和秋季增暖幅度相近，分别为 0.95°C 和 0.98°C ；夏季增暖较缓，幅度为 0.07°C 。另外两个城市滁县和溧阳的年平均最低温度增暖趋势也非常显著。三者的显著性水平均在 0.02 以上，各季最低温度也以上升趋势为主，仅溧阳夏季微弱下降 0.13°C 。

通过比较可以看出，上述三城市的最低温度上升幅度远大于最高温度，这种线性变化趋势的不对称性与文献[14]指出的全国变化趋势一致，这也说明增暖在最低温度上表现得更加突出。

3.4 平均日较差变化趋势

各城市年和四季日较差均表现出减小趋势(以南京为例，见图 4)，其中南京的年平均日较差减小 0.68°C ，滁县减小 1.21°C ，溧阳减小 0.48°C 。三者均通过了统计上的显著性检验，其减小幅度的顺序

与最低气温升高的幅度顺序一致。这也从一个侧面反映出最低气温升高对日较差变化的贡献。再从各季节来看，南京夏季减小最多达 1.30°C ，冬季次之为 1.16°C ，秋季为 0.55°C ，春季最少为 0.24°C ；滁县和溧阳的情况与南京并不一致，减小最多的是冬季，而夏季次之，春、秋二季互为先后。上述分析表明，随着气候增暖，南京等城市的温度趋向于温和，特别是在温度条件比较极端的冬、夏二季，这种特点更为明显。对比最高温度和最低温度变化可发现，日较差变小主要是以最低温度变暖幅度大于最高温度变暖幅度为特征，但夏季则主要起因于最高温度的显著下降，这种特点与文献[14]中 35°N 以南的情况不一致。

3.5 热日频数和冷日频数变化趋势

热日频数和冷日频数的变化分别反映出炎热天气和寒冷天气的变化特点及趋势。从表 2 和图 5 可见，南京等三城市的年热日和冷日出现频数均呈减少趋势(滁县和溧阳的图略)，其中冷日频数的减少趋势非常显著，置信水平在 0.01 以上。这种寒冷

