

任国玉,张雷,卞韬等. 2015. 城市化对石家庄站日气温变化的影响. 地球物理学报, 58(2):398-410, doi:10. 6038/cjg20150205.
Ren G Y, Zhang L, Bian T, et al. 2015. Urbanization effect on change of daily temperature at Shijiazhuang weather station.
Chinese J. Geophys. (in Chinese), 58(2):398-410, doi:10. 6038/cjg20150205.

城市化对石家庄站日气温变化的影响

任国玉^{1,2}, 张雷^{1,2,3}, 卞韬⁴, 任玉玉², 李娇²

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

3 中国气象局 国家气象信息中心, 北京 100081

4 河北省石家庄市气象局, 石家庄 050081

摘要 利用 1962—2011 年逐日平均、最低和最高气温资料, 对比分析了石家庄站和藁城站平均、最低和最高气温的概率分布特征. 石家庄站是我国少有的自建站以来从未迁址的城市气象站, 而附近的藁城站可近似看作乡村气象站. 结果表明: 城市化致使石家庄站 1962—2011 年平均、最低和最高气温的概率密度分布向高温方向偏移, 其中对最低气温分布的影响尤其明显, 对最高气温分布的影响很小; 受城市化影响, 石家庄站最低气温概率密度分布的高温部分增温比低温部分增温更加明显, 最低气温分布形状更加扁平; 相对于 1962—1986 年, 1987—2011 年石家庄站平均、最低和最高气温概率密度分布均向高温方向偏移, 其中最低气温偏移最为明显, 并导致 1962—2011 年整个分析时期最低气温分布出现非正态性; 城市化对石家庄站气温分布的影响在冬、春季比夏、秋季更显著, 最显著的城市化影响出现在冬季最低气温上; 石家庄站基于最低气温的极端气温指数趋势受城市化影响严重, 冷夜日数和暖夜日数的城市化影响分别为 $-1.13 \text{ d}/10 \text{ a}$ 、 $1.48 \text{ d}/10 \text{ a}$, 但基于最高气温的冷昼和暖昼日数等极端气温指数变化趋势受城市化影响不明显. 出现这种现象的主要原因是城市化对最低、最高气温分布的影响存在差异.

关键词 气候变化; 城市化影响; 概率密度; 气温; 石家庄站

doi:10. 6038/cjg20150205

中图分类号 P461

收稿日期 2013-04-26, 2014-12-08 收修定稿

Urbanization effect on change of daily temperature at Shijiazhuang weather station

REN Guo-Yu^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2,3}, BIAN Tao⁴, REN Yu-Yu², LI Jiao²

1 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China

3 National Meteorological Information Center, CMA, Beijing 100081, China

4 Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081, China

Abstract With rapid growth of economy and expansion of cities, urbanization has become a significant factor in affecting the long-term changes of mean and extreme temperature and other key climatic variables at most urban stations of mainland China. So far, this problem has aroused more and more attentions in urbanization effect on mean temperature trends, but the few analysis of urbanization effect on temperature probability density distribution has been done. This article analyzes the urbanization effect on daily temperature probability density distribution (PDF), daily temperature cumulative probability density distribution (CDF) and the seasonal cycles of daily mean temperature for Shijiazhuang weather station without any relocation before 2011 as an example.

This paper uses daily data of T_{mean} , T_{min} and T_{max} of an urban weather station, Shijiazhuang station, and a nearby rural weather station, Gaocheng station, from 1962 to 2011. Shijiazhuang station was never moved before 2011. Urbanization effect (ΔT_{ur}) is defined as the temperature trends or change in daily temperature PDF and CDF of urban station caused by the changing Urban Heat Island (UHI) intensity and/or the effect of other factors (such as aerosols).

The urbanization makes the distribution of annual T_{mean} , T_{min} and T_{max} at Shijiazhuang station during 1962—2011 shift to high temperature side. Urbanization effect on the distribution of annual T_{min} is very obvious, but the effect on the distribution of annual T_{max} is small. Due to the urbanization effect, the increase in T_{min} is larger on high value side than on low value side at Shijiazhuang station, resulting in a flatter shape of annual T_{min} PDF than that of the rural station; The PDF of T_{mean} , T_{min} and T_{max} at Shijiazhuang station all shifts to the higher value side during 1987—2011 compared to 1962—1986, with the largest shift occurring in T_{min} . The PDF of T_{min} at Shijiazhuang station in the time period 1962—2011 is characterized by a non-normal distribution due to the urbanization effect. The difference of PDF between Shijiazhuang station and Gaocheng station during 1962—2011 is larger and more significant in winter and spring than in summer and autumn, and the largest difference is found for winter T_{min} . The urbanization effect in the 1962—2011 series of cold nights and warm nights are respectively $-1.13 \text{ d}/10\text{a}$ and $1.48 \text{ d}/10\text{a}$, and the urbanization contribution are respectively 28.32% and 37.76%. The urbanization effects in the T_{min} -based extreme temperature indices are larger for those in the T_{max} -based extreme temperature indices at Shijiazhuang station. In each of the seasons of a year, the daily mean T_{min} difference between the urban and rural stations is generally more than $1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, with the daily urban heat island intensity, sometimes reaching above $1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, being the largest from the beginning of December to the end of May, and the daily mean T_{max} difference between the urban and rural stations is usually less than $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

The significant urbanization effect on urban station surface air temperature records exists not merely in the linear trends of mean temperature series and extreme temperature indices series, but also in the probability density distribution of daily T_{min} and T_{mean} . It is an important factor in forming the asymmetry changes of diurnal and seasonal temperature cycles for Shijiazhuang station.

Keywords Climate change; Urbanization effect; Probability distribution; Surface air temperature; Shijiazhuang weather station

1 引言

某一确定时期内的气候变量总是围绕着平衡态振荡. 气候从一个平衡态转入另一个平衡态的过程, 表示气候状态发生了变化. 从统计物理学的角度, 对于平衡系统, 热力学变量的“涨落”服从正态分布, 它能够保持宏观系统的热力平衡. 气候系统处于气候常态时, 其变量的随机振动实际就是围绕平衡点的涨落; 但是, 当气候系统发生变化时, 其变量的随机振动将围绕新的平衡点涨落. 气候系统平衡态的漂移必然反映在其相应变量概率分布的变化上, 从而解释了气候概率形成的原因. 因此, 气候概率分布不

单纯是一种经验性描述, 还有其必然的物理基础(丁裕国等, 2009; 张学文和马力, 1992). 许多极端气候研究的指标如“暖冬”、“冷夜”等, 都是基于气温和降水的概率分布. 深入分析气候变量概率分布特征及其变化规律, 是气候变化研究中一项重要的基础工作(Meehl et al., 2000).

研究指出, 20 世纪中期以来全球陆地上日最低、最高气温的分布向高温方向发生了漂移, 最低气温比最高气温漂移更加明显, 从而导致了日较差减小, 气温分布形状也产生了变化(IPCC, 2007; Alexander et al., 2006; Caesar et al., 2006). 最近, Donat 等(2012)比较了全球 1951—1980 年和 1981—2010 年两段时间日最低、最高气温的概率分布, 再

次发现最低、最高气温分布均向高值方向漂移,且最低气温比最高气温变化的更大,指出 20 世纪中期以来全球日气温的分布变得“更加极端”。

对于我国日气温概率分布特征及其变化的事实,已有一些研究(刘吉峰等,2007;程炳岩等,2003;魏凤英,2008)。魏凤英(2008)指出,20 世纪 80 年代末中国冬半年最低气温发生了显著突变,进入异常增暖时期,其增温程度比平均气温明显;全国气候增暖后最低气温的概率分布发生了明显的变化,偏冷的概率显著减小,而偏暖的概率则明显增大。刘学华等(2007)研究表明,1961—2000 年期间我国夏季、春季平均气温不服从正态分布的范围明显增大,冬季不服从正态分布范围在北部增大,南部减小。

