0577-6619/2010/68(6)-0957-66 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差*

张爱英[1,2] 任国玉[3] 周江兴[3] 初子莹[3] 任玉玉[3] 唐国利[3]
ZHANG Aiying[1,2] REN Guoyu[3] ZHOU Jiangxing[3] CHU Ziying[3] REN Yuyu[3] TANG Guoli[3]

1. 中国气象科学研究院,北京,100081
2. 北京市气象局,北京,100089
3. 中国气象局气候研究开放实验室,国家气候中心,北京,100081
1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*
2. *Beijing Meteorological Bureau*, *Beijing* 100089, *China*
3. *Laboratory for Climate Studies*, *China Meteorological Administration*, *National Climate Center*, *Beijing* 100081, *China*
2008-08-25 收稿,2010-01-14 改回.

Zhang Aiying, Ren Guoyu, Zhou Jiangxing, Chu Ziying, Ren Yuyu, Tang Guoli. 2010. On the urbanization effect on surface air temperature trends over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(6): 957-966

Abstract 138 rural stations are selected from all the 2300 observed stations located in the mainland of China, and the monthly mean temperature dataset from all the 614 national stations and 138 rural stations is tested for inhomogeneities and corrected. And, based on the adjusted dataset of the 614 national stations (i. e. the national basic/reference stations) and 138 rural stations, and the widely adopted grid-weighted method for calculating regional average climate series, annual- and seasonal-averaged temperature series for the divided six regions in the mainland of China and China as a whole are constructed over the period 1961 – 2004, and an analysis of urbanization effect on surface air temperature changes observed from the national stations is conducted. The results show that, the increasing trend of annual mean temperature during the analysis period observed from national stations and rural stations is 0.278 ℃/(10 year) and 0.202 ℃/(10 year), respectively. Taking China as a whole, the annual mean temperature increasing trend induced by urbanization effect is 0.076 ℃/(10 year), accounting for 27.33% of the overall warming. As far as the six sub-regions is concerned, except for the northern Xinjiang, all the sub-regions show a significant urbanization effect on the surface air temperature increasing trend as recorded by the national stations during period 1961 – 2004. The region-averaged annual urban warming, as is defined by the difference between the annual mean surface air temperature trend of the national stations and the rural stations, reaches 0.086 ℃/(10 year) in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the Huaihe basin, accounting for 55.48% of the overall warming. The annual urban warming is estimated to be 0.060, 0.059, 0.042 and 0.042 ℃/(10 years), respectively, for the sub-regions of the Northeast and North China, the Tibetan Plateau, South China and the Northwest. And accordingly, the urban warming contribution to the overall warming is 55.48%, 23.23%, 23.20%, 15.35%, 13.73% and 1.57% for the sub-regions of the Yangtze-Huaihe basins, the Tibetan Plateau, South China, the Northeast and North China, the Northwest and the northern Xinjiang, respectively. It is noticed that the small part of the selected rural stations can not represent the true rural background since they also suffered from the increasing urbanization and the results of urban warming presented here is underestimated to some extent. To sum up, the urbanization effect on the trend of the region-averaged annual mean air temperature estimated from the national stations is dramatic, and it should be eliminated from the current regional surface air temperature series in order to make a more reliable dataset of background climate and thus improve the quality of detecting and monitoring of climate change.
Key words China, National stations, Climate change, Urban warming, Surface air temperature

---

* 资助课题:国家自然科学基金项目(40575039)及国家科技支撑项目课题(2007BAC03A01 和 2007BAC29B02)。
作者简介:张爱英,主要从事气候与气候变化的研究。E-mail: zhangay66@sohu.com

摘 要 在中国大陆2300个气象台站网中遴选出138个参考站,对614个国家级气象站和138个参考站1961—2004年的月平均气温资料进行了非均一性检验和订正,利用REOF(旋转主分量)分析方法,按照气温变率空间相关特点将中国大陆划分为6大区域,并采用经纬度网格面积加权平均法分别建立了中国大陆及其6大区域平均的国家站和参考站的月、季、年地面气温时间序列,对国家站和参考站序列进行了对比分析。结果表明,由国家站资料建立的中国大陆年平均气温序列在44年间线性增温率为0.278 ℃/10 a,而由参考站资料建立的中国大陆年平均气温序列同期增温率为0.202 ℃/10 a。就中国大陆平均来说,1961—2004年国家级站城市化增温率为0.076 ℃/10 a,占全部增温率的27.33%。在6大区域中,除北疆区外,其他地区年平均城市化增温率均非常显著。其中城市化影响最大的地区是江淮区,年平均热岛增温率为0.086 ℃/10 a,其后依次为东北华北区、青藏高原区、华南区和西北区,年平均热岛增温率分别达到0.060、0.059、0.042和0.042 ℃/10 a。各区域年平均热岛增温贡献率由大到小排列依次为江淮区55.48%、青藏高原区23.23%、华南区23.20%、东北华北区15.35%、西北区13.73%、北疆区-1.57%。因此,中国大陆20世纪60年代初以来城市化造成的国家站地面气温增暖偏差非常显著,今后应予以订正,以便建立代表背景气候变化的区域平均气温序列。