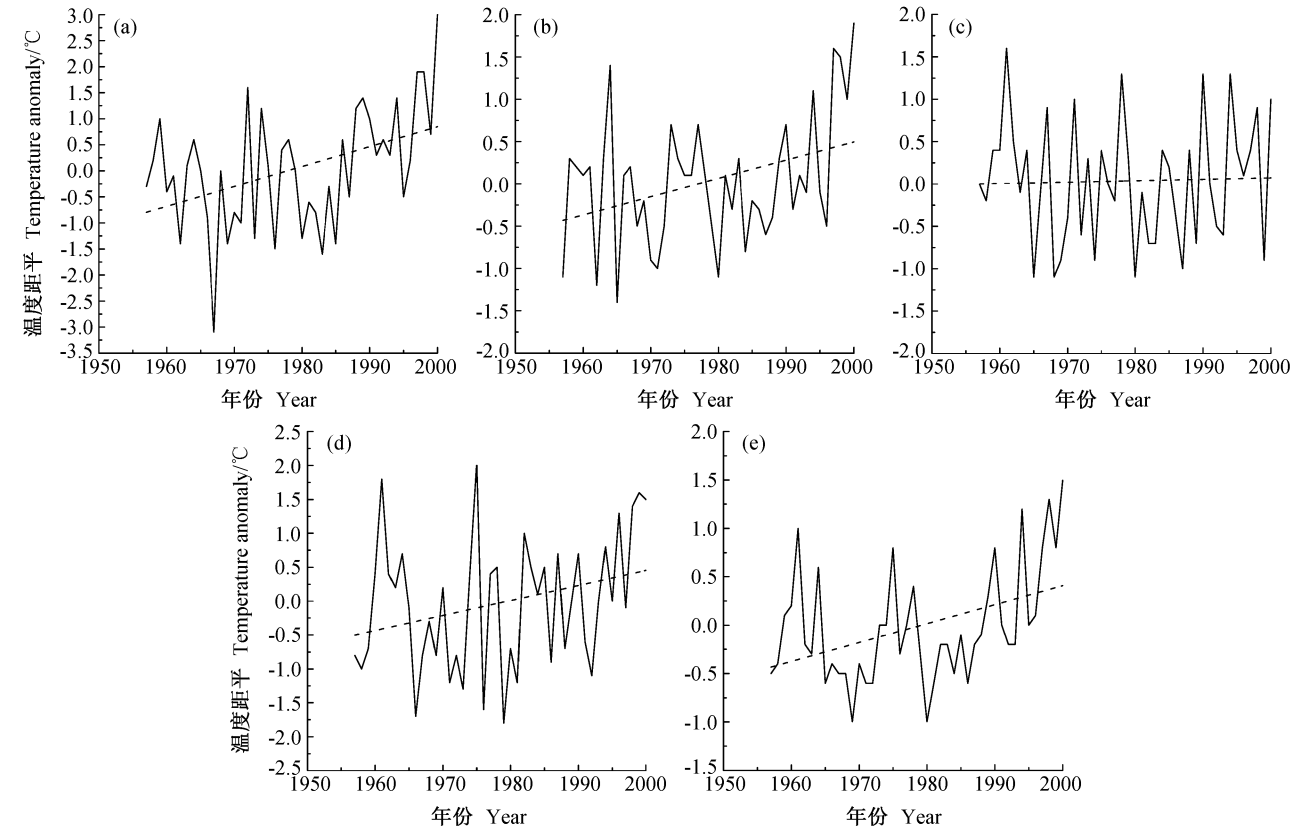


图 3 1957~2000 年南京平均最低温度距平随时间演变曲线及趋势：(a)冬季；(b)春季；(c)夏季；(d)秋季；(e)年平均
Fig. 3 Average minimum air temperature anomalies and their trends in Nanjing during 1957–2000 for (a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn and (e) annual mean

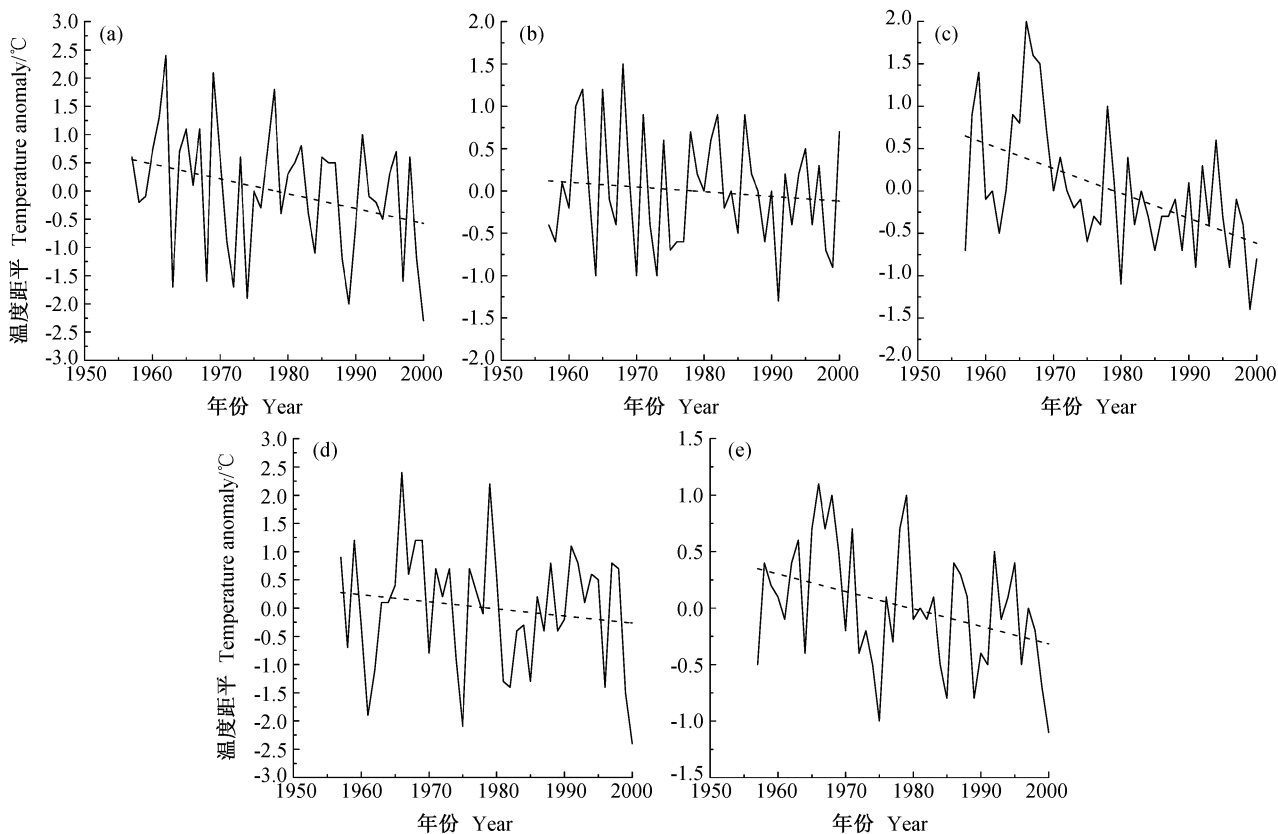


图 4 1957~2000 年南京平均日较差距平随时间演变曲线及趋势：(a)冬季；(b)春季；(c)夏季；(d)秋季；(e)年平均

Fig. 4 Average daily range anomalies and their trends in Nanjing during 1957 – 2000 for (a) winter, (b) spring, (c) summer, (d) autumn and (e) annual mean

