

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

华丽娟^{1, 2} 马柱国¹ 曾昭美¹

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 利用中国东部地区 1961~2000 年 61 个大城市站点和 169 个小城镇站点的逐日最高、最低温度资料, 对比分析了大城市和小城镇的最高、最低温度和日较差极端值以及相对极端值变化特征。结果表明: 大城市最高、最低温度的极端值均高于小城镇。二者最高温度的极端最大值在 90 年代后显著升高, 极端最小值 40 年来均显著增加; 二者最低温度的极端值也随时间明显升高。在所分析时段, 大城市和小城镇暖日和暖夜天数均显示出增多趋势; 二者冷日和冷夜天数均呈现下降趋势。就总体而言, 大城市暖日、暖夜、冷日、冷夜天数均多于小城镇。大城市日较差的极端值均比小城镇小, 并且二者均有显著的下降趋势; 大城市和小城镇相对较长日较差(日较差超过第 95 个百分位数)出现的天数显著下降, 但相对较短日较差(日较差低于第 5 个百分位数)出现的天数明显上升。

关键词 大城市 小城镇 极端值 相对极端值 趋势

文章编号 1006-9895(2006)01-0080-13

中图分类号 P463

文献标识码 A

The Comparative Analysis of the Changes of Extreme Temperature and Extreme Diurnal Temperature Range of Large Cities and Small Towns in Eastern China

HUA Li-Juan^{1, 2}, MA Zhu-Guo¹, and ZENG Zhao-Mei¹

1 *START Regional Center for Temperate East Asia, Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Abstract According to the report of IPCC in 2001, the global averaged surface temperature has increased by 0.6 ± 0.2 °C since the beginning of the last century. Global warming results from both human activities and natural climate change. The extreme temperature and extreme diurnal temperature range have changed obviously while the mean surface temperature keeps increasing.

Human activities have the important influence on the changes of extreme temperature and extreme diurnal temperature range, especially in urban areas. The main purpose of this study is to analyze the differences of extreme temperature and extreme diurnal temperature range between large cities and small towns over eastern China. Based on China's fifth population survey (2000) data, large cities and small towns are classified. There are more than 500000 permanent residents at the selected large city stations, and there are less than 100000 at small town stations.

收稿日期 2004-10-26, 2005-02-19 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目“中国西北西部气候和水分过程的变化特征及其相互联系的研究”(KZCX3-SW-229)和国家自然科学基金资助项目 40375028

作者简介 华丽娟, 女, 1977 年出生, 博士研究生, 主要从事区域气候变化的研究工作。E-mail: hualj@tea.ac.cn

Because most of these stations are located in the eastern areas of 100°E of China, our work focuses on the influence of urbanization on extreme temperature and extreme diurnal temperature range over eastern China.

Sixty-one large cities stations and 169 small towns are selected in eastern China with the observations of daily maximum and minimum temperatures from 1961 to 2000. Daily diurnal temperature range is the difference between daily maximum temperature and daily minimum temperature. The inhomogeneous data have been deleted due to relocation of stations before analyzing.

Two kinds of methods are used in this study; one is absolute extremes and the other is relative extremes. For the first method, absolutely maximal and minimal extreme maximum temperatures are defined as the maximal and minimal values of the maximum temperature every year at every station, respectively. The minimum temperature and diurnal temperature range have the similar definitions. The data are averaged at large city and small town stations, respectively. For the other method, the days with the maximum (minimum) temperature above the 95th percentile of them on the same day from 1961 to 2000 are defined as warm days (nights), and below the 5th percentile on the same day are cool days (nights). The numbers of warm days, warm nights, cool days and cool nights are calculated at each station every year and these numbers are averaged at large city and small town stations, respectively. Relatively extreme diurnal temperature ranges have the similar definitions.

The results show that the annual absolutely maximal and minimal maximum and minimum temperatures in large cities are higher than those in small towns. Annual absolutely maximal maximum temperatures of the large cities and small towns have increased obviously after the 1990s, and remarkable increasing trends of the annual absolutely minimal maximum temperatures are found at the two kinds of stations. In addition, the obvious increasing trends of both maximum and minimum of the annual absolutely extreme minimum temperatures are shown at large city and small town stations. During the analyzed period, the numbers of warm days and warm nights exhibit increasing trends in large cities and small towns, while the numbers of the cool days and cool nights display decreasing trend. The averaged numbers of warm days, warm nights, cool days and cool nights are higher in large cities than small towns from 1961 to 2000. By analyzing annual absolutely extreme diurnal temperature range, it is found that they are lower in large cities than those in small towns, and they all have decreased remarkably.

Although it is difficult to ensure that the urbanization has no effect on the stations which have the population not exceeding 100000, it is feasible to discuss the warming effects by analyzing these stations with contrast to the large cities with over 500000 population. From above results, the urban warming phenomena are found in eastern China.

Key words large city, small town, annual absolutely extreme value, annual relatively extreme value, trend

1 引言

据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的报告^[1], 在近一个世纪以来全球平均气温上升了 0.6 ± 0.2 °C。全球增暖主要是由人类活动和自然变化共同作用的结果, 从最近 50 年来看, 人类活动引起大气中温室气体特别是 CO₂ 的浓度超出了过去 40 万年间的任何时期^[1]。温室气体浓度的升高势必会对全球包括中国的气候造成一定的影响。Gao 以及姜大膀等的研究^[2~4]表明, 在 CO₂ 浓度升高的情况下, 未来中国地区的地面气温将有明显升高。全球变暖不仅表现为平均温度的升高, 极端温度以及日

较差的变化也很显著, 且存在明显的地区差异^[5]。随着社会和经济的发展, 极端高温、极端低温事件对人类的生产和生活的影响极为巨大, 因此极端温度的变化及其成因引起了科学界的广泛关注, 而诸多因素之中人类活动又被认为是引起极端温度发生变化的一个重要原因。

城市热岛效应通常是指城市地区的温度比其周边农村温度高的一种现象。人类对于城市气候的研究已经进行了 150 多年^[6]。近些年来, 对城市热岛效应的研究更加关注于城市化对气候的影响, 尤其是在全球增暖背景下由于城市化造成的增温引起气候学家的关注。Wang 和曾昭美^[7, 8]对我国东部的特大城市与其毗邻的中、小城镇的温差进行了研究。他们发现, 在我国存在明显的城市化增暖现

象。由于目前世界上许多观测站点均位于大城市或者是大城市的郊区,因此城市化已经被认为是对自然气候信号的一种严重干扰^[9]。人们也试图从气候观测数据中提取出因城市化效应引起的这部分增暖的信息^[10]。

人口变化是检验城市化发展对气候影响的一个理想指标,现有的研究^[8, 11]也已经充分表明了这一点。Karl 等^[11]通过分析美国的温度资料发现,在美国即使是一万人口的小城镇也存在明显的城市化增暖倾向。然而对于中国而言,Karl 等^[12]认为,50 万人口以下的城市所产生的热岛效应对气候变化的影响可以忽略。由于很难确定严格意义上的农村站点,本文将 10 万人口以下的站点作为小城镇站点,而将 50 万人口以上的站点作为大城市站点。其次,由于我国人口在 50 万以上的站点主要位于 100°E 以东地区,为了便于比较分析,本文所使用的小城镇站点也均位于该地区。在此基础上,我们重点分析了中国东部区域城市化对极端温度及日较差变化的影响。