关键词 中国,国家气象站,气候变化,城市化增温,地面气温

中图法分类号 P435

1 引 言

在气候变化研究领域,目前关注的焦点之一仍然是人为气候变化的检测,即全球或区域气候对人类排放的温室气体的响应问题。气候变化的检测需要可靠的观测资料,地面气温观测资料的质量和可靠性尤其关键。目前一个争议较大的问题是,城市化造成的台站附近升温是不是显著的,有没有必要从区域平均的地面气温序列中予以剔除(Jones, et al,1990;Hansen, et al,1999;龚道溢等,2002;任国玉,2003;施晓晖等,2006)。不少学者在建立全球、半球和区域平均气温序列时,对城市化的影响问题进行了评价,其中一些学者在所建立的平均气温序列误差分析中予以考虑,但对于在较大区域尺度上该影响的量值仍存在不同看法,并没有很好地解决问题(Karl, et al,1988,1989;Wood, et al,1988;Portman,1993;Johnson, et al,1994;Hughes, et al,1996;Kalnay, et al,2003;Peterson,2003)。

多年来,中国学者利用不同的资料集和方法建立了多条近几十年到上百年的中国平均地面气温序列(张兰生等,1988;李克让等,1990;王绍武等,1990,1998;唐国利等,1992;丁一汇等,1994;林学椿等,1995;翟盘茂等,1997;陈隆勋等,1998;任国玉,2003,2005a,2005b;王遵娅等,2004)。尽管所用台站资料有一定差异,但他们均来自于国家级气象站(指国家基准气候站和国家基本气象站)的地面气温观测记录。国家站多位于城镇附近,其地面气温记录可能受到增强的城市化影响。不少学者从台站或区域尺度上对此进行了评价,发现国家站中各类城镇站记录的地面气温趋势中,在很大程度上还保留着城市化的影响,大城市站受到的影响更明显(赵宗慈,1991;周淑贞,1994;石春娥等,2000;黄嘉佑等,2004;曾侠等,2004;陈正洪等,2005;初子莹等,2005;张爱英等,2005;周雅清等,2005;白虎志等,2006;Ren, et al,2007, 2008)。丁一汇等(1994)指出测站环境变化特别是城市化的影响是造成气候变化分析中资料不确定性的重要因素,陈隆勋等(2004)也指出在研究中国气温和降水变化特征及形成机制时,应该排除热岛效应,否则会出现虚假的增暖。但是,以往对城市化影响的研究或者未使用经过均一性订正的气温资料,或者只针对某一个地区,而采用经过均一性订正的气温资料,针对中国所有国家站地面气温变化趋势中的城市化影响偏差进行系统评价,目前还没有研究报道。

本文从中国2300个气象站中选择138个参考站,把中国划分成6个区域,在对资料进行均一性检验、订正的基础上,对每个分区以及中国平均的国家站地面气温序列中城市化影响偏差进行分析评价。本文可为今后定量订正国家站地面气温资料序列中城市化偏差、建立代表区域背景气候变化特点的长序列地面气温资料数据集奠定基础。

2 资料及其质量控制

本文使用中国所有具有44年以上观测记录的气象台站月平均气温资料,台站数量2300多个,其中包括614个国家级台站和1700个左右一般气象站。从这些台站中遴选出138个站,作为参考站。资料的年限是1961—2004年。资料来源于中国国

家气象信息中心,其中一般站资料由中国气象局气候变化中心于2005—2006年根据国家气象信息中心的纸质记录信息化获得。

这套资料经过了质量控制和均一性订正。在信息化后,对于抄录和其他人为因素引起的奇异值和跃变点进行了系统的检验和订正。资料质量控制参考国家气象信息中心常规业务方法。资料均一性订正主要对台站迁移引起的跃变点进行检验和订正。

设某个站的月平均气温序列为 $x_i(i\in(1,N))$,距该站最近的 M 个站(取 $M=20$)的月平均气温序列为 $y_{ij}(i\in(1,N),j\in(1,M))$,$d_{ij}=x_i-y_{ij}$,$t_i$ 为时间,$\omega=2\pi/l$,l 为年周期。