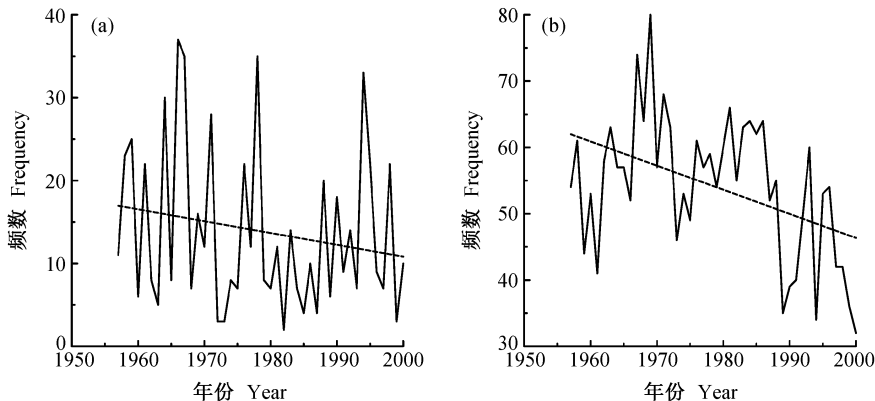


图 5 1957~2000 年南京热日频数和冷日频数随时间演变曲线及趋势：(a) 热日频数；(b)冷日频数

Fig. 5 Hot days, cold days and their trends during 1957 – 2000 for (a) the frequency of hot days and (b) the frequency of cold days

天气的减少趋势与最低温度的显著上升是一致的。虽然热日频数的下降趋势与年平均最高温度的趋势不一致，但由于炎热日主要集中于夏季，其减少趋势与夏季平均最高温度的下降趋势是一致的。

以 1978 和 1979 年为界将时间划分为前后二段。从表 4 中可以看到，南京 1979~2000 年与前

22 年相比，平均年热日数减少了 5.23 天，平均冷日数减少了 7.22 天；而炎热天气的开始和结束时间在后 22 年比前 22 年明显提前，平均提前了 13 天。滁县和溧阳也有类似现象。其原因还有待进一步的分析。南京等三城市的寒冷日和炎热日均趋于减少，这也从另一个角度反映出温度趋向于温和。

表 4 南京热日数、冷日数和热日开始与结束时间
Table 4 Hot days, cold days and the date of beginning and end of hot days in Nanjing

时期 Period	平均热日数 Average annual hot days	平均冷日数 Average annual cold days	热日开始月(年数) Origin months of hot days (years)			热日结束月(年数) End months of hot days (years)					平均热日起止日 Average origin and end dates of hot days	
											开始 Origin	结束 End
			5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug	9 月 Sep		
1957-1978	16.50	57.77	1	2	17	0	0	2	15	5	7 月 6 日 6 Jul	8 月 21 日 21 Aug
1979-2000	11.27	50.55	4	9	9	1	0	4	15	2	6 月 23 日 23 Jun	8 月 8 日 8 Aug
1957-2000	13.89	54.16	5	13	26	1	0	6	30	7	6 月 29 日 29 Jun	8 月 14 日 14 Aug

4 南京与滁县和溧阳的温度差值分析

4.1 平均温度差值

从南京与滁县和溧阳间的温度差值演变曲线及倾向率数值上(差值曲线和倾向率表略)可以看到,南京与滁县的年平均温度差值呈减小趋势,与溧阳间的差值变化趋势不明显。原因是滁县的增暖速度高于南京,而溧阳的增暖速度与南京差别较小。可见,不同类型城市间的温度差值不仅没有加大,而且还有减小的现象。

4.2 平均最高温度差值

就年平均来看,南京与滁县、溧阳二城市间差值都呈弱的变小趋势,原因是南京最高温度增暖速度略慢于滁县和溧阳,不过三者的增暖率都较小。从各季来看,每一城市各有三个季节的差值是减小趋势,但数值很小,只有南京与溧阳夏季的差值显著变小,其原因是溧阳夏季最高温度的下降速度慢于南京。另外,南京与滁县夏季的差值变小趋势非常弱,说明滁县夏季最高温度的下降也较快。这反映了南京夏季最高温度下降不完全是局地现象。

4.3 平均最低温度差值

南京与滁县之间的差值,年和各季均为减小趋势,其中除夏季信度水平为 0.10 外,其余均高于 0.02,说明这种趋势非常显著。其原因是滁县的最低温度增暖速率明显高于南京。南京与溧阳间的差值变化趋势不明显,其中除春季略减小外,年和其他各季为略上升,原因是溧阳最低温度增暖速率略低于南京。

4.4 年代际温度差值分析

将南京等城市温度按每 10 年平均,然后按年代求出平均温度的差值(见表 5)。可以看到,20 世纪 70 年代比 60 年代降温,80 年代滁县和溧阳都与 70 年代持平,只有南京增温 0.04℃,90 年代滁县和溧阳分别增温 0.65℃和 0.69℃,增温幅度高于南京 0.05℃和 0.09℃;从站间温度差来看,在 70 年代,南京与另二个城市的温差比 60 年代减小。80 年代,由于南京温度微升,而滁县和溧阳未变,所以南京与滁县温差增大,与溧阳温差减小。到 90 年代,滁县和溧阳的增温快于南京,因此南京与滁县和溧阳的温差变化与 80 年代相反。上述事实说