2 资料和分析方法

2.1 资料

所用资料为中国东部区域 230 个测站 1961~2000 年的逐日最高温度、最低温度资料,站点分布见图 1。该资料在进行计算前已经过严格的质量检查,对于有较大非气象误差(如站点迁移)的站点进

行了剔除,同时又选取缺测资料非常少的站点作为本文分析的基本资料。日较差定义为日最高温度和日最低温度之差。人口资料依据国家统计局整理出版的 2000 年人口统计年鉴^[13]中市辖区总人口中非农业人口数为标准,共选出人口在 50 万以上的大城市站点 61 个,10 万人口以下的小城镇站点 169 个。

随着城市化的快速发展,我国城市人口不断增长。图 2 描述了 1965~2000 年我国东部 61 个大城市平均人口变化,从 60 年代中期到 70 年代中后期,城市人口平均增长了约 5 万左右,进入 80 年代后平均人口增长速度约为 60 年代到 70 年代的 2 倍,人口增速最快的是 90 年代,从 1991 年到 2000 年的 10 年间,平均城市人口增长了约 29 万左右。城市人口如此快速的膨胀,势必会对城市的局地气候和环境造成一定程度的影响,包括本文即将分析的极端温度以及日较差。

2.2 分析方法

本文将从两方面分析大城市和小城镇极端温度以及日较差的变化趋势,具体方法如下。

首先,统计出每个站点每年最高温度(maximum temperature, $T_{\max}$)序列的最大值(记为 $T_{\max, \max}$)和最小值(记为 $T_{\max, \min}$);最低温度(minimum temperature, $T_{\min}$)序列的最大值($T_{\min, \max}$)和最小值($T_{\min, \min}$);日较差(diurnal temperature range, DTR)序列的最大值($T_{\text{DTR}, \max}$)以及最小值

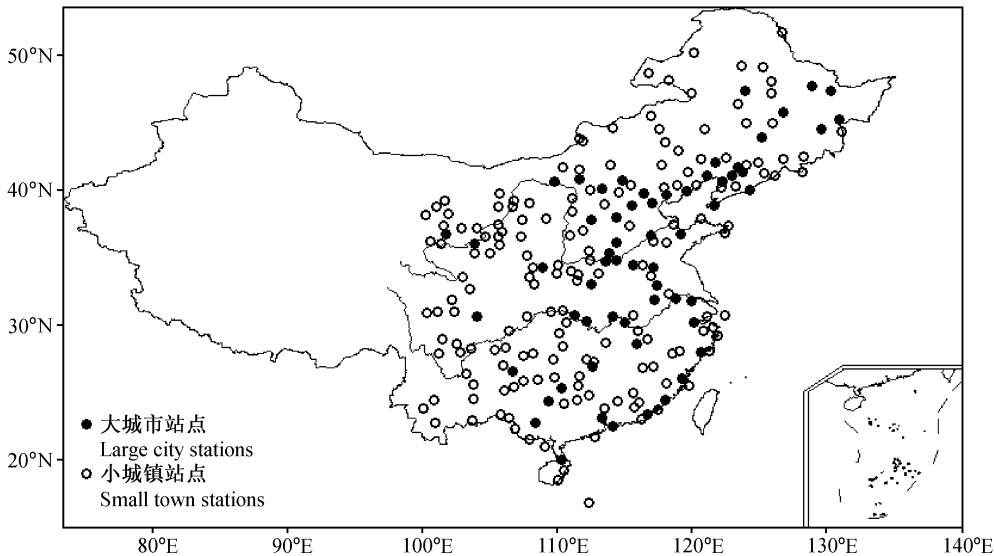


图 1 大城市和小城镇站点分布

Fig. 1 The distribution of large city and small town stations

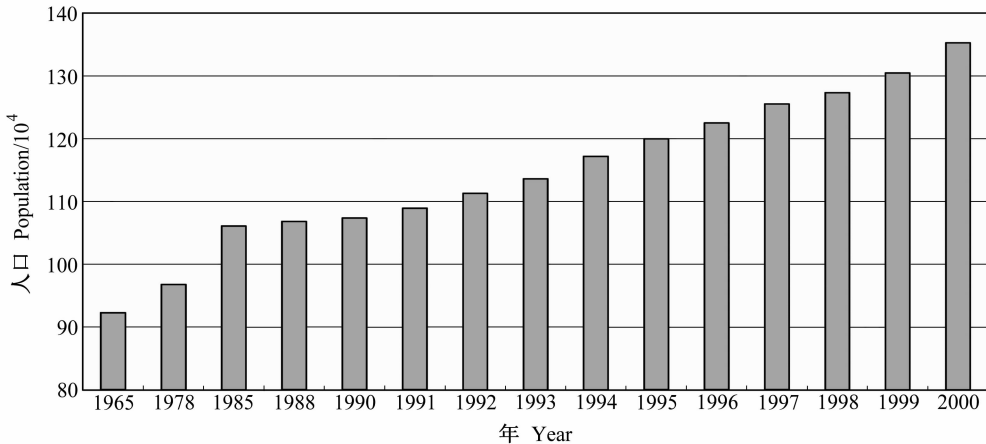


图2 1965~2000年东部61个大城市平均人口变化

Fig. 2 The trend of the mean population of 61 large cities in eastern China from 1965 to 2000

($T_{DTR, min}$), 再分别对大城市和小城镇站点作区域平均。这样便得到 1961~2000 中国东部地区大城市和小城镇平均 $T_{max, max}$ 、 $T_{max, min}$ 、 $T_{min, max}$ 、 $T_{min, min}$ 、 $T_{DTR, max}$ 以及 $T_{DTR, min}$ 时间序列。

$T_{max, max}$ 及 $T_{min, max}$ 一般出现在夏季, 而 $T_{max, min}$ 和 $T_{min, min}$ 一般出现在冬季。但事实上, 任何季节都有可能会出现极端温度事件, 因此, 有必要考虑相对极端高温、极端低温以及相对较长日较差、相对较短日较差的变化趋势。基于这个思想, 这里采用 Zhai 等^[14] 定义的相对极端温度指数概念, 即将每个站点 1961~2000 年中同日的最高温度、最低温度资料分别按升序排列, 得到该日第 95(5) 个最高温度以及最低温度的百分位值, 照此种方法可得到 366 个最高温度和最低温度的第 95(5) 个百分位值, 将其作为极端高温、极端低温事件的上(下)阈值。我们把最高温度极端高(低)温事件称为暖(冷)日, 若某日的最高温度超过了该日最高温度的第 95 个百分位数值则认为该日为暖日; 若低于该日第 5 个百分位数值, 便认为该日为冷日。而把最低温度极端高(低)温事件称为暖(冷)夜。如果某日的最低温度超过了该日最低温度的第 95 个百分位数值, 则认为该夜为暖夜; 若低于该日第 5 个百分位数值, 便认为该夜为冷夜。根据 Bonsal 的定义, 如果某个气象要素有 n 个值, 将这 n 个值按升序排列 $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n$, 某个值小于或等于 x_m 的概率, 由下面的公式确定:

$$P = (m - 0.31) / (n + 0.38), \quad (1)$$

其中 m 为 x_m 的序号。如本文有 40 年的序列, 则

第 95 个百分位上的值为排序后的 x_{38} ($P=93.3\%$) 和 x_{39} ($P=95.8\%$) 的线性插值。

通过上述方法统计每个站点每年暖日、冷日、暖夜和冷夜出现的天数, 再分别对大城市和小城镇站点作区域平均。同样, 对日较差也采用相同的方法处理, 得到大城市和小城镇平均每年相对较长的日较差以及相对较短的日较差出现的天数。