但是,对于中国地区近几十年日气温概率分布变化的原因,目前还没有完全搞清楚。一些研究把这种漂移和大气环流的长期演化联系起来(龚道溢和王绍武,1999;何春和何金海,2003);另一些研究认为这种变化是对全球气候变暖的响应,可能与人为造成的大气中温室气体浓度增加有密切联系(IPCC,2007;《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会,2011)。

20 世纪中期以来,亚洲特别是东亚经历了快速的经济发展和城市化,工业耗能不断增加,城市区域迅速扩张,下垫面性质发生剧烈变化,城市热岛效应逐步加强,影响城市附近气象站的地面观测记录(徐祥德等,2003)。城市化对平均气温序列的影响得到很多研究的证实(Karl et al., 1988; Choi et al., 2003; Fujibe, 2009; Ren et al., 2008; 初子莹和任国玉, 2005; 王郁和胡非, 2006; 刘学锋等, 2005)。这些研究结果暗示,城市化对陆地区域地面气温概率分布可能也具有明显的影响。季崇萍等(2006)研究发现,北京夜间城市热岛强度明显大于日间,说明北京站记录到的夜间最低气温上升在一定程度上是城市热岛强度增加的结果。周雅清和任国玉(2009)利用华北地区 255 个气象站资料,分析了 1961—2000 年城市化对各类气象台站平均最高和最低气温变化趋势的影响,发现国家基本、基准站观测的年平均最低气温上升趋势中,城市化造成的增温为 $0.20^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,对全部增温的贡献率达 52.6%,从一个较大区域尺度上证明了最低气温观测记录中存在着十分明显的城市化影响。张雷等(2011)发现,北京观象台近 50 年基于最低气温记录的极端气温事件频率变化受城市化影响非常显著。

城市化因素可能对我国多数城市站地面平均和

极端气温观测记录产生了显著影响。到目前为止,尽管对这个问题已引起越来越多的重视,但对于单站和多站地面气温概率密度分布中的城市化影响分析很少。由于迁站等因素会造成台站资料的非均一性(Yan et al., 2001; Yan et al., 2010),因此本文选择自建站以来没有迁站经历的石家庄站作为研究对象,利用 1962—2011 年期间典型大城市站石家庄站和附近小城镇站藁城站日平均、最低和最高气温资料,对比分析其气温的概率密度分布差异,并对石家庄站地面气温概率分布变化中的城市化影响进行初步调查。

2 资料和方法

所用资料为石家庄和藁城气象站 1962—2011 年逐日平均、最低和最高气温。石家庄站是国家基本气象站,而藁城站为国家一般气象站。气温资料由石家庄市气象局业务科进行了质量控制,订正了由于人为因素造成的错误值。

石家庄站自建站至今没有迁站,观测站位于城市的西部。20 世纪 80 年代初以前,观测站远离城市建成区,周围环境空旷,建筑物很少;80 年代初以来,石家庄城市化进程加速,观测站附近建筑物逐渐增多,目前已成为一个典型的城市观测站。

作为乡村站的藁城站选取综合考虑了台站迁站次数、人口数量和观测场高度等因素(任国玉等, 2010)。这个站位于石家庄市东部,海拔高度为 53.5 m,与市区站高度 81.0 m 比较接近(表 1),无须做高度订正,减少了分析误差。藁城站所在县城人口密度小,经济发展相对缓慢,观测场周围的探测环境受城镇化影响较弱,可看作为石家庄地区最具有代表性的“乡村站”。该站 1999 年 1 月迁移 1 次,但统计检验未发现明显断点,因此本文没有做均一化订正。之所以选取藁城站一个站作为参考站,而不是如先前研究选取 4 个乡村站平均序列作为参考序列(卞韬等, 2012),是因为多站记录平均后平滑了时间序列和极值,不宜用来与石家庄站做气温概率分布特征的比较分析。

气象台站分布情况见图 1,其基本信息列于表 1。人口信息来自国家统计局(中国统计局, 2002)。季节划分的方法:1, 2 月和上年 12 月为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季。

采用标准偏度系数和峰度系数描述气温概率分布形态特征(魏凤英, 2007)。其中,标准偏度系数为

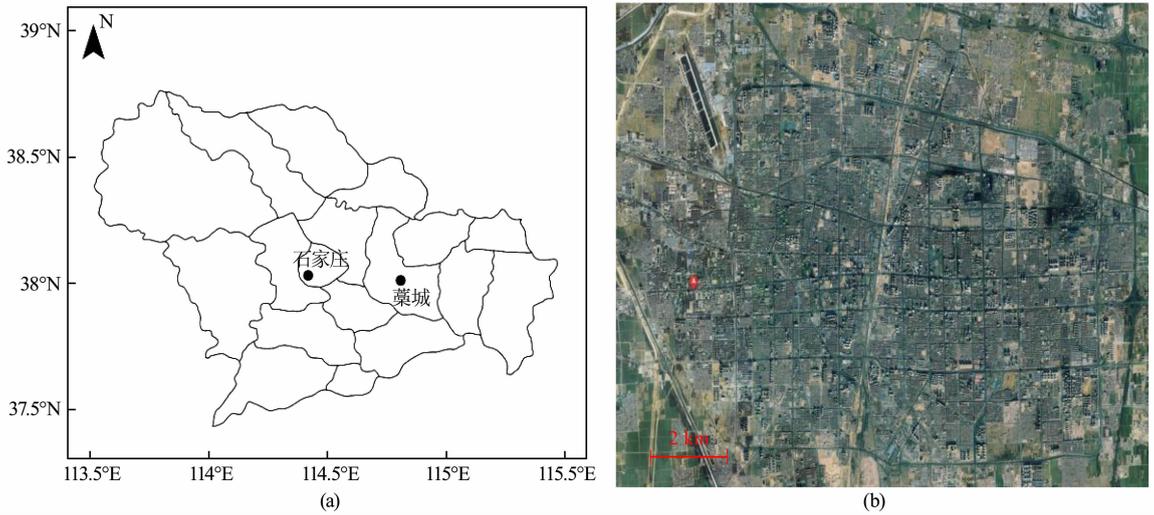


图 1 (a) 石家庄站和藁城站的位置; (b) 石家庄站在城市中的位置
 Fig. 1 (a) Locations of Shijiazhuang and Gaocheng weather stations;
 (b) Location of Shijiazhuang weather station in the city

表 1 石家庄地区气象站信息

Table 1 Information of weather stations in Shijiazhuang

台站号	站点	经度(°E)	纬度(°N)	海拔高度(m)	迁站情况	台站类型	常住人口(10 ³)
53698	石家庄	114.42	38.03	81.00	无	基本站	1870
53697	藁城	114.81	38.01	53.50	1999-01-01	一般站	119

$$g_1 = \sqrt{\frac{1}{6n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3}, \quad (1)$$

标准峰度系数为

$$g_2 = \sqrt{\frac{n}{24} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - 3 \right]}. \quad (2)$$

标准偏度系数意义为样本频率 $f(x)$ 与正态分布概率密度 $p(x)$ 相比较, 当 g_1 为正时, 表明 $f(x)$ 的顶峰相对于 $p(x)$ 的顶峰偏左, 称为正偏度; 当 g_1 为负时, 表明 $f(x)$ 的顶峰相对于 $p(x)$ 的顶峰偏右, 称为负偏度; 当 g_1 为 0 时, $f(x)$ 的顶峰与 $p(x)$ 的顶峰重合, 图形对称. 标准峰度系数意义: $f(x)$ 与 $p(x)$ 相比较, 当 g_2 为正时, 表明 $f(x)$ 的坡度相对于 $p(x)$ 的坡度偏陡; 当 g_2 为负时, 表明 $f(x)$ 的坡度相对于 $p(x)$ 的坡度偏缓; 当 g_2 为 0 时, $f(x)$ 的坡度与 $p(x)$ 的坡度相同. 由此可见, 当 g_1 和 g_2 都为 0 时, $f(x)$ 与 $p(x)$ 完全重合, 用正态分布概率密度函数模拟其分布效果最好.