表 5 南京等城市年温度每 10 年平均差值 (ΔT) 及站间差值(单位:℃)

Table 5 The differences of average annual temperature for each decade (ΔT) and between stations in Nanjing, etc. (units: ℃)

城市 Cities	1961~1970 站间差值 Temperature differences between stations		1971~1980 站间差值 Temperature differences between stations		1981~1990 站间差值 Temperature differences between stations		1991~2000 站间差值 Temperature differences between stations	
	ΔT ₇₀₋₆₀		ΔT ₈₀₋₇₀		ΔT ₉₀₋₈₀			
南京 Nanjing	/	-0.13	/	0.04	/	0.60	/	
滁县 Chuxian	0.07	-0.09	0.03	0.00	0.07	0.65	0.02	
溧阳 Liyang	-0.11	-0.16	-0.08	0.00	-0.04	0.69	-0.13	

明,三城市间温度差异的变化存在着明显的年代际差异,而站间温差的变化取决于对比城市间增(降)温幅度的大小。这种不同时段增温幅度的差异可能与不同城市在不同发展阶段的城市热岛强度的变化有一定关联。比如 90 年代,滁县和溧阳的增温速度就明显快于南京。不过,城市热岛的气候效应及其变化是一个非常复杂的问题,它的影响尚需进一步的研究来证实。

5 温度变化可能原因的分析

5.1 南京温度变化的气候背景

南京温度的变化与气候背景的变化密不可分。近 44 年来,南京年平均温度和最低、最高温度均呈明显的上升趋势,但夏季温度,尤其是最高温度和平均温度都表现为明显下降趋势。也就是说,所谓的“火炉”变得较以前凉爽。与此同时,年平均日较差和季平均日较差也呈一致的下降趋势。温度的这种变化特征与全球和中国气候变化的基本特征是一致的,因而,南京温度的上升可以看作是对全球和中国气候变暖的一种响应。IPCC 第三次评估报告^[1]认为,近百年来,在 20 世纪中期以前的气候变暖是由自然变化和人类活动引起的,而近 50 年来的全球气候变暖主要是由人类活动引起的。其中,CO₂等温室气体的增加所导致的温室效应的加强是主要原因。当然,因温度上升导致的大气中水汽含量的增加也减少了向外的长波辐射。这可以在很大程度上解释温度特别是最低温度的显著增暖。

5.2 南京温度变化的原因分析

大气环流是形成和制约区域或局地气候的重要因素。在全球变暖的气候背景下,大气环流因响应而出现的变异与调整是导致区域气候变化的一个十分重要的原因。我国位于东亚地区,西风带环流和副热带高压等环流系统与我国的气候变化有十分密切的关系。例如,从全年平均的欧亚区域西风环流指数和西太平洋副热带高压特征量来看,自 20 世纪 80 年代中后期以来,500 hPa 中纬度纬向环流偏强,经向环流偏弱,而副热带高压自 70 年代末 80 年代初即进入持续偏强期。这种环流特征使南下冷空气偏少、偏弱,从而导致我国大部分地区气温偏高。这同近十几年来实际影响我国的冷空气次数的明显减少是一致的。由于我国季风气候的特点,以及南京近 44 年的温度变化表现出的非常显著的季

节特征,即冬季增暖速率相当高,但夏季温度呈下降趋势,故重点分析冬、夏两季温度变化的原因。

5.2.1 南京冬季温度显著上升的原因

南京冬季气温的显著上升与全国大部分地区的温度上升是一致的。这种上升与大气环流的变异和调整有直接的关系。同年平均一样,冬季的欧亚西风环流指数自 20 世纪 80 年代中后期以来以正距平居多,纬向环流趋向于偏强,经向环流偏弱;东亚大槽偏东、偏弱;西太平洋副热带高压面积和强度自 20 世纪 70 年代后期出现弱到强的转折之后,以偏强为主,副热带高压西伸脊点位置偏西、脊线位置偏北。另据分析^[15],这种环流形势可能与赤道附近西一中太平洋海温冷暖异常和 El Niño 事件有关,在 20 世纪 90 年代的前 5 年里就出现了 3 次 El Niño 事件,与之对应的是冷空气不易南下、东亚冬季风偏弱。上述这些有利于冬季气温偏高的因素在 20 世纪 90 年代表现得非常明显。因此,南京冬季气温同全国大部分地区一样,出现了比较高的增温速率。