3 大城市和小城镇极端温度及日较差的变化

3.1 最高温度的极端值变化特征

图 3a 给出了 1961~2000 年中国东部地区大城市和小城镇平均 $T_{max, max}$ 变化, 从图上直观的分析发现, 在 1993 年以前, 大城市和小城镇 $T_{max, max}$ 均为减小趋势; 但在 1993 年以后, 二者的 $T_{max, max}$ 则呈现明显的升高趋势, 在分析时段, 二者的变化基本一致, 只是大小不同。若对两者在 1961~2000 年的变化趋势做线性分析(表 1), 可以发现: 两者都没有明显的变化趋势。用 Mann-Kendall(M-K) 检验方法对大城市和小城镇 $T_{max, max}$ 变化趋势进行分析, 可以发现类似的现象。即在 20 世纪 80 年代末期以前, 大城市 $T_{max, max}$ 有显著下降的变化趋势, 90 年代以后转为上升趋势; 小城镇近 10 年也有明显增温趋势(图 4a)。马柱国等^[15] 的研究结果也发现, 我国绝大多数地区极端最高温度发生的频率在 20 世纪 90 年代以后有明显的增加趋势。

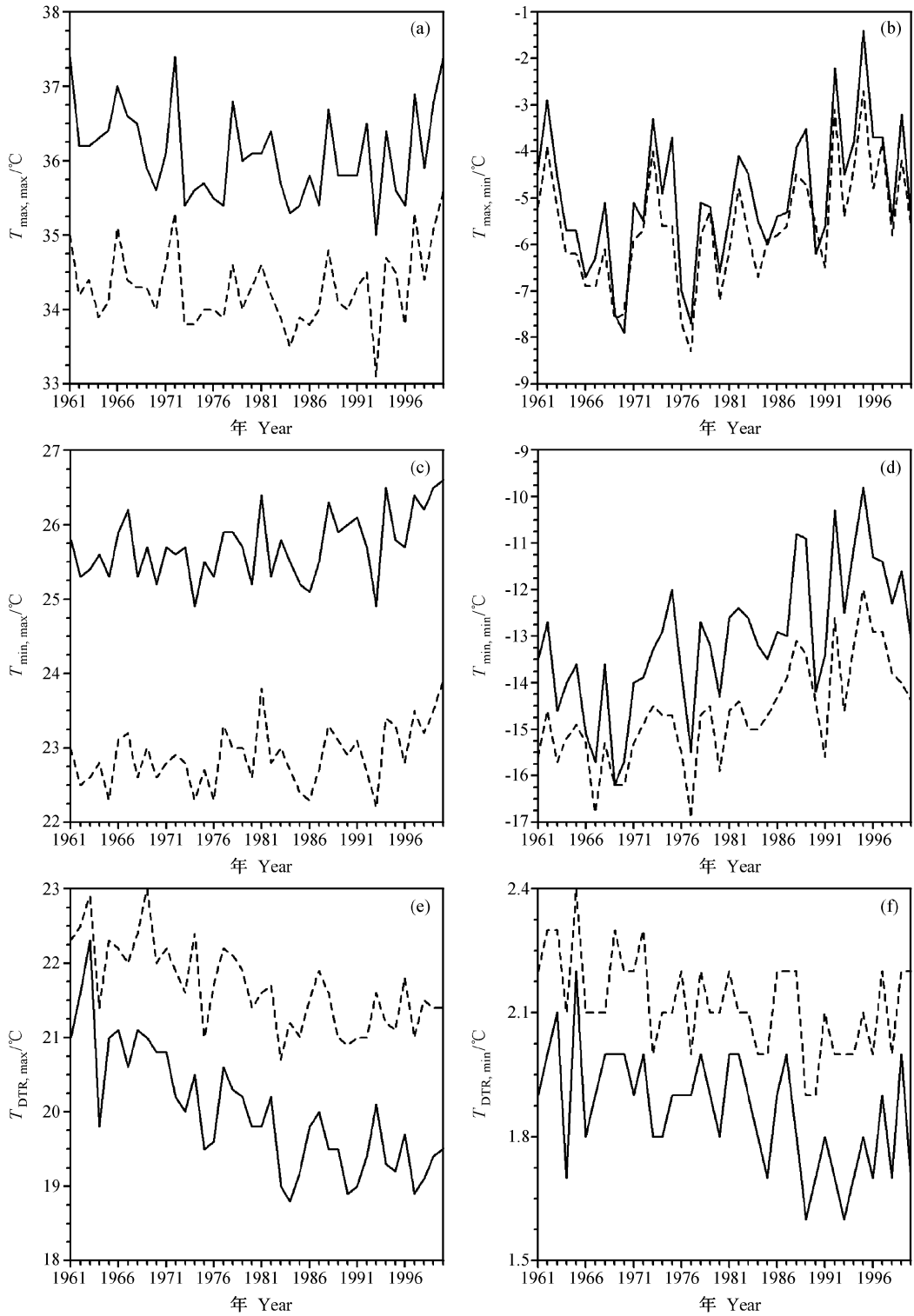


图3 1961~2000年中国东部地区大城市和小城镇极端温度及日较差变化(实线:大城市,虚线:小城镇):(a) $T_{\max, \max}$; (b) $T_{\max, \min}$; (c) $T_{\min, \max}$; (d) $T_{\min, \min}$; (e) $T_{\text{DTR}, \max}$; (f) $T_{\text{DTR}, \min}$

Fig. 3 The trends of the annual absolutely extreme $T_{\max}$, $T_{\min}$ and DTR in large cities and small towns in eastern China from 1961 to 2000 (solid lines: large city stations, dashed lines: small town stations): (a) $T_{\max, \max}$; (b) $T_{\max, \min}$; (c) $T_{\min, \max}$; (d) $T_{\min, \min}$; (e) $T_{\text{DTR}, \max}$; (f) $T_{\text{DTR}, \min}$