采用利氏 (Lillifors) 检验方法对样本进行正态性检验, 显著性水平为 0.05, 通过检验的即认为此样本遵从正态分布. 样本的概率密度分布采用核密度估计方法, 累积概率分布采用经验分布函数计算

方法(何正风等, 2012).

极端气温指数是基于最低、最高气温分布计算得到的, 因此气温分布的变化直接影响极端气温事件的统计结果. 表 2 列出了本文所采用的极端气温指数 (IPCC, 2007). 这些指数由气候变化检测、监测和指标专家组 (ETCCDMI, Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices) 定义, 气候参考期选取为 1971—2000 年. 设 $\{T_{ij}\}$ 为气温的观测数据集, 其中, $i=1, 2, \dots, 366$, 代表一年中的日序数; $j=1971, 1972, \dots, 2000$, 代表所选取参考期的年序数. 对于给定的某日 i , 取参考期各年第

表 2 极端气温指数的定义

Table 2 The definition of extreme temperature indices

指数名称	代码	定义	单位
冷夜日数	TN10p	在 j 时期内第 i 日的最低气温 $T_{n_{ij}}$ 小于 10% 分位数 (以每滑动 5 日为中心)	d
暖夜日数	TN90p	在 j 时期内第 i 日的最低气温 $T_{n_{ij}}$ 大于 90% 分位数 (以每滑动 5 日为中心)	d
冷昼日数	TX10p	在 j 时期内第 i 日的最高气温 $T_{s_{ij}}$ 小于 10% 分位数 (以每滑动 5 日为中心)	d
暖昼日数	TX90p	在 j 时期内第 i 日的最高气温 $T_{s_{ij}}$ 大于 90% 分位数 (以每滑动 5 日为中心)	d

$i-2, i-1, i, i+1, i+2$ 日的值, 构成一个样本数为 $5 \times 30 = 150$ 的子集, 基于该子集所逼近的概率分布, 可以推算其第 10(90)百分位值, 并作为 i 日极端气温事件的阈值. 如果某年第 i 日的观测值落在该阈值区间之外, 就定义了一个极端气温事件.

城市热岛强度: 指由于城市热岛效应等因素引起的城乡之间气温的差异, 用 ΔT 表示. 城市热岛强度的表达式为

$$\Delta T = T_u - T_r, \quad (3)$$

其中 T_u 为城市站的气温, T_r 为乡村站的气温.

为了定量评价城市化对极端气温指数变化趋势的影响, 参照初子莹和任国玉(2005)、周雅清和任国玉(2009)定义如下术语:

城市化影响: 指由于城市热岛效应加强等因素引起的城市附近台站极端气温指数序列的线性趋势变化, 或者气温概率分布特征参数的变化. 在前一种情形下, 城市化影响用 ΔX_{ur} 表示. 设 X_u 为城市站极端气温指数的变化趋势, X_r 为乡村站极端气温指数的变化趋势, 则城市化影响(ΔX_{ur})为

$$\Delta X_{ur} = X_u - X_r, \quad (4)$$

当 $\Delta X_{ur} > 0$ 时, 表示城市化影响使极端气温指数上升或增加; 当 $\Delta X_{ur} = 0$ 时, 表示城市化影响为 0; 当 $\Delta X_{ur} < 0$ 时, 表示城市化影响使极端气温指数下降或减少.

城市化贡献率: 指城市化影响对城市附近台站极端气温指数趋势变化的贡献率, 即城市化影响在城市附近台站极端气温指数趋势变化中所占的百分比, 用 E_u 表示, 其表达式为

$$E_u = |\Delta X_{ur} / X_u| \times 100\% \\ = |(X_u - X_r) / X_u| \times 100\%, \quad (5)$$

当 $E_u = 0$ 时, 表示城市化对城市站极端气温指数的变化趋势没有贡献; 当 $E_u = 100\%$ 时, 表示城市

站极端气温指数的变化完全是由城市化影响造成的. 实际计算当中, 少数情况下 E_u 可能超过 100% , 说明可能存在某种尚未认清的局地因子影响, 但这种情况均按 100% 处理. 如果城市化影响没有通过显著性检验, 就不进行城市化贡献率的计算.

3 结果分析

3.1 近 50 年城乡站气温概率分布特征对比

表 3、图 2 和图 3 分别给出了石家庄站和藁城站 1962—2011 年平均、最低、最高气温的分布特征值、概率密度分布曲线和累积概率密度分布曲线. 除了石家庄站最低气温分布型是非正态的, 其他气温的分布均为正态, 通过了 0.05 水平的显著性检验. 石家庄站和藁城站年最低、平均气温的峰度系数均

表 3 1962—2011 年石家庄(城)站、藁城(乡)站
年平均、最低和最高气温分布特征值

Table 3 The characteristic values of annual T_{mean} , T_{min} , T_{max} probability distributions at Shijiazhuang (urban) station and Gaocheng (rural) station during 1962—2011

	T_{mean}		T_{min}		T_{max}	
	藁城	石家庄	藁城	石家庄	藁城	石家庄
偏度	-0.24	0.13	0.29	0.73	-2.28	-2.04
峰度	-0.13	-0.99	-0.21	-1.78	1.32	0.39
分布型	正态	正态	正态	非正态	正态	正态
T 均值	12.86	13.52	7.54	8.62	19.03	19.28
δ 标准差	0.62	0.78	0.78	1.08	0.64	0.66
10% 分位值	11.92	12.33	6.37	7.03	18.06	18.29
90% 分位值	13.64	14.62	8.57	10.23	19.81	20.08

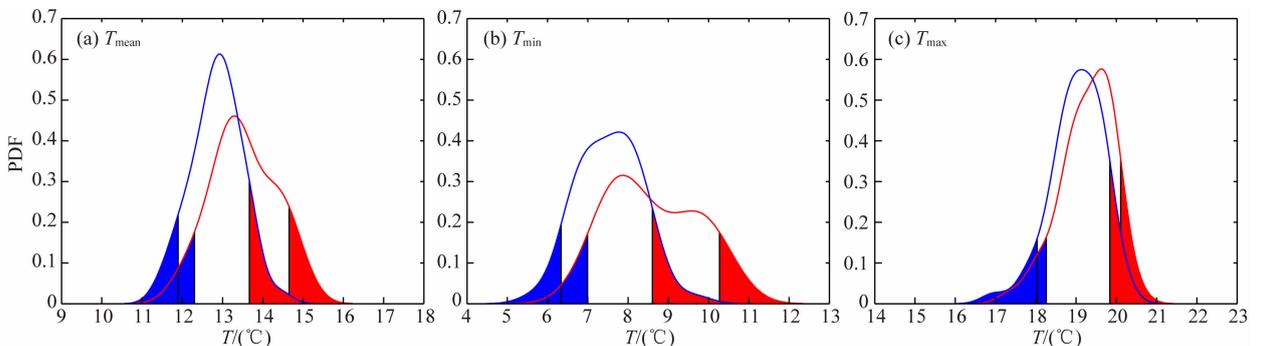


图 2 1962—2011 年石家庄站(红线)和藁城站(蓝线)年平均、最低和最高气温概率密度分布
(蓝色区域 $\leq 10\%$ 分位值, 红色区域 $\geq 90\%$ 分位值)

Fig. 2 The PDF of annual T_{mean} , T_{min} , T_{max} at Shijiazhuang station (red lines) and Gaocheng station (blue lines) during 1962—2011 (The value of blue area $\leq 10\%$ percentile, the value of red area $\geq 90\%$ percentile)