5.2.2 南京夏季温度下降的原因

南京夏季温度的明显下降是一个值得注意的问题,引起这种下降的原因也非常值得探讨。一般来说,影响夏季气温的主要因素总是同大气环流背景及其所产生的天气气候条件密切相关。就天气气候条件来说,北方冷气团的活动、雨水天气的增多以及日照的减少等通常都伴随着温度的下降。关于这一点,根据南京各季节温度与其他多种气候要素的相关分析可知,夏季的相关最为显著,而且相关系数大多相当高。因此,可以通过对夏季天气气候的变化及其原因进行综合分析来探讨温度变化的原因。首先对夏季温度与降水日数、降水量和日照时数等的相关关系进行一些分析。

表 6 中的数据反映出南京的夏季温度与降水日数($R \geq 0.1$ mm 日数)和降水量存在明显的反相关关系,而与日照时数呈显著的正相关关系,其中最高温度与各要素的相关关系最为密切,最低温度相关程度略低,但也具有统计意义。影响日照条件的因素主要包括云量、大气中的水汽和气溶胶等。观测事实表明,降水日数和降水量与云量的关系密切。尽管文献^[14]指出中国云观测资料因采用目测估计取值而存在某些问题,但这种关联还是非常明显。计算表明,总云量、降水日数和降水量与日照

表 6 南京夏季温度与降水日数等的相关关系
Table 6 The correlation coefficients between summer temperature and precipitation days, etc. in Nanjing

	降水日数 Precipitation days	降水量 Precipitation	日照时数 Sunshine duration
温度 Temperature			
最高温度 Maximum temperature	<u>-0.83</u>	<u>-0.67</u>	<u>0.84</u>
最低温度 Minimum temperature	<u>-0.57</u>	<u>-0.44</u>	<u>0.43</u>
平均温度 Average temperature	<u>-0.78</u>	<u>-0.61</u>	<u>0.73</u>

时数之间存在明显的反相关关系，反映出白天的阴雨天气对日照时间的影响。即当白天的阴雨天气增多时，日照时间减少，从而影响温度，特别是最高温度。

图 6 给出了南京夏季降水和日照等气候要素或天气日数的变化曲线。很明显，近 44 年来南京夏季的降水日数、降水量均呈上升趋势，分别增加了 3 d 和 133 mm，而日照时数显著减少了 191 h。这些事实说明，南京夏季温度的下降趋势伴随着雨水天气的增多和日照的减少。南京的这种变化并不是一种局地现象。曾有研究指出，长江流域近几十年来的夏季降水呈增加趋势，分别绘制 1957~2000 年全国夏季温度、降水日数、降水量、总云量和日照时数的变化趋势分布图(图略)发现，长江流域大部分地区的降水日数、降水量呈显著的增加趋势，总云量为弱的增加趋势，日照时数呈显著下降趋势，长江中下游地区是趋势变化的主要中心。上述区域范围与长江流域夏季的温度下降区基本一致。20 世纪 90 年代长江流域异常多雨。熊安元^[16]利用小波变换方法进行分析发现，冬季赤道东太平洋海温、夏季西太平洋副高和南海夏季风等气候因子的年代际变化和长期趋势变化在 20 世纪 90 年代均表现出异常强的有利于长江中游夏季降水偏多的振幅。根据相关分析的结果^[17]，南方涛动的强弱和亚洲极涡面积的大小与长江中下游的降水和气温有比较好的统计关系，而事实上，南方涛动在 20 世纪 90 年代异常偏弱意味着江淮流域多雨的可能性偏大；同期的亚洲极涡面积异常偏小，也同样对应

的是长江中下游地区降水偏多、气温偏低。龚道溢等^[18]曾对 90 年代长江中下游地区多雨的机制进行分析，并指出：20 世纪 90 年代是该地区近百年来降水最多的 10 年，形成该区域夏季降水的主要大气环流形式是在江南有偏强的向北经向风及水汽输送异常，在华北及偏北地区有向南的经向风异常，冷暖气流在长江中下游地区的辐合造成降水的异常