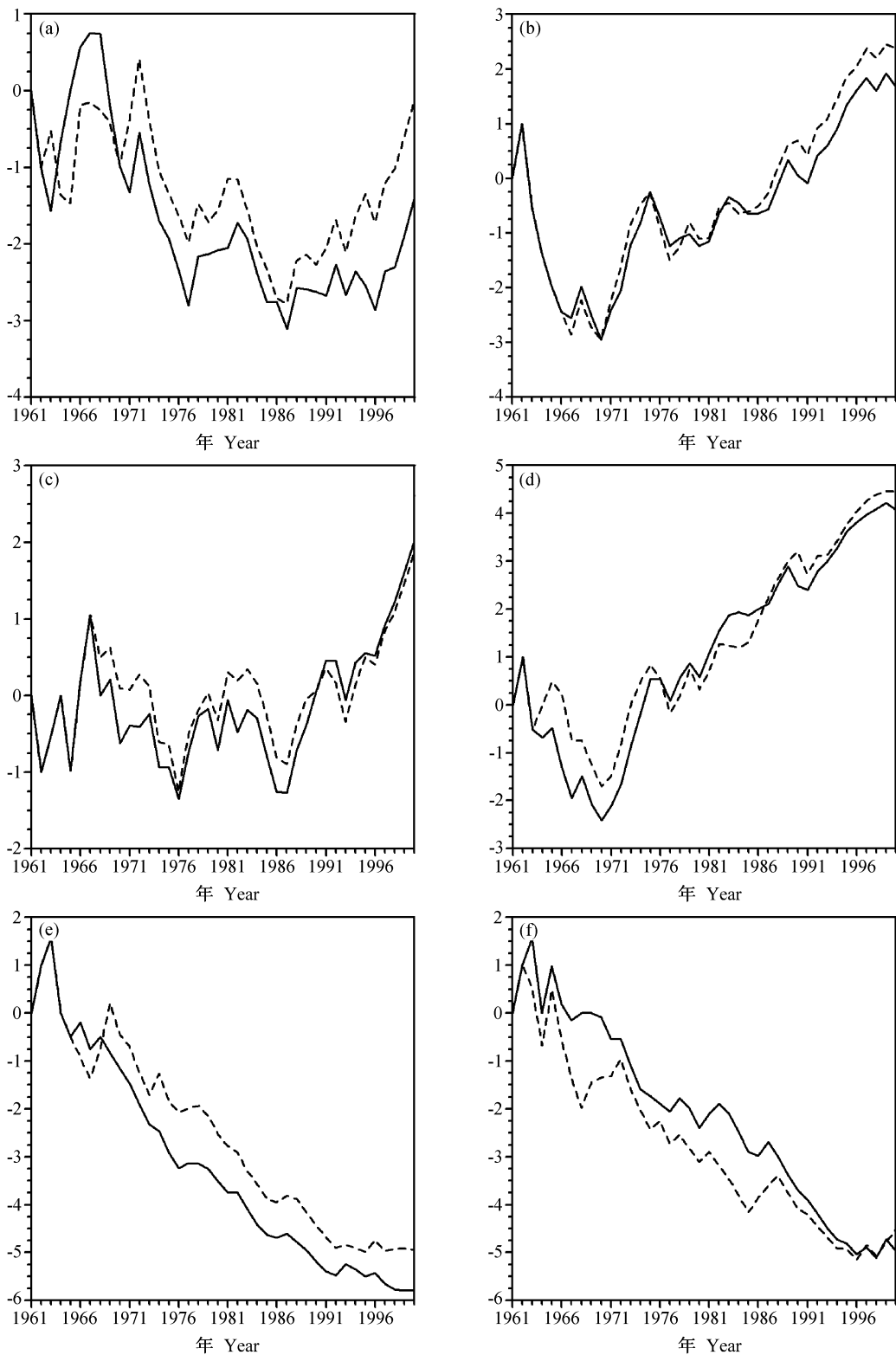


图 4 1961~2000 年中国东部地区大城市和小城镇极端温度及日较差变化趋势 M-K 检验, 其余同图 3

Fig. 4 The same as Fig. 3, except for the M-K trend detection test of the annual absolute extreme $T_{\max}$, $T_{\min}$ and DTR

表 1 1961~2000 年大城市和小城镇最高温度、最低温度和日较差极端值线性变化趋势以及大城市和小城镇之间相应物理量差值的线性变化趋势(单位: $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)

Table 1 The linear trends of the annual absolutely extreme $T_{\max}$, $T_{\min}$ and DTR in large cities and small towns and their differences between these two types of stations (units: $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)

	$T_{\max, \max}$	$T_{\max, \min}$	$T_{\min, \max}$	$T_{\min, \min}$	$T_{\text{DTR}, \max}$	$T_{\text{DTR}, \min}$
LC	-0.08	0.42^b	0.16^c	0.81^c	-0.54^c	-0.06^c
ST	0.04	0.41^b	0.13^b	0.62^c	-0.33^c	-0.04^c
LC-ST	-0.12^c	0.01	0.03	0.18^b	-0.22^c	-0.02^a

注: 粗体表示线性趋势信度显著性水平达 99% 以上, 其中 a: 0.1; b: 0.05; c: 0.01。LC: 大城市; ST: 小城镇; LC-ST: 两者差值(下同)

Note: The bold numbers are for the linear trends with confidence level over 99% (superscripts a: 0.1; b: 0.05; c: 0.01); LC represents large cities, ST represents small towns and LC-ST represents the difference between LC and ST (the same below)

从最高温度的极端最小温度($T_{\max, \min}$)变化(图 3b)来看, 大城市和小城镇变化趋势基本一致, 两者的线性增率分别为 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 达到了信度为 95% 的显著性检验(表 1)。M-K 法检验的结果说明在 1960~1970 年间大城市和小城镇有明显的下降趋势, 而到了 70 年代中后期开始稳步上升(图 4b)。这可能与我国工业发展过程有关, 自 70 年代末期开始我国施行改革开放政策, 工业迅速发展, 这无疑对空气污染以及气温升高有一定的贡献。

3.2 最低温度的极端值变化特征

图 3c 为 1961~2000 年大城市和小城镇最低温度极端最大值($T_{\min, \max}$)的变化趋势。大城市和小城镇 $T_{\min, \max}$ 均显著上升, 其中大城市以 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率显著升高, 小城镇上升的幅度略低于大城市, 约为 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 两者的变化趋势均达到了 95% 以上的信度检验值(表 1)。M-K 法检验(图 4c)可以得到相同的结论, 尤其是自 80 年代后期以后, 两者 $T_{\min, \max}$ 增长趋势更为显著。

图 3d 是最低温度极端最小值($T_{\min, \min}$)的变化趋势。与近几十年来平均最低温度存在明显上升趋势一致, 大城市和小城镇 $T_{\min, \min}$ 也显著升高, 分别达到 $0.81\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。M-K 法检验(图 4d)揭示出, 自 70 年代开始二者有持续的升温趋势。

从表 1 中大城市和小城镇最高、最低温度极端值的线性趋势分析, 可以发现: 除 $T_{\max, \max}$ 没有明显的变化趋势外, $T_{\max, \min}$ 、 $T_{\min, \max}$ 以及 $T_{\min, \min}$ 均有明显上升的趋势, 而且 $T_{\min, \min}$ 增幅明显高于 $T_{\max, \min}$, 这说明最高温度极端值增幅远不如最低温度极端值的增幅大。Easterling 等^[16]的研究结果也指出在全球大多数地区极端值最低、最高温度存在升高趋势, 但极端最高温度增加的幅度小于极端最低温度。 $T_{\max, \max}$ 和 $T_{\min, \max}$ 一般出现在夏季, 而 $T_{\max, \min}$ 和 $T_{\min, \min}$ 通常出现在冬季。分别对最高、最低温度极端最大值与极端最小值变化趋势分析, 发现最高温度极端最小值(冬季)增幅明显大于最高温度极端最大值(夏季), 最低温度极端值变化也有类似现象, 可见冬季极端温度增幅明显高于夏季, 这可能与我国北方大部分地区冬季取暖有关。