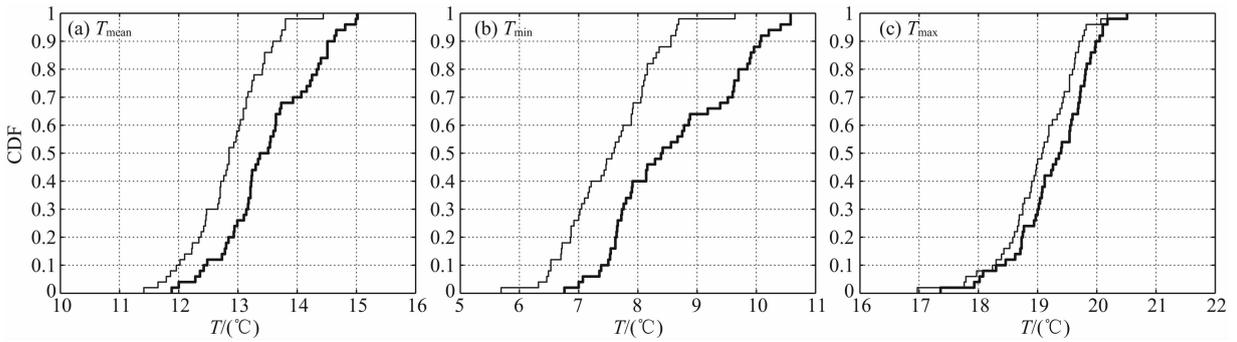


图3 1962—2011年石家庄站(粗线)和藁城站(细线)年平均、最低和最高气温累积概率密度分布

Fig. 3 The CDF of annual T_{mean} , T_{min} , T_{max} at Shijiazhuang station (thick lines) and Gaocheng station (thin lines) during 1962—2011

为负值,最高气温的峰度系数均为正值,且石家庄站的峰度系数值小于藁城站(表3),说明最低、平均气温的分布相对最高气温的分布形状扁平,且石家庄站比藁城站的分布更为扁平,并明显偏向于高温方向(图2)。从图3可以看出,石家庄站与藁城站最低气温在相同累积概率时的差值明显大于最高气温的差值,并在最低气温的高温部分差值最大。

与藁城站相比,石家庄站50年平均、最低、最高气温的均值以及第10和第90百分位值均偏高,最低气温第10和第90百分位值偏高最为明显,而最高气温城乡站的这种差别很小。

从城乡站的对比结果可以看出,城市化使石家庄站平均、最低、最高气温的分布均偏向于高温方向,对最低气温的影响非常明显,但对最高气温的影响很小。城市化使石家庄站最低气温的高温部分增温比低温部分的增温更加明显,其概率密度分布形状更加扁平。

图4给出了1962—2011年石家庄地区城乡气象站四季平均、最低、最高气温的概率密度分布。可以看出,城市化使石家庄站四季平均、最低和最高气温的分布均偏向高温方向,对最低气温的影响非常明显,但对最高气温的影响很小。石家庄与藁城站的差异在冬、春季要比夏、秋季表现的更明显,最大的差异出现在冬季最低气温的分布上。夏季的气温分布表现的较“陡”,冬季气温分布表现的较“缓”,说明夏季气温值比较集中。

3.2 前后时期城市站气温概率分布对比

表4、图5和图6给出了石家庄站1962—1986和1987—2011年前、后各25年平均、最低、最高气温的分布特征值、概率分布曲线和累积概率分布曲线。石家庄站前、后时段气温的分布均为正态型,通过了0.05显著性检验。后25年平均、最低、最高气

温的分布均向高温方向移动,最低气温尤其明显(图5)。从图6可以看出,石家庄站后25年与前25年最低气温相同累积概率时的差值明显大于最高气温的差值,对于最低气温高温部分的差值大于低温部分的差值,因此图5b表现出后25年最低气温分布形状更为扁平。前后25年最低气温分布的显著差异是造成1962—2011年最低气温分布呈非正态性的主要原因。

后25年与前25年比较,石家庄站平均、最低、最高气温的第10和第90百分位值均出现了上升,最低气温第10和第90百分位值上升尤为明显,而最高气温第10和第90百分位值的上升幅度相对较小。

图7给出了1962—1986和1987—2011年石家庄站四季平均、最低、最高气温的概率密度分布。从两时期的对比可以看出,后25年石家庄站四季平

表4 1962—1986、1987—2011年石家庄站年平均、最低和最高气温分布特征值

Table 4 The characteristic values of annual T_{mean} , T_{min} , T_{max} probability distributions at Shijiazhuang weather station during 1962—1986 and 1987—2011

	T_{mean}		T_{min}		T_{max}	
	1962—1986	1987—2011	1962—1986	1987—2011	1962—1986	1987—2011
偏度	-0.99	-0.34	0.17	-0.92	-1.14	-0.51
峰度	-0.50	-1.13	0.06	-0.66	-0.36	-0.75
分布型	正态	正态	正态	正态	正态	正态
T 均值	12.95	14.10	7.72	9.52	19.01	19.55
δ 标准差	0.50	0.57	0.44	0.70	0.69	0.50
10% 分位值	12.14	13.14	7.06	8.29	17.86	18.74
90% 分位值	13.57	14.90	8.37	10.54	19.91	20.24

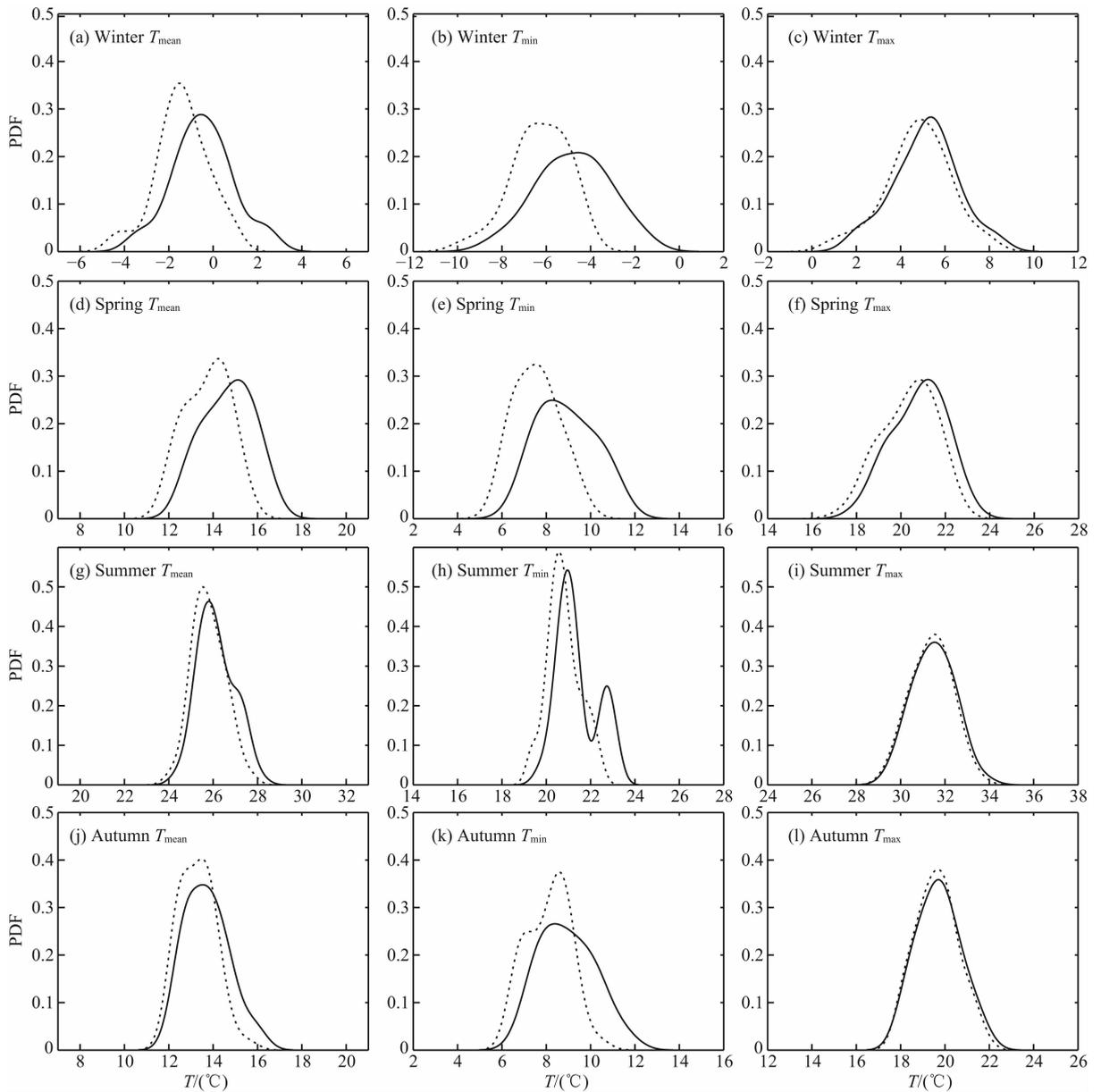


图 4 1962—2011 年石家庄站(实线)和藁城站(虚线)四季平均、最低和最高气温概率密度分布

Fig. 4 The PDF of seasonal T_{mean} , T_{min} , T_{max} at Shijiazhuang station (solid lines) and Gaocheng station (dashed lines) during 1962—2011