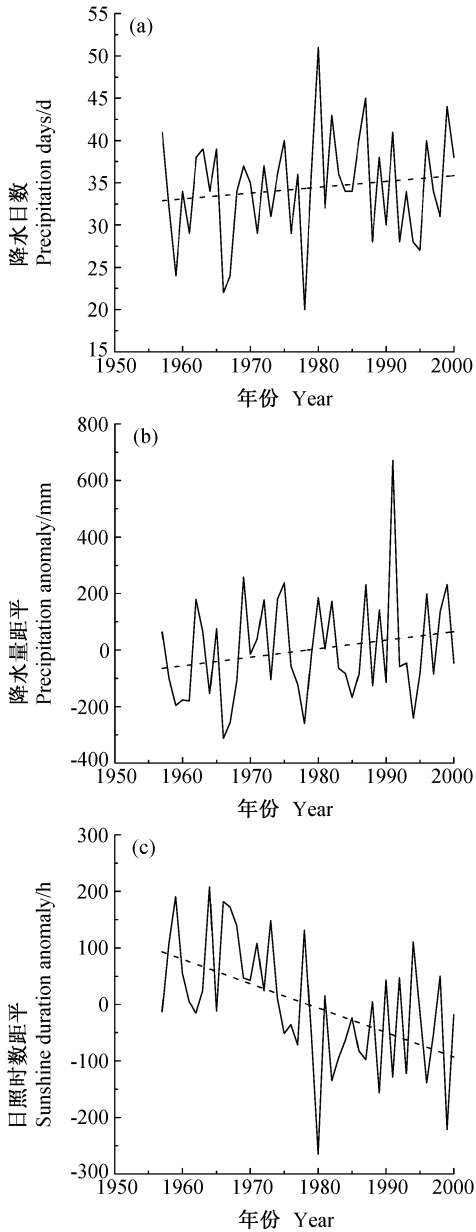


图 6 1957~2000 年南京夏季降水日数等随时间演变曲线及趋势：(a)降水日数；(b)降水量距平；(c)日照时数距平
Fig. 6 Summer precipitation days (a), precipitation anomaly (b) and sunshine duration anomaly (c), and their trends in Nanjing during 1957 - 2000

偏多。而 90 年代北方地区对流层低层向南的经向风偏强可能是造成长江中下游地区降水偏多的主要原因。另外,模式模拟及历史气候变化的事实都说明在气候偏暖的时候,长江中下游地区容易出现过量降水。在南京夏季温度总的下降趋势中,1980 年的低点之后曾出现阶段性的回升趋势,但由于上述原因,这种回升并没有改变温度的总体变化趋势。总之,在全球变暖的背景下,因大气环流系统的影响,我国北方地区对流层低层偏强的北风异常造成长江中下游地区的雨水增多、云量增加、日照时间减少,并同时伴随着气温偏低,这可能是使南京夏季温度维持下降趋势的主要原因。其中,白天的最高温度比夜间的最低温度更多地受到日照时间减少的影响,而夜间最低温度上升不明显还可能与冷气团的活动有一定关系。

5.3 关于城市化可能影响的一些讨论

由于气候变化是气候系统内部和外部众多因子相互影响、相互作用的复杂过程,人类活动在其中的影响程度还难以确定。就城市化的影响来说,城市热岛效应是一个重要方面,它具有明显的日变化和季节性。一般认为^[19]城市热岛强度夜晚强、白天弱;在我国副热带和温带季风区,冬季和秋季最强,夏季和晚春最弱。南京等城市的平均温度冬季增暖幅度最大及最低温度增暖非常显著等特点与城市热岛的作用在符号上恰好一致。因此,随城市发展而增强了的城市热岛效应也对城市气候的变暖起了一定作用,但其作用有多大还难以定量估计。

三个城市中,属于中等城市的滁县的增温幅度高于南京和溧阳,在 20 世纪 90 年代,中等城市滁县和次大城市溧阳的增温幅度都高于南京,这有可能是气候本身的自然变化,但也可能与城市所处的

发展阶段、经济类型和发展速度以及人口的相对集中度等许多因素有关。表 7 列出了南京等城市的人口增长和能够反映城市发展速度的固定资产投资额的增长情况。可见近十几年来,三个城市的人口均在稳定增长。到 2000 年,南京、滁县和溧阳的人口比 1986 年分别增加了 26.6%、32.4%和 9.7%。其中,滁县的增长速度最快。这与各城市的增温速率有一定的对应关系。如果从经济发展情况来看,1991~2000 年的 10 年间,三城市的固定资产投资额均大幅度地增长,反映出经济呈高速发展。南京、滁县和溧阳在 2000 年的固定资产投资额比 1991 年时分别增加了 7.3 倍、11.2 倍和 14.7 倍。这组数字充分反映了三城市在 90 年代的经济增长速度。值得注意的是,溧阳和滁县的增幅均大于南京,其中,溧阳的增幅最大。这与表 5 反映出的 90 年代的增温差异可能有某种联系。当然,溧阳和滁县在 1991 年时的基数小,容易出现高增幅。但是,这种高增幅却能够反映当地经济活动的增加速度。这种投资的高速增长,往往都伴随着城市本身的快速扩张。这很有可能使城市热岛效应快速增强,从而影响到温度的变化速率。可以设想在各城市发展的不同阶段,与热岛效应相关的各因素的变化有可能导致热岛强度变化的差异,而各城市实际温度变化上的一些差异有可能在一定程度上反映了这一点。因此,城市热岛强度的增加速度及对温度变化的影响程度并不能完全由城市的规模决定。例如,滁县城市规模小,但其增温快,有可能反映了人口增长、经济发展和城市扩展速度等诸多复杂因素的共同影响。因此,在研究温度变化和考虑城市化的影响时,还应该充分注意中、小城市的发展,特别是近一、二十年来的快速发展所产生的影响。

表 7 南京等城市人口和固定资产投资增长情况
Table 7 The growth of population and fixed assets investment in Nanjing, Chuxian and Liyang