3.3 日较差的极端值变化特征

图 3e 是 1961~2000 年中国东部地区平均大城市和小城镇极端最大日较差($T_{\text{DTR}, \max}$)的变化。40 年来大城市和小城镇 $T_{\text{DTR}, \max}$ 显示出显著下降趋势, 大城市的下降趋势更为明显, 从 60 年代初期平均 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右下降到 90 年代平均 $19\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 降幅为 $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 达到了 99% 的信度检验。这种下降趋势在 90 年代以前较为剧烈, 而在 90 年代以后变得缓慢, 这与此段时期东部地区极端高温事件增多有关; 小城镇也有类似的变化, 虽然在总体上的下降趋势没有城市剧烈, 大约是 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 但也通过了信度为 99% 的显著性检验(表 1 和图 4e)。

大城市和小城镇不仅极端最大日较差有显著下降趋势, 极端最小日较差($T_{\text{DTR}, \min}$)也有明显下降趋势(图 3f 和图 4f), 但不如极端最大日较差减小幅度大。大城市和小城镇两者的降幅分别为: $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 均达到了 99% 的信度水平(表 1)。

3.4 最高、最低温度及日较差极端值大城市与小城镇差值变化特征

虽然大城市和小城镇极端温度及日较差变化趋势基本一致, 但二者之间有显著差异。图 5a 中实线描述了二者 $T_{\max, \max}$ 差值, 虚线为 $T_{\max, \min}$ 差值, 显然 40 年来大城市 $T_{\max, \max}$ 均高于小城镇。除了 1970、1985 及 1990 年大城市 $T_{\max, \min}$ 略低于小城镇外, 其余年份大城市 $T_{\max, \min}$ 依然高于小城镇。两

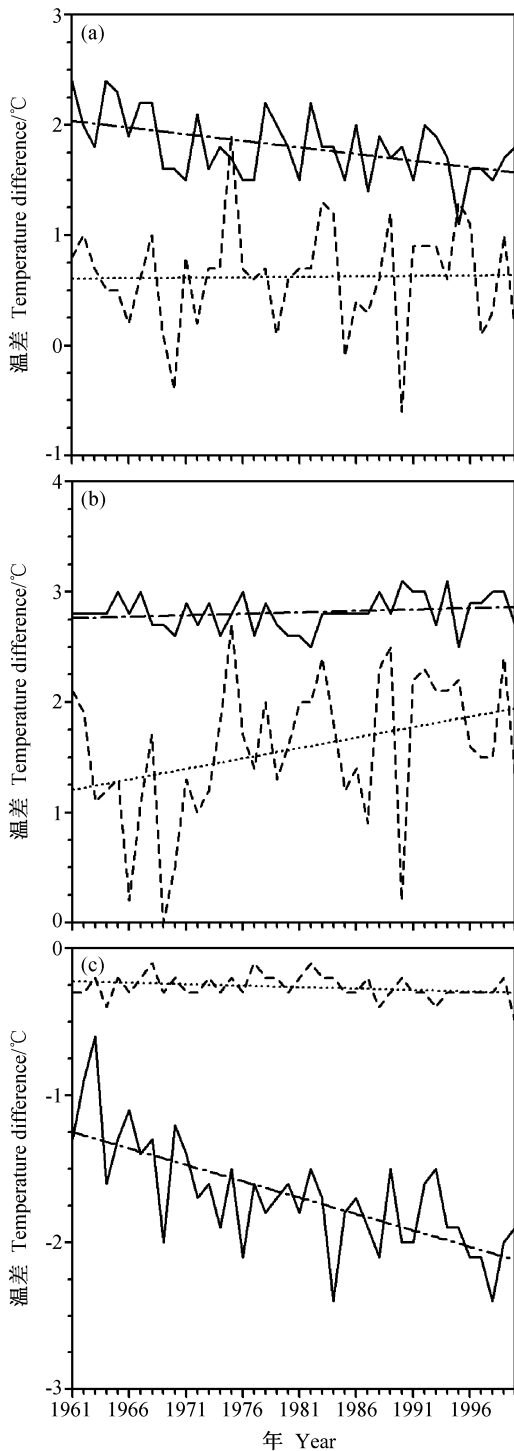


图5 1961~2000年中国东部地区大城市和小城镇之间极端温度及日较差差值：(a) T_{max} ；(b) T_{min} ；(c) DTR。实线：极端最大值差值；虚线：极端最小值差值

Fig. 5 The differences of the annual absolutely extreme T_{max} (a), T_{min} (b) and DTR (c) between large cities and small towns in eastern China from 1961 to 2000. Solid lines: absolutely maximums; dashed lines: absolutely extreme minimums

者 $T_{max, max}$ 差值在 20 世纪 60 年代初期达到 2.25°C 左右，此后逐步下降，平均每 10 年下降了 0.12°C ，通过了 99% 的信度检验(表 1)。大城市 $T_{max, min}$ 平均比小城镇高 0.6°C 左右，但其差值变化趋势较小，仅有 $0.01^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的弱的增大趋势(表 1)。

大城市 $T_{min, max}$ 和 $T_{min, min}$ 均明显高于小城镇，其中大城市 $T_{min, max}$ 较小城镇平均高出 2.81°C ，而 $T_{min, min}$ 大城市也超出小城镇 1.6°C 左右(图 5b)。最高温度极端值大城市与小城镇之间差值均较最低温度极端值二者之间差值高。这清楚表明，城市化效应更多体现在最低温度上。由于夜间一般大气层结稳定度要比白天高，城市与其周围地区之间水平和垂直方向的混合作用也较白天弱，这使得夜晚热岛强度高。而最低温度一般出现在夜间，因此，最低温度更能反映城市热岛效应的变化。从变化趋势看，大城市与小城镇 $T_{min, max}$ 差值略有上升，平均每 10 年升高了 0.03°C 。而二者 $T_{min, min}$ 差值呈现一个较强的增大趋势，增幅为 $0.18^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，并通过了 95% 的信度检验(表 1)。

图 5c 描述的是大城市与小城镇之间极端日较差差值变化。大城市 $T_{DTR, max}$ 平均比小城镇小 1.68°C ，而 $T_{DTR, min}$ 平均也比小城镇低 0.26°C 。从变化趋势看，两者 $T_{DTR, max}$ 、 $T_{DTR, min}$ 差值均为减小趋势，减小的幅度分别为： $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.02^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，分别通过了 99% 及 90% 的信度检验。

4 大城市和小城镇相对极端温度及日较差的变化

4.1 最高温度的相对极端值变化特征

最高温度的相对极端值变化包括暖日天数和冷日天数变化。由表 2 可以看出，无论大城市还是小城镇出现暖日的天数都是增加的，增加的幅度分别为 $1.16\text{d}/10\text{a}$ 和 $1.58\text{d}/10\text{a}$ ，大城市暖日的增加率明显低于小城镇的增加率，也不能达到 90% 的显著性检验，而小城镇的增加趋势通过了 95% 的显著性检验。从图 6a 可以看出，这种增加趋势主要发生在 1986 年以后。图 7a 为 M-K 方法检验的结果。可以看出，虽然大城市和小城镇暖日天数变化的趋势都没有通过检验，但是在 80 年代中期以后暖日增多的趋势还是很明显的。对大城市站点而