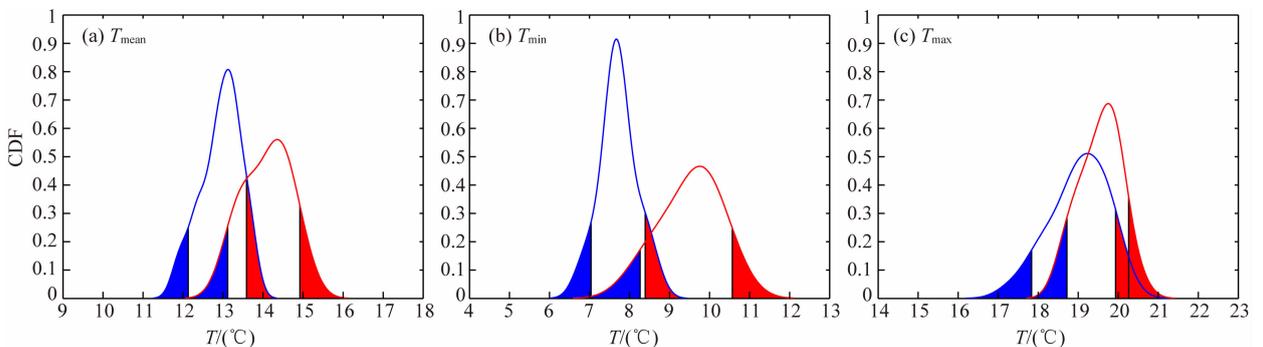


图 5 1962—1986(蓝线)、1987—2011(红线)年石家庄站年平均、最低和最高气温概率密度分布 (蓝色区域 $\leq 10\%$ 分位值,红色区域 $\geq 90\%$ 分位值)

Fig. 5 The PDF of annual T_{mean} , T_{min} , T_{max} at Shijiazhuang station during 1962—1986 (blue lines) and 1987—2011 (red lines) (The value of blue area $\leq 10\%$ percentile, and the value of red area $\geq 90\%$ percentile)

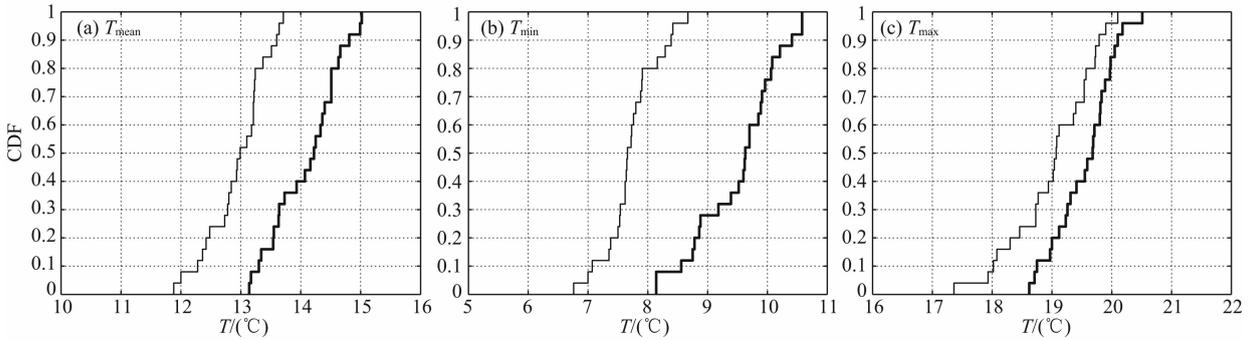


图 6 1962—1986(细线)、1987—2011(粗线)年石家庄站年平均、最低和最高气温累积概率密度分布

Fig. 6 The CDF of annual T_{mean} , T_{min} , T_{max} at Shijiazhuang station during 1962—1986 (thin lines) and 1987—2011 (thick lines)

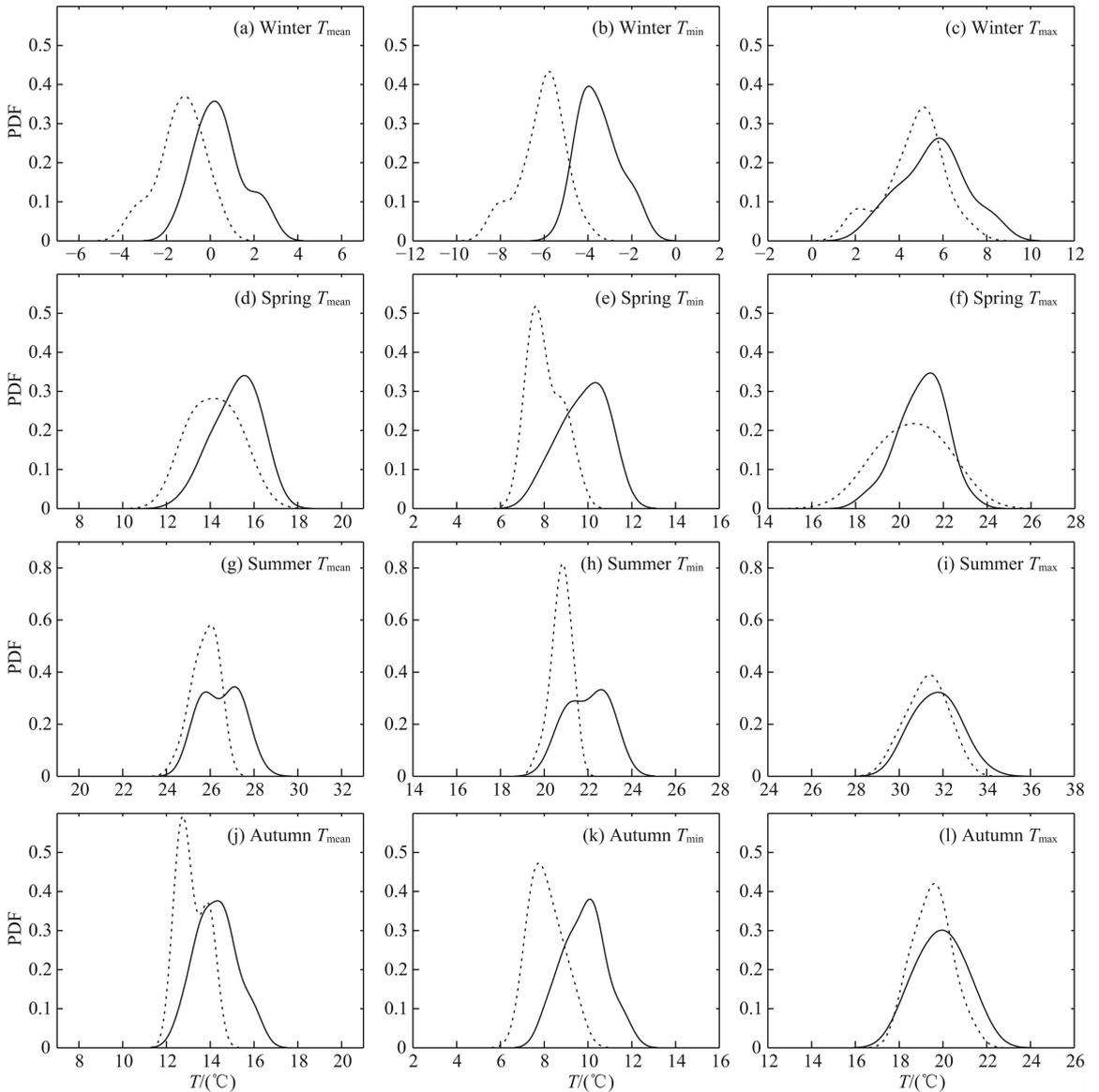


图 7 1962—1986(虚线)、1987—2011(实线)年石家庄站四季平均、最低和最高气温概率密度分布

Fig. 7 The PDF of seasonal T_{mean} , T_{min} , T_{max} at Shijiazhuang station during 1962—1986 (dashed lines) and 1987—2011 (solid lines)

均、最低和最高气温的分布均向高温方向移动,最低气温的漂移非常明显,最高气温的变化很小.夏、秋季的气温分布表现的较“陡”,冬、春季气温概率分布表现的较“缓”,说明夏、秋季日气温观测值相对集中,冬、春季日气温观测值相对离散.