城市 Cities	人口数(万人) Population (ten thousand people)					增长率 Growth rate/%	固定资产投资额(亿元) Fixed assets investment(a hundred million yuan)					增长率 Growth rate/%
	1986	1991	1994	1997	2000		1991	1994	1997	2000		
南京 Nanjing	229	252	262	273	290	26.6	49.7	143.7	351.7	412.2	729.4	
滁县 Chuxian	37	41	44	46	49	32.4	4.0	12.1	34.8	48.7	1117.5	
溧阳 Liyang	72	76	77	77	79	9.7	1.3	7.9	20.2	20.4	1469.2	

注:表中数据来源于文献[20~25]
Note: Data are from references [20 - 25]

6 结论

(1) 近 44 年来, 南京的年平均温度显著增暖, 其中冬季增暖幅度最大, 但夏季与之相反呈变凉趋势。温度的年代际变化明显, 其中 20 世纪 70 年代最冷, 80 年代开始增温, 90 年代最暖。与全国平均温度相比, 南京温度线性变化趋势大体相似, 但也有一定差别。南京的平均最高温度, 年和各季节变化趋势均与平均温度一致, 但特别值得注意的是夏季最高温度的下降幅度更大; 平均最低温度, 年和各季节除夏季增暖较缓外大都增暖非常显著, 南京等三城市的最低温度增暖幅度均远高于最高温度, 表明气候变暖在最低温度上表现更加明显。

(2) 南京等三城市的日较差无论年和各季节均呈减小趋势。其特点主要是最低温度变暖幅度大于最高温度变暖幅度, 但夏季则主要由最高温度下降幅度大所引起。日较差变小表明温度趋向于温和; 三城市的年热日数和冷日数都趋于减少, 其中冷日数的减少趋势更为显著, 这种减少分别与最低温度的显著上升和夏季最高温度的下降趋势相一致。近 22 年来, 炎热日的开始和结束时间均比以前有明显提前, 但其原因还需进一步分析。

(3) 南京温度的显著上升与气候背景的变化密切相关, 可以看作是对全球和中国气候变暖的一种响应。在气候变暖的背景下, 影响我国大气环流系统的变异与调整是导致温度显著上升的直接原因。这种平均环流形势造成东亚冬季风的明显减弱, 从而使冬季温度明显上升。由于夏季温度与天气气候条件密切相关, 受大气环流系统的影响, 我国北方地区对流层低层偏强的北风异常造成了长江中下游地区的降水天气增多、云量增加、日照时间减少以及气温偏低, 因而夏季温度呈下降趋势。

(4) 比较南京、滁县和溧阳三个城市, 滁县的年平均温度和最低温度的增暖速度最快, 而滁县和溧阳的年平均最高温度增暖速度均快于南京。三城市间的平均温度差值分别为减小趋势或趋势变化不明显。各类型城市增暖幅度的相对大小存在着年代际差异。这些差异可能与各城市之间人口增长和经济发展速度的差异有某种联系。通过比较发现, 三种类型城市间温度变化的差异比较复杂。规模相对较大城市的增温速率不一定大于相对较小的城市, 这说明了城市大小对温度变化影响的复杂性和不确

定性。

需要指出的是, 城市温度变化受测站地理位置、测站周围环境及其变化和城市发展等诸多因素的影响。本工作涉及城市化影响的分析主要是从不同类型城市温度变化差异的角度进行对比分析, 目的是探讨城市化对温度变化研究可能带来的影响和应该注意的问题。对城市热岛问题的进一步研究还需非常好的参考站来进行对比分析。

致谢 张小群、宋文玲协助整理及提供部分资料, 在此深表谢意。

参考文献 (References)

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. *Climate Change* 2001; *The Scientific Basic*. IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001. 881pp
- [2] 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 中国近百年温度序列. *大气科学*, 1995, **19**(5): 525~534
Lin Xuechun, Yu Shuqiu, Tang Guoli. Series of average air temperature over China for the last 100-year period. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1995, **19**(5): 525~534
- [3] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化. *气象*, 1994, **20** (12): 19~26
Ding Yihui, Dai Xiaosu. Temperature variation in China during the last 100 years. *Meteorological Monthly*, 1994, **20** (12): 19~26
- [4] 林学椿, 于淑秋. 近 40 年我国气候趋势. *气象*, 1990, **16** (10): 16~21
Lin Xuechun, Yu Suqiu. Climatic trend in China for the last 40 years. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1990, **16** (10): 16~21
- [5] 陈隆勋, 邵永宁, 张清芬, 等. 近四十年我国气候变化的初步分析. *应用气象学报*, 1991, **12**(2): 164~173
Chen Longxun, Shao Yongning, Zhang Qingfen, et al. Preliminary analysis of climate change during the last 39 years in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1991, **12**(2): 164~173
- [6] 赵宗慈, 徐国昌, 王琨玲. 都市化对气候变化的影响. *气象科技*, 1990, **1**: 71~76
Zhao Zongci, Xu Guochang, Wang Kunling. The effects of the urbanization on climate change. *Meteorological Science and Technology*, 1990, **1**: 71~76
- [7] 赵宗慈. 近 39 年中国的气候变化与城市化影响. *气象*, 1991, **4**: 14~17
Zhao Zongci. The changes of temperature and the effects of the urbanization in China in the last 39 years. *Meteorological Monthly*, 1991, **4**: 14~17
- [8] 乔盛西, 覃军. 县城城市化对气温影响的诊断分析. *气象*,