表 2 1961~2000 年大城市和小城镇最高温度、最低温度和日较差相对极端值以及大城市和小城镇之间相应物理量差值的线性变化趋势(单位: d/10 a)

Table 2 The linear trends of the annual relatively extreme $T_{\max}$, $T_{\min}$ and DTR in large cities and small towns and their differences between these two types of stations (units: d/10 a)

	暖日 Warm days	冷日 Cool days	暖夜 Warm nights	冷夜 Cool nights	相对较长 DTR Relatively maximal DTR	相对较短 DTR Relatively minimal DTR
LC	1. 16	-0. 60	4. 18^c	-2. 56^c	-4. 47^c	0. 99^c
ST	1. 58^b	-0. 49	2. 80^c	-2. 05^c	-2. 41^c	0. 72^c
LC-ST	-0. 42	-0. 11	1. 38^c	-0. 51^c	-2. 06^c	0. 27^b

言, 60 年代暖日天数每年约为 20 天左右, 而到了 1998 年达到了 35 天, 这同 Zhai 等^[14]的结果是一致的。小城镇暖日也有类似的变化, 尤其是 1998 年甚至超过了 35 天。

图 6b 是大城市和小城镇冷日天数的变化趋势。大城市冷日天数的递减率是 0. 60 d/10 a; 小城镇冷日天数减小的幅度是 0. 49 d/10 a, 低于城市的递减率, 两者均没有通过 90% 的信度检验(表 2)。M-K 法检验说明: 大城市和小城镇冷日天数减少的趋势在 80 年代中期以后更明显(图 7b)。

4. 2 最低温度的相对极端值变化特征

最低温度的相对极端值变化包括暖夜天数和冷夜天数变化。图 6c 是大城市和小城镇暖夜天数的变化趋势。可以看出, 在 80 年代中期以前, 大城市和小城镇暖夜没有明显的变化趋势(图 7c), 每年大约有 10~20 个暖夜; 而在此之后暖夜增多的趋势非常明显, 大城市暖夜最多的 1998 年达到了 46 天, 而小城镇也达到了 42 天。Zhai 等^[14]的研究也有类似的结果。从表 2 可见, 大城市暖夜的上升趋势为 4. 18 d/10 a, 小城镇为 2. 80 d/10 a, 并且都通过了 99% 的信度检验。80 年代中期后我国东部地区暖夜天数显著上升, 可能与该地区自改革开放后经济迅速发展、工业化进程加快有关。

图 6d 表明大城市和小城镇冷夜天数也有明显的下降趋势, 下降率分别为 2. 56 d/10 a 和 2. 05 d/10 a, 均达到了 99% 的信度水平(表 2)。从图 7d 还可以看出, 二者冷夜天数的下降趋势主要发生在 70 年代以后, 在此之前为显著的升高趋势。

4. 3 日较差的相对极端值变化特征

图 6e 为大城市和小城镇日较差超过第 95 个百分点数(相对较长日较差)的年总天数变化。可以看出, 在 70 年代以前, 相对日较差较长的天数在大

城市可达到 30 天以上, 小城镇也有 27 天左右。而在 70 年代初期变化是最剧烈的, 大城市和小城镇相对日较差较长的天数均减少了至少 10 天左右, 70 年代中期以后变化较平缓。总而言之, 无论是用 M-K 方法还是线性趋势检验, 都可以发现大城市和小城镇相对较大日较差是显著减小的(表 2 和图 7e)。

图 6f 给出了大城市和小城镇日较差低于第 5 个百分点数(相对较短日较差)的年总天数变化。可以发现, 大城市和小城镇相对较短的日较差出现的天数除了在 1964 年有一峰值外, 从 60 年代开始显示出显著上升趋势, 升高的幅度分别为 0. 99 d/10 a 和 0. 72 d/10 a, 均通过了 99% 的显著性检验(表 2 和图 7f)。

4. 4 最高、最低温度及日较差相对极端值大城市和小城镇差值变化特征

图 8a 显示的是大城市和小城镇之间暖日天数差值以及冷日天数差值的变化。平均来看, 大城市出现暖日的天数比小城镇多 0. 14 天, 而出现冷日的天数大城市比小城镇多 0. 17 天左右。从变化趋势上分析, 两者之间暖日天数的差别呈现出一定的减小趋势, 递减率为 0. 42 d/10 a, 但没有通过显著性检验; 二者冷日天数的差值也呈现出一个弱的下降趋势, 降幅为 0. 11 d/10 a(表 2)。

从大城市和小城镇暖夜天数以及冷夜天数的差值的 40 年平均结果看, 大城市都略高于小城镇。从差别的变化趋势上看, 暖夜天数差值有显著的上升趋势, 上升幅度约为 1. 38 d/10 a, 达到了 99% 的信度水平; 而二者冷夜天数差值呈现出显著下降的趋势, 也达到了 99% 的信度水平(图 8b 和表 2)。这进一步说明, 中国东部地区大城市有明显的夜间增温现象, 城市热岛效应在夜间表现得更强烈。