石家庄站后 25 年与前 25 年气温概率分布的显著差异,主要是快速的城市化和不断增加的城市热岛强度影响的结果,与近 50 年石家庄站与藁城站气温概率分布特征的明显差异一起,证实 20 世纪 80 年代以来城市快速发展对石家庄站附近地面气温有重要影响.

3.3 城市站日平均城市热岛强度和极端气温事件变化

图 8 表示 1962—2011 年石家庄站和藁城站平均、最低和最高气温逐日 50 年平均值及城市热岛强度.可以看出,石家庄站和藁城站之间平均最低气温的差别较大,城市站平均最低气温始终在藁城站之上,其差值一般在 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上;但两站平均日最高气温曲线之间的差别较小,两条曲线几近重合,其差值通常不足 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;两站平均气温之间的差别介于最低、最高气温之间.图 8 还表明,石家庄站城市热岛强度在每年 12 月初到次年 5 月末最大,其中最低气温的平均热岛强度可达 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,日平均气温的差值在 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而最高气温平均差值仅有 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;每年 6 月初至 10 月底,两站 50 年平均的日气温差异或石家庄站城市热岛强度明显减弱,其中最低气温的平均差值仅维持在 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,日平均气温的差值不足 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而最高气温平均差值更小,11 月初以后各项日气温曲线逐渐上升.总体上,石家庄站冬季的日平均城市热岛强度要明显大于夏季和秋季,最低气温和平均气温的日平均城市热岛强度明显大于最高气温.

表 5 和图 9 给出 1962—2011 年石家庄站和藁

表 5 1962—2011 年石家庄站和藁城站
极端气温指数变化趋势(单位: d/10a)

Table 5 Trends of extreme temperature indices of
Shijiazhuang and Gaocheng weather stations
during 1962—2011 (Unit: d/10a)

线性趋势	冷夜日数	暖夜日数	冷昼日数	暖昼日数
石家庄站	-3.99**	3.92**	-0.82*	0.74*
藁城站	-2.86**	2.44**	-0.70*	0.86*
城市化影响	-1.13**	1.48**	-0.12	-0.12
城市化贡献率(%)	28.32	37.76	—	—

注: * 表示通过 0.05 的显著性检验; ** 表示通过 0.01 的显著性检验.

城站极端气温指数的变化趋势及石家庄站极端气温指数序列中的城市化影响.石家庄站和藁城站年极端气温指数序列中,暖夜日数、暖昼日数等高温事件频数呈增加趋势,冷夜日数、冷昼日数等低温事件频数呈减少趋势.基于最低气温记录的暖夜日数、冷夜日数的变化趋势比基于最高气温记录的暖昼日数、冷昼日数的变化趋势更明显,且两站暖夜日数和冷夜日数的变化趋势均通过了 0.01 水平的显著性检验.

石家庄站暖夜日数、冷夜日数时间序列中的城市化影响较大,分别达到 $1.48\text{ d}/10\text{ a}$ 和 $-1.13\text{ d}/10\text{ a}$,均通过了 0.01 水平的显著性检验,相应城市化贡献率分别为 37.76% 和 28.32%;而暖昼日数、冷昼日数时间序列中的城市化影响很小,均为 $-0.12\text{ d}/10\text{ a}$,未通过 0.05 水平的显著性检验.此现象与前文分析城市化对气温概率分布影响的结论是一致的,即城市化使最低、最高气温的分布均向高温方向移动,对最低气温的影响非常明显,但对最高气温的影响很小.

4 讨论

目前分析城市化对单站或区域气温概率分布影响的工作还很少.对陆地区域平均最低、最高气温变化的分析发现,地面气温的上升是不对称的,最低气温上升很明显,而最高气温上升趋势较弱,地面气温长期趋势变化的这种“非对称性”现象在国内外的数量研究中得到证实(翟盘茂和任福民,1997;陈正洪等,2007;Zhou and Ren,2011).陈正洪等(2007)发现 1961—2000 年城市热岛效应导致武汉站的年平均最低气温增加速率比最高气温增加速率快近 1 倍,热岛增温贡献率均在 70% 以上.周雅清和任国玉(2009)发现,1961—2000 年城市化对华北地区各类城市台站和国家基准气候/基本气象站平均最高气温变化趋势的影响微弱,但对平均最低气温变化趋势的影响非常明显.卞韬等(2012)发现石家庄站 1962—2009 年地面气温序列中年平均、最低和最高气温的城市化影响分别为 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,城市化对最低气温的影响比最高气温的影响更加明显.

本文对石家庄站的分析结果,进一步从城乡站对比和城市站前后不同阶段气温概率分布差异的角度印证了前人(陈正洪等,2007;卞韬等,2012)的研究结论,表明城市化对典型城市站最低气温概率分布的影响比最高气温大得多,对平均气温概率分布的影响也比较大,致使气温分布出现明显的“非对称

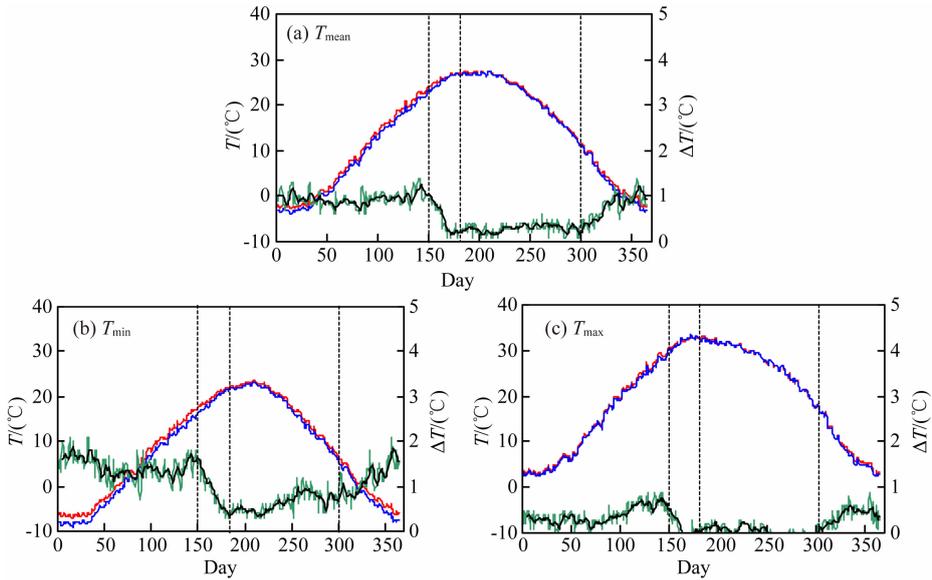


图 8 1962—2011 年石家庄站(红线)和藁城站(蓝线)平均、最低和最高气温逐日 50 年平均值及城市热岛强度(绿线), 黑实线为 5 日滑动曲线, 黑色虚线表示第 150、180 和 300 天

Fig. 8 The 50a means of daily T_{mean} , T_{min} , T_{max} at Shijiazhuang station (red lines) and Gaocheng (blue lines) station and the urban heat island intensity (green lines) during 1962—2011. The black solid lines are 5-day moving-averages, and the black dashed lines indicate the 150th, 180th and 300th days