- 1990, **16**(11): 17~20
- Qiao Shengxi, Qin Jun. The diagnoses of the effect from the urbanization of a county town on temperature. *Meteorological Monthly*, 1990, **16**(11): 17~20
- [9] 杨贤为, 何素兰, 崔伟强, 等. 气象台站网合理分布概论. 北京: 气象出版社, 1989. 107~112
- Yang Xianwei, He Sulan, Cui Weiqiang, et al. *The Outline on Optimum Spacing of Meteorological Station Networks* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1989. 107~112
- [10] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 43~47
- Wei Fengying. *Modern Statistics and Prediction Technique on Climate* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 43~47
- [11] 张家诚. 中国气候总论. 北京: 气象出版社, 1991. 115~118
- Zhang Jiacheng. *Climate of China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 115~118
- [12] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 近百年中国年气温序列的建立. 应用气象学报, 1998, **9**(4): 392~401
- Wang Saowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi, et al. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1998, **9**(4): 392~401
- [13] 林学椿, 唐国利. 中国近百年气温变化趋势. 气候通讯, 2000, **2**: 29~33
- Lin Xuechun, Tang Guoli. The air temperature trend of variation in China in the recent 100 years. *Climate Newsletter* (in Chinese), National Climate Center, 2000, **2**: 29~33
- [14] 翟盘茂, 任福民. 中国近四十年最高最低温度变化. 气象学报, 1997, **55**(4): 418~429
- Zhai Panmao, Ren Fumin. On changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55**(4): 418~429
- [15] 李清泉, 丁一汇. 1991~1995 年 El Niño 事件的特征及其对中国天气气候异常的影响. 气候与环境研究, 1997, **2**(2): 163~177
- Li Qingquan, Ding Yihui. The basic feature of the El Niño events during 1991~1995 and their anomalous influences on the weather and climate in China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1997, **2**(2): 163~177
- [16] 熊安元. 90 年代长江中游异常多雨的气候变化背景分析. 应用气象学报, 2001, **12**(1): 113~117
- Xiong Anyuan. Analysis on background of climatic variation for extremely rainy over the middle reaches of Changjiang River in the 1990s. *Quarterly Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2001, **12**(1): 113~117
- [17] 赵振国. 中国夏季旱涝及环境场. 北京: 气象出版社, 1999. 297pp
- Zhao Zhenguo. *Summer Floods and Drought in China and Environmental Background* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 297pp
- [18] 龚道溢, 王绍武, 朱锦红. 1990 年代长江中下游地区多雨的机制分析. 地理学报, 2000, **55**(5): 567~575
- Gong Daoyi, Wang Shaowu, Zhu Jinhong. Surplus summer rainfall along the middle to lower reaches of Changjiang River in the 1990s. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2000, **55**(5): 567~575
- [19] 周淑贞, 束炯. 城市气候学. 北京: 气象出版社, 1994. 263~271
- Zhou Shuzhen, Shu Jiong. *Urban Climatology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1994. 263~271
- [20] 南京年鉴编纂委员会编. 南京年鉴. 南京: 江苏古籍出版社, 1992
- Edit Committee of Nanjing Yearbook. *Nanjing Yearbook* (in Chinese). Nanjing: Jiangsu Ancient Book Press, 1992
- [21] 常州市统计局编. 常州统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1992, 1995, 1998, 2001
- Changzhou Municipal Bureau of Statistics. *Statistical Yearbook of Changzhou* (in Chinese). Beijing: China Statistical Press, 1992, 1995, 1998, 2001
- [22] 江苏省统计局编. 江苏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1995, 1998, 2001
- Jiangsu Municipal Bureau of Statistics. *Statistical Yearbook of Jiangsu* (in Chinese). Beijing: China Statistical Press, 1995, 1998, 2001
- [23] 安徽统计局编. 安徽统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1995
- Anhui Municipal Bureau of Statistics. *Statistical Yearbook of Anhui* (in Chinese). Beijing: China Statistical Press, 1995
- [24] 滁州市统计局编. 滁州统计年鉴. 滁州统计年鉴编委会, 2001
- Chuzhou Municipal Bureau of Statistics. *Statistical Yearbook of Chuzhou* (in Chinese). Edit Committee of Statistical Yearbook of Chuzhou, 2001
- [25] 中华人民共和国民政部编. 中华人民共和国行政区划简册. 北京: 中国地图出版社, 2002
- Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China. *Regionalism of the People's Republic of China*. Beijing: Sinomaps Press, 2002