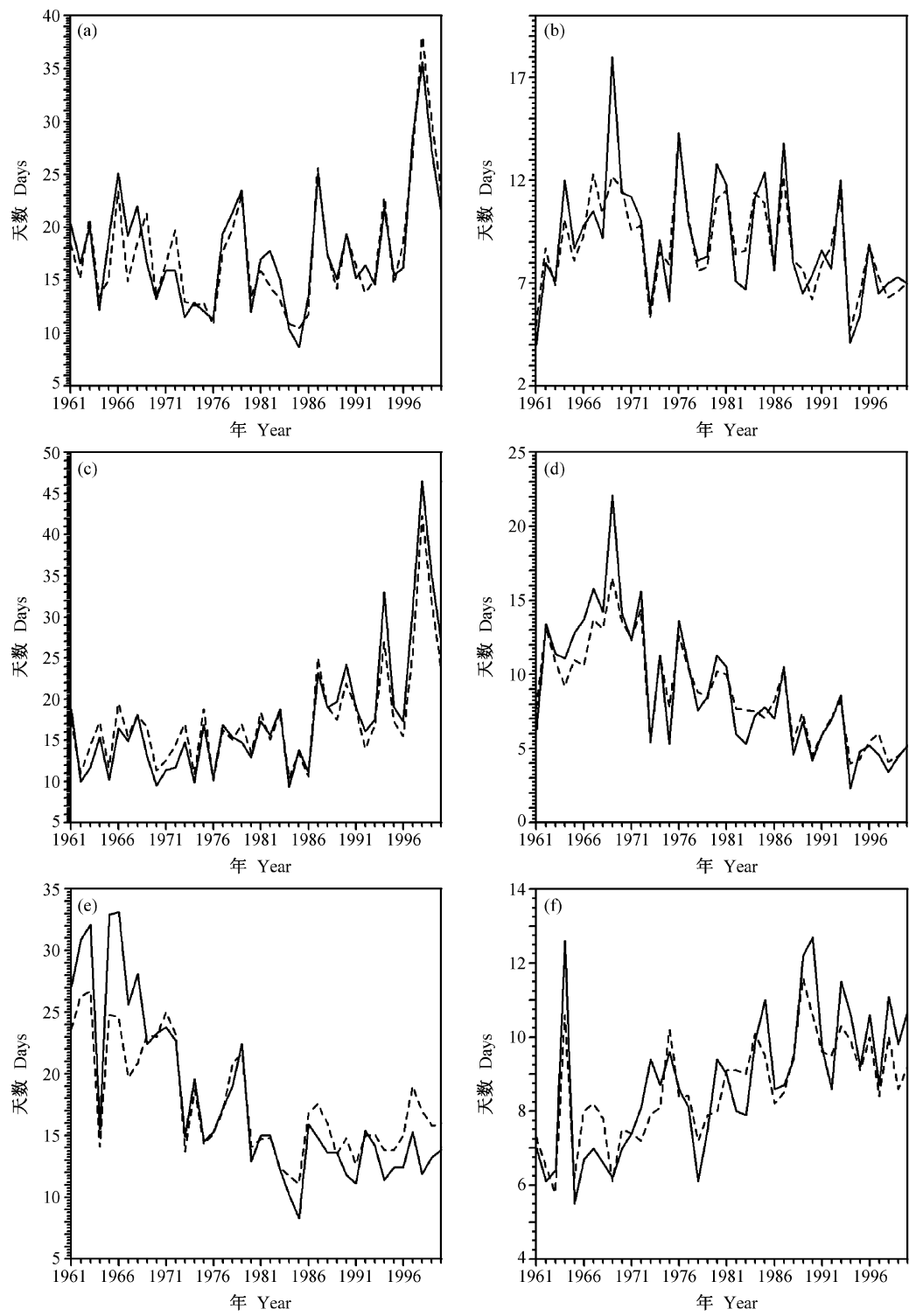


图 6 1961~2000 年中国东部地区大城市和小城镇相对极端温度及日较差发生频率变化 (实线：大城市；虚线：小城镇)：(a) 暖日；(b) 冷日；(c) 暖夜；(d) 冷夜；(e) 相对较长日较差；(f) 相对较短日较差

Fig. 6 The trends of the annual relatively extreme T_{max} , T_{min} and DTR in large cities and small towns in eastern China from 1961 to 2000 (Solid lines; large city stations, dashed lines; small town stations): (a) Warm days; (b) cool days; (c) warm nights; (d) cool nights; (e) relatively maximal DTR; (f) relatively minimal DTR

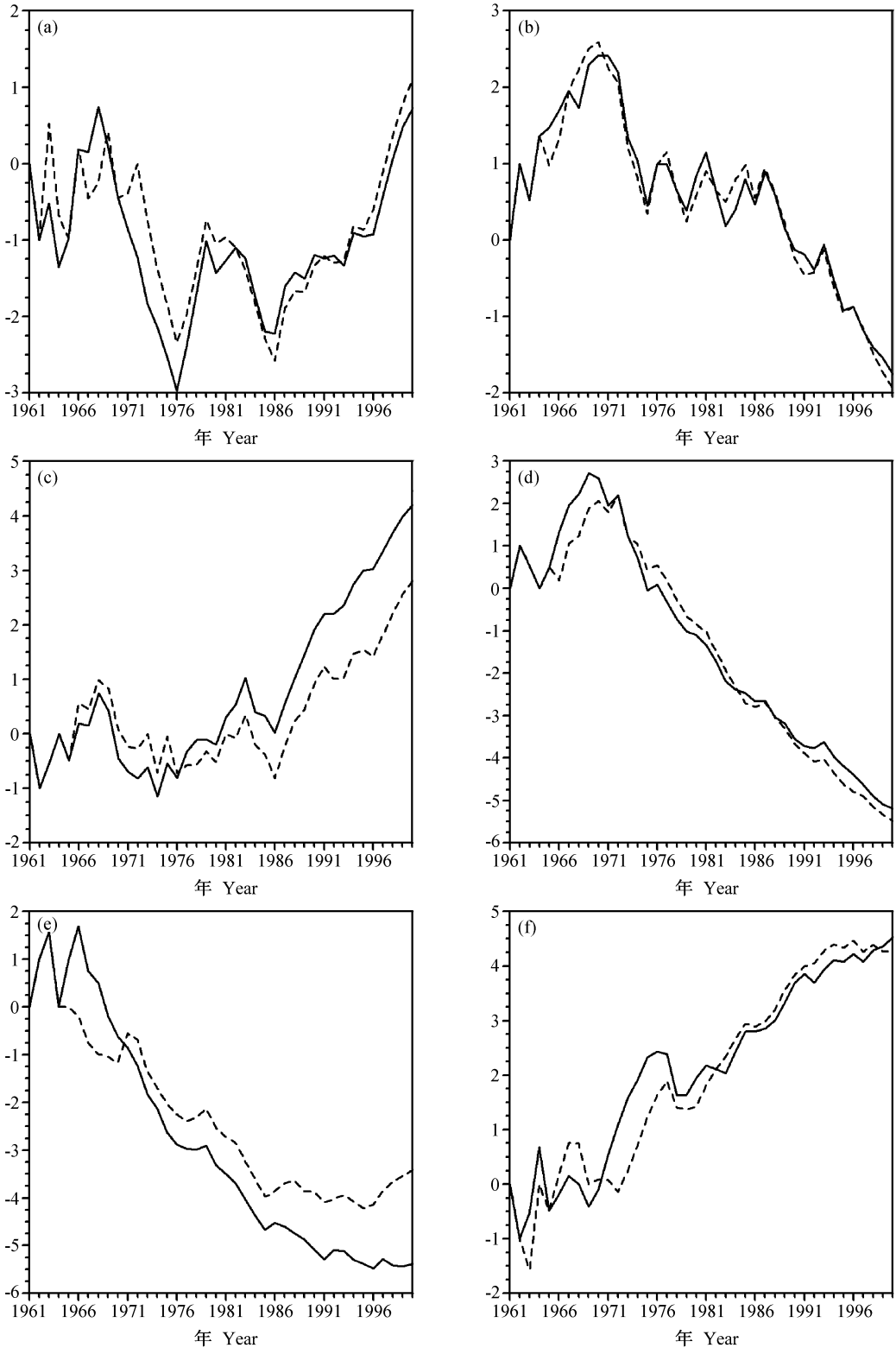


图 7 1961~2000 年中国东部地区大城市和小城镇相对极端温度及日较差发生频率变化趋势 M-K 检验, 其余同图 6

Fig. 7 The same as Fig. 6 except for the M-K trend detection test of the annual relatively extreme $T_{\max}$, $T_{\min}$ and DTR