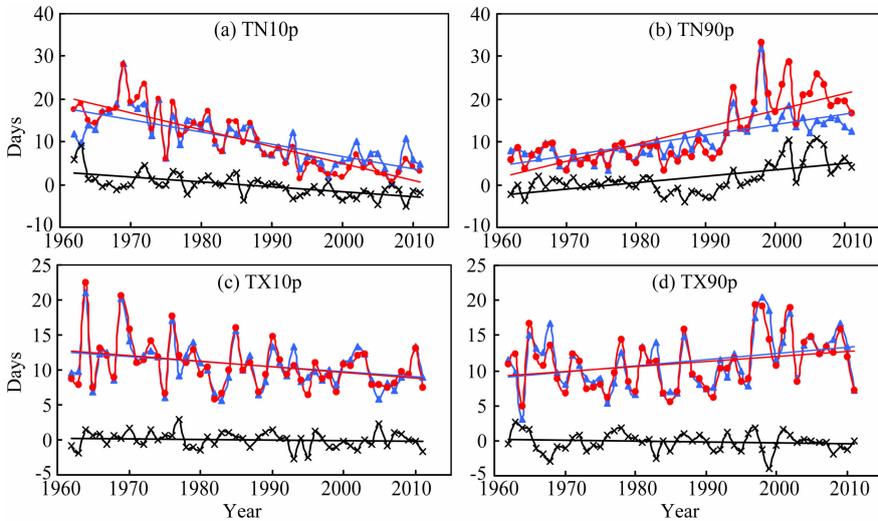


图 9 1962—2011 年石家庄站(红线)、藁城站(蓝线)年极端气温指数和两站的差值序列(黑线), 实线为趋势线

Fig. 9 The annual extreme temperature indices of Shijiazhuang station (red lines), Gaocheng (blue lines) station and the difference series (black lines) between the two stations during 1962—2011. The solid lines show the linear trends

性”变化。周雅清和任国玉(2009)针对华北地区高密度分布台站的分析结论与本文结果非常相似, 均表明 1960 年以来平均最高气温序列中的城市化影响很弱, 而平均最低气温序列中的城市化影响则十分明显。因此, 先前研究反复证实的气温“非对称性”变化现象, 主要与城市化对我国华北等地区常规观测站网中城镇站地面最低气温的明显增温效应有关。

城市化对石家庄站最低气温概率分布产生了明显的影响, 而对最高气温分布的影响很小。造成这种气温“非对称性”变化现象的一个主要原因是, 城市发展通过改变了城市建成区下垫面辐射特性, 致使地-气感热通量增加, 潜热通量减少, 白天吸收(反射)的太阳辐射增多(减少), 夜晚发射的地面长波辐射增加, 近地面气温升高, 夜间气温上升尤其明显。

即产生城市热岛效应;城市区域高强度的人为热释放也增加了建成区夜间变暖幅度.此外,日落后郊区近地面大气降温速率和幅度远大于城区近地面大气;日出后太阳辐射的加热作用引起郊区近地面大气升温速率和幅度大于城区近地面大气,同时大气稳定度减弱、大气逆温消失、地面风速增加(李兴荣等,2007a,2007b;郑祚芳等,2006),也有助于削弱白天的城市热岛强度.随着城市不断扩大和城市热岛效应加强,城市气象站附近感受到的城市热岛效应也将日益显著,其造成的不断增强的日夜气温非对称性致使石家庄站最低气温上升迅速,而最高气温上升缓慢.另一个可能影响因子是城乡站上空气溶胶的差异,白天城市内和近郊区更高浓度的气溶胶减弱了太阳直接辐射和总辐射,可能在一定程度上削弱甚至完全抵消了城市热岛效应的增温作用,致使由于城市热岛效应加强因素引起的相对不明显的最高气温上升幅度进一步减小,而夜间城市上空的气溶胶则减弱了石家庄站附近的外逸地面长波辐射和冷却效应,在增强的城市热岛效应基础上,进一步增加了最低气温的上升速率.

石家庄站与藁城站年内逐日平均、最低和最高气温 50 年平均值的差值可以反映石家庄站附近相对城市热岛强度的季节性特征.较大的差值出现在最低气温以及冬春季,夏秋季日平均城市热岛强度处于较低的水平,最高气温在 9~10 月几乎没有表现出城市热岛效应影响.石家庄站附近城市热岛强度的这种季节性变化特征,与先前许多有关北方特大城市热岛强度季节变化的分析结果基本一致(郑祚芳等,2006;董妍等,2011;Yang et al.,2013).6 月初开始城市热岛强度明显减弱,以及 11 月初开始城市热岛强度再次变得明显,可能在很大程度上与石家庄地区雨季的开始和结束有关,冬季供暖期结束和开始可能也在一定程度上对这种快速季节转换造成了影响.

值得提出的是,藁城站不是典型的乡村站,其地面气温观测记录在一定程度上仍受到城市化的影响.因此,本文获得的城市化对石家庄站地面日气温概率分布以及城市热岛强度和极端气温事件频数变化影响的估计值,是相对的,也是保守的,实际的影响程度应该更大.另一方面,石家庄站也不处于城市中心区域,本文分析得到的城市化对石家庄站地面日气温及其变化影响的估计值,不代表石家庄城市中心地带的城市化影响.

极端气温指数是根据气温分布的尾端部分来定

义的.城市化对极端气温指数序列趋势变化的影响研究(张雷等,2011;Zhou and Ren,2011),与城市化对气温概率分布参数演化影响研究具有异曲同工之处,今后应同时给予重视.

5 结论

城市化使石家庄站 1962—2011 年全年和四季的平均、最低和最高气温分布均偏向于高温方向,对最低气温分布的影响非常明显,但对最高气温分布的影响很小.受城市化影响,石家庄站年最低气温的高温部分增温比低温部分的增温更加明显,年最低气温概率密度分布形状更加扁平.石家庄站与藁城站的差异在冬、春季要比夏、秋季表现的更明显,最大的差异出现在冬季最低气温的分布上.

相对于 1962—1986 年,在 1987—2011 年期间石家庄站全年和四季的平均、最低和最高气温分布均向高温方向移动,最低气温分布的漂移尤其明显.后 25 年最低气温的高温部分增温比低温部分增温更明显,但对于最高气温这种前后时期的差别不显著.相对于前 25 年,石家庄站后 25 年最低气温的概率密度分布向高温方向明显偏移,可能是造成该站 1962—2011 年最低气温分布呈现非正态性的主要原因.前后时期最大的差异出现在冬季最低气温的分布上.这种前后时期气温分布的差异类似于石家庄站和藁城站气温分布之间的差异,反映了石家庄城市化对地面气温观测记录不断增强的影响.

近 50 年石家庄站和藁城站年内日平均最低气温的差值一般在 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,日平均最高气温的差值通常不足 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,日平均气温之间的差异介于最低、最高气温之间.石家庄站城市热岛强度在每年 12 月初到次年 5 月末最大,其中最低气温平均可达 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而最高气温平均仅有 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;每年 6 月初至 10 月底,石家庄站城市热岛强度较小.

1962—2011 年期间,石家庄站和藁城站的暖夜日数、暖昼日数等高温事件频数增加,冷夜日数、冷昼日数等低温事件频数减少.石家庄站冷夜日数和暖夜日数的城市化影响分别为 $-1.13\text{ d}/10\text{ a}$ 和 $1.48\text{ d}/10\text{ a}$,相应的城市化贡献率为 28.32% 和 37.76% .城市化对基于最低气温的极端气温指数影响明显,对基于最高气温的极端气温指数影响较小.这种现象出现的主要原因是城市化对最低、最高气温分布的影响存在差异.