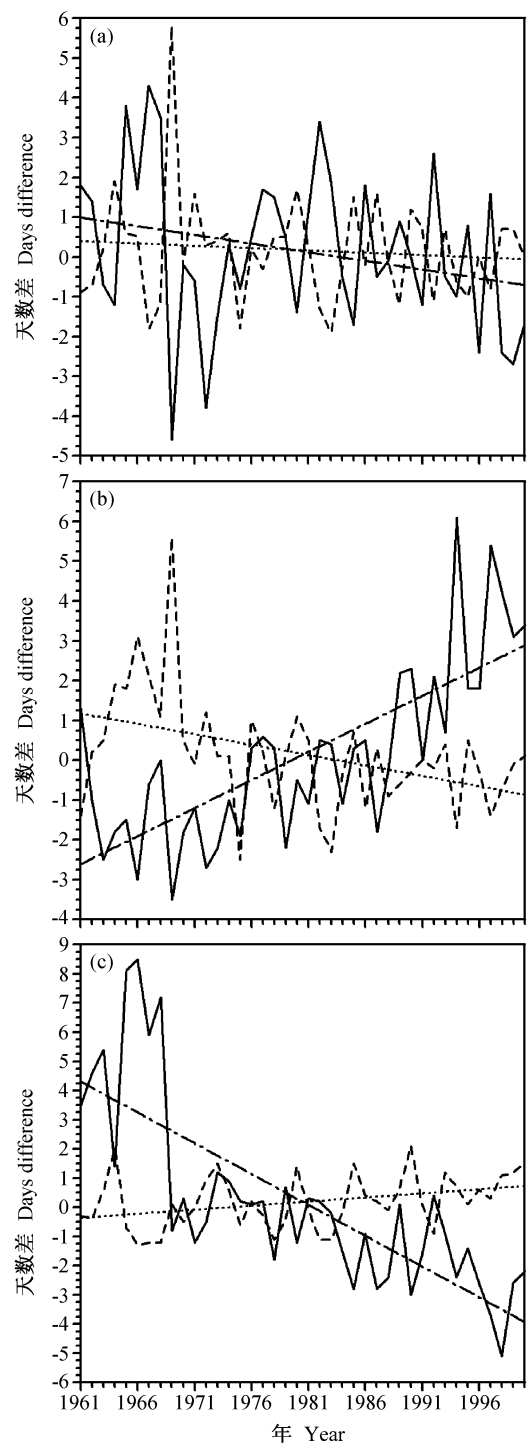


图 8 1961~2000 年中国东部地区大城市和小城镇之间相对极端温度及日较差发生频率差值：(a) $T_{\max}$ ；(b) $T_{\min}$ ；(c) DTR。实线：相对极端较大值差值；虚线：相对极端较小值差值

Fig. 8 The differences of the annual relatively extreme $T_{\max}$ (a), $T_{\min}$ (b) and DTR (c) between large cities and small towns in eastern China from 1961 to 2000. Solid lines; relatively extreme maximums; dashed lines; relatively extreme minimums

图 8c 中实线为相对极端较长日较差大城市和小城镇差值，可见二者差值呈现出显著下降的趋势，减小率为 2.06 d/10 a，从 60 年代的大城市相对极端较长日较差出现的天数多于小城镇逐渐向小城镇多于大城市转变；虚线所示为相对极端较短日较差两者差值，主要呈现出显著的周期性波动上升趋势，升幅约为 0.27 d/10 a，通过了 95% 的显著性检验。

5 结论与讨论

本文对比分析了 1961~2000 年中国东部大城市和小城镇最高、最低温度和日较差极端值以及相对极端值变化特征，得出以下几点结论：

(1) 大城市和小城镇最高温度的极端最大值没有显著的变化趋势，但自 20 世纪 90 年代后二者均有显著的增加趋势；大城市和小城镇最高温度的极端最小值均有显著升高的趋势；最低温度的极端最大、最小值也有明显的增加趋势；而日较差的极端最大、最小值为显著下降趋势。最高、最低温度的极端最小值增幅明显大于极端最大值。

(2) 大城市最高、最低温度极端值均高于小城镇；而大城市日较差的极端值均低于小城镇。

(3) 大城市和小城镇暖日和暖夜的天数显著增多，尤其是在 80 年代中期后增加趋势更为显著，而两者冷日和冷夜天数均明显减小；大城市和小城镇相对较长日较差出现的天数明显减小，而相对较短日较差出现的天数显著增多。

(4) 大城市平均暖日和冷日的天数均高于小城镇；大城市平均暖夜和冷夜的天数也多于小城镇；相对极端较长日较差出现的天数两者差值从 60 年代大城市多于小城镇逐渐向小城镇多于大城市转变；二者相对极端较小日较差差值主要呈现出显著的周期性波动上升趋势。

由以上的结果可以发现，中国东部地区存在着一定的城市化增暖现象。虽然 10 万人口以下的站点很难说完全不受城市化的影响，但通过其与 50 万人口以上的大城市站点的对比分析来探讨大城市的增温效应还是可行的。此外，应指出的是，我国地域辽阔，气候类型复杂多样，仅分析中国东部地区是不够的，接下来应更细致、详尽地分析我国不同地区的城市化现象。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. *Climate Change 2001: The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al., Eds. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001
- [2] Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18** (6): 1224~1230
- [3] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测. *地球物理学报*, 2004, **47**(4): 590~596
Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianmei. East Asian climate change trend under global warming background. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **47**(4): 590~596
- [4] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. SRES A2 情景下中国气候未来变化的多模式集合预测结果. *地球物理学报*, 2004, **47**(5): 776~784
Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianmei. Multimodel ensemble prediction for climate change trend China under SRES A2 scenario. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **47**(5): 776~784
- [5] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Ya, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**(3): 417~425
- [6] Klysik K, Fortuniak K. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmos. Environ.*, 1999, **33**: 3885~3895
- [7] Wang W C, Zeng Z, Karl T R. Urban heat islands in China. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**: 2377~2380
- [8] 曾昭美. 我国城市化增暖与人口、能源消耗工业总产值的关系. *南京大学学报*, 1994, **30**(1): 238~246
- Zeng Zhaomei. Relationship among urban warming in China, the total population of big cities, the total consumptive amount of energy resources and the gross value of industrial output in recent 40 years. *Journal of Nanjing University*, 1994, **30**(1): 238~246
- [9] Kukla G, Gavin J, Karl T R. Urban warming. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1986, **25**: 1265~1270
- [10] Peterson T C. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous united states: no difference found. *J. Climate*, 2003, **16**(18): 2941~2959
- [11] Karl T R, Diaz H F, Kukla G. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record. *J. Climate*, 1988, **1**(11): 1099~1123
- [12] Karl T R, Jones P D, Knight R W, et al. A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, **74**(6): 1007~1023
- [13] 国家统计局人口和社会科技统计司. 中国人口统计年鉴. 中国统计出版社, 2001
Department of Population, Social, Science and Technology Statistics of National Bureau of Statistics of China. *China Population Statistics Yearbook*. China Statistics Press, 2001
- [14] Zhai P, Pan X H. Trends in temperature extremes during 1951~1999 in China. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(17): 1913~1916
- [15] 马柱国, 符淙斌, 任小波, 等. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系. *地理学报*, 2003, **58**(增刊): 11~20
Ma Zhuguo, Fu Congbin, Ren Xiaobo, et al. Trend of annual extreme temperature and its relationship to regional warming in northern china. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58** (Supplement): 11~20
- [16] Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 1997, **297**: 364~367