References

- Alexander L V, Zhang X, Pererson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 111(D5), D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.
- Bian T, Ren G Y, Zhang C H, et al. 2012. Characteristics and change of urban heat island intensity in Shijiazhuang. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition* (in Chinese), 4(5): 402-408.
- Caesar J, Alexander L, Vose R. 2006. Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures; Creation and analysis of a new gridded data set. *J. Geophys. Res.*, 111(D5), D05101, doi: 10.1029/2005JD006280.
- Chen Z H, Wang H J, Ren G Y. 2007. Asymmetrical Change of Urban Heat Island Intensity in Wuhan, China. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 3(5): 282-286.
- Cheng B Y, Ding Y G, He J X. 2003. The influence of the global warming on probabilities of regional extreme temperatures. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 19(4): 429-435.
- China Statistic Bureau. 2002. Population Data of China Towns and City Districts (in Chinese). Beijing: China Statistic Press.
- Choi J, Chung U, Yun J I. 2003. Urban-effect correction to improve accuracy of spatially interpolated temperature estimates in Korea. *J. Appl. Meteor.*, 42(12): 1711-1719.
- Chu Z Y, Ren G Y. 2005. Effect of enhanced urban heat island magnitude on average surface air temperature series in Beijing region. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 63(4): 534-540.
- Ding Y G, Shen H Y, Jiang Z H, et al. 2009. Advances in theory and application of climatic probability distribution. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 37(3): 257-262.
- Donat M G, Alesander L V. 2012. The shifting probability distribution of global daytime and night-time temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, 39(14), L14707, doi: 10.1029/2012GL052459.
- Dong Y, Li X M, Yang Y C, et al. 2011. Distributive characters of urban heat island effect in Xi'an City. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (in Chinese), 25(8): 107-112.
- Fujibe F. 2009. Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan. *Int. J. Climatol.*, 29(12): 1811-1822.
- Gong D Y, Wang S W. 1999. Long-term variability of the Siberian high and the possible connection to global warming. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 54(2): 125-133.
- He C, He J H. 2003. Relation between arctic oscillation and north China air temperature in Winter. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 26(1): 1-7.
- He Z F, Zhang D F, Zhou P, et al. 2012. MATLAB Probability and Mathematical Statistics Analysis (in Chinese). Beijing: China Machine Press.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group One to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D H, Manning M, et al eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Ji C P, Liu W D, Xuan C Y. 2006. Impact of urban growth on the heat island in Beijing. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49(1): 69-77, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.010.
- Karl T R, Diaz H F, Kukla G. 1988. Urbanization: its detection and effect in the United States climate record. *J. Climate*, 1(11): 1099-1123.
- Li X R, Hu F, Shu W J. 2007a. Analysis and numerical simulation of summer strong Urban Heat Island in Beijing. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 33(6): 25-31.
- Li X R, Hu F, Shu W J. 2007b. Research on the characteristics of Beijing winter UHI and the influencing factors of a strong UHI and a weak one. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 24(4): 431-438.
- Liu J F, Ding Y G, Jiang Z H. 2007. The influence of aggravated global warming on the probability of extreme climatic event. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 26(4): 837-842.
- Liu X F, Yu C W, Ren G Y. 2005. Change in urban heat island magnitude and its effect on surface mean air temperature record in Hebei province, China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10(4): 763-770.
- Liu X H, Wang L J, Wu H B. 2007. Probability distribution of mean daily temperature and inter-decadal variation in China in recent 40 years. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12(6): 779-787.
- Meehl G A, Karl T, Easterling D R, et al. 2000. An introduction to trends in extreme weather and climate events; observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81(3): 413-416.
- Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. 2008. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. *J. Climate*, 21(6): 1333-1348.
- Ren G Y, Zhang A Y, Chu Z Y, et al. 2010. Principles and procedures for selecting reference surface air temperature stations in China. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 38(1): 78-85.
- The Panel of the Second National Assessment Report of Climate Change. 2011. The Second National Assessment Report of Climate Change (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Wang Y, Hu F. 2006. Variations of the urban heat island in summer of the recent 10 years over Beijing and its environment effect. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49(1): 61-68, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.009.
- Wei F Y. 2007. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Forecasting Technology (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press.
- Wei F Y. 2008. Probability distribution of minimum temperature in Winter half years in China. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 4(1): 8-11.
- Xu X D, Bian L G, Ding G A. 2003. Engineering Techniques and

- Principles in Urban Atmospheric Environmental Observation (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press.
- Yan Z W, Li Z, Li Q X, et al. 2010. Effects of site-change and urbanisation in the Beijing temperature series 1977—2006. *Int. J. Climatol.*, 30(8): 1226-1234.
- Yan Z W, Yang C, Jones P D. 2001. Influence of inhomogeneity on the estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(3): 309-322.
- Yang P, Ren G Y, Liu W D. 2013. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52(8): 1803-1816.
- Zhai P M, Ren F M. 1997. On changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 55(4): 418-429.
- Zhang L, Ren G Y, Liu J, et al. 2011. Urban effect on trends of extreme temperature indices at Beijing Meteorological Station. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(5): 1150-1159, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.002.
- Zhang X W, Ma L. 1992. Entropy Meteorology (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press.
- Zheng Z F, Liu W D, Wang Y C. 2006. Distributive Character of urban heat island effect in the Beijing region. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 29(5): 694-699.
- Zhou Y Q, Ren G Y. 2009. The effect of urbanization on maximum, minimum temperatures and daily temperature range in north China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 28(5): 1158-1166.
- Zhou Y Q, Ren G Y. 2011. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961—2008. *Clim. Res.*, 50(2-3): 125-139.
- 丁裕国, 申红艳, 江志红等. 2009. 气候概率分布理论及其应用新进展. *气象科技*, 37(3): 257-262.
- 董妍, 李星敏, 杨艳超等. 2011. 西安城市热岛的时空分布特征. *干旱区资源与环境*, 25(8): 107-112.
- 龚道溢, 王绍武. 1999. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究. *地理学报*, 54(2): 125-133.
- 何春, 何金海. 2003. 冬季北极涛动和华北冬季气温变化关系研究. *南京气象学院学报*, 26(1): 1-7.
- 何正风, 张德丰, 周品等. 2012. MATLAB 概率与数理统计分析. 北京: 机械工业出版社.
- 李崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 2006. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. *地球物理学报*, 49(1): 69-77, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.010.
- 李兴荣, 胡非, 舒文军. 2007a. 北京夏季强热岛分析及数值模拟研究. *气象*, 33(6): 25-31.
- 李兴荣, 胡非, 舒文军. 2007b. 北京冬季城市热岛特征及强弱热岛影响因子研究. *中国科学院研究生院学报*, 24(4): 431-438.
- 刘吉峰, 丁裕国, 江志红. 2007. 全球变暖加剧对极端气候概率影响的初步探讨. *高原气象*, 26(4): 837-842.
- 刘学锋, 于长文, 任国玉. 2005. 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*, 10(4): 763-770.
- 刘兴华, 王立静, 吴洪宝. 2007. 中国近 40 年日平均气温的概率分布特征及年代际差异. *气候与环境研究*, 12(6): 779-787.
- 任国玉, 张爱英, 初子莹, 等. 2010. 我国地面气温参考站点遴选的依据、原则和方法. *气象科技*, 38(1): 78-85.
- 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2011. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社.
- 王郁, 胡非. 2006. 近 10 年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应的分析研究. *地球物理学报*, 49(1): 61-68, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.009.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社.
- 魏凤英. 2008. 中国冬半年最低气温概率分布特征. *气候变化研究进展*, 4(1): 8-11.
- 徐祥德, 卞林根, 丁国安. 2003. 城市大气环境观测工程技术与原理. 北京: 气象出版社.
- 翟盘茂, 任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化. *气象学报*, 55(4): 418-429.
- 张雷, 任国玉, 刘江等. 2011. 城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响. *地球物理学报*, 54(5): 1150-1159, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.002.
- 张学文, 马力. 1992. 嫡气象学. 北京: 气象出版社.
- 郑祚芳, 刘伟东, 王迎春. 2006. 北京地区城市热岛的时空分布特征. *南京气象学院学报*, 29(5): 694-699.
- 周雅清, 任国玉. 2009. 城市化对华北地区最高、最低气温和日较差变化趋势的影响. *高原气象*, 28(5): 1158-1166.

(本文编辑 汪海英)