将 d_{ij} 分解为年周期部分 d_{ij}^0 和扰动部分 d'_{ij},则

$$d_{ij}=d_{ij}^0+d'_{ij} \tag{1}$$

故有

$$d_{ij}^0=a_{0j}+\sum_{k=1}^{3}(a_{kj}\cos(k\omega t_i)+b_{kj}\sin(k\omega t_i)) \tag{2}$$

其中 $a_{0j}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}d_{ij}$

$$a_{kj}=\frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n}d_{ij}\cos(k\omega t_i)$$

$$b_{kj}=\frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n}d_{ij}\sin(k\omega t_i)\qquad(k=1,2,3)$$

于是扰动部分

$$d'_{ij}=d_{ij}-d_{ij}^0 \tag{3}$$

为了检验月平均气温序列中某一时间点 i 是否存在跃变,定义一个滑动统计量 t_{ij}(魏凤英,2007)。

设

$$\begin{cases}\bar{a}_{ij}^-=\frac{1}{m}\sum_{k=i-m}^{i-1}d'_{kj}\\ \bar{a}_{ij}^+=\frac{1}{m}\sum_{k=i}^{i+m}d'_{kj}\end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases}S_{ij}^-=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{k=i-m}^{i-1}(d'_{kj}-\bar{a}_{ij}^-)^2}\\ S_{ij}^+=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{k=i}^{i+m}(d'_{kj}-\bar{a}_{ij}^+)^2}\\ S_{ij}=\sqrt{\frac{m(S_{ij}^-S_{ij}^-+S_{ij}^+S_{ij}^+)}{2(m-1)}}\end{cases} \tag{5}$$

滑动统计量 t_{ij} 的计算公式

$$t_{ij}=\frac{\bar{a}_{ij}^--\bar{a}_{ij}^+}{S_{ij}}\sqrt{\frac{m}{2}}$$

$$i\in(m+6,N-m-6),j\in(1,M) \tag{6}$$

定义

$$\bar{t}_i=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}t_{ij}$$

$$i\in(m+6,N-m-6) \tag{7}$$

气温资料序列中跃变点的判别:

(1) 极值点

若 $t_{ij}\geqslant t_{kj}$,$k\in(i-3,i+3)$,则称 t_{ij} 为极大值;若 $t_{ij}<t_{kj}$,$k\in(i-3,i+3)$,则称 t_{ij} 为极小值。

(2) 对于某个确定的 k

若 $\bar{t}_k$ 为不小于6的极大值点,且在区间($k-3$,$k+3$)内序列 t_{ij} 存在3个以上不小于6的极大值点,或若 $\bar{t}_k$ 为不大于-6的极小值点,且在区间($k-3$,$k+3$)内序列 t_{ij} 存在3个以上不大于-6的极小值点,则认为此气温序列在 k 点存在跃变,k 点称为跃变点,并将其作为可能由迁站等原因引起的可疑人为不连续点。

利用详细的台站历史沿革记录,对检测到的可疑人为断点进行逐一验证。对于经过验证确认为迁站引起的某观测站资料序列断点(k),采用跃变值的估计进行订正。

$$\Delta t=\frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3}\frac{1}{m}\left(\sum_{i=k}^{k+m}d'_{ij}-\sum_{i=k-m}^{k-1}d'_{ij}\right) \tag{8}$$

对该观测站的月平均气温序列 $x_{ij}(i\in(1,N))$,设 x'_i 为经过迁站订正后的月平均温度序列,则

$$\begin{cases}x'_i=x_i+\Delta t & i\in(1,k)\\ x'_i=x_i & i\in(k+1,N)\end{cases} \tag{9}$$

对所有台站资料均进行了非均一性检验,并对确认的人为不连续点进行了订正。但是,对无法确认的不连续点,包括那些仍可能由迁站引起、但没有历史沿革资料证实的人为不连续点,没有进行订正。

3 研究方法

3.1 区域划分

中国各地气候、气候变化和城市化特征复杂多样,为分析城市化对台站地面气温记录的影响,有必要划分次级区域。根据中国国家站地面年平均气温资料,采用REOF(旋转主分量)分析方法,按照气温变率空间相关特点划分次级区域。REOF分析能将空间相关的区域归纳减少到少数几个,被广泛应用于气候分型及气象要素场时空特征的研究(黄嘉佑,1991;屠其璞等,1999)。在所有中国国家站资料序列中,综合考虑站点空间分布的均匀性及资料的连

续性和均一性,选出526个站点1959—2000年的年平均气温序列,用来作为计算和分区的依据。

对这526个站点年平均气温序列作REOF分解,提取旋转主分量作聚类分析,将中国大陆地区按气温变率空间分布差异划分为6大区域,分别为:Ⅰ—北疆区,Ⅱ—西北区,Ⅲ—青藏高原区,Ⅳ—东北区,Ⅴ—江淮流域区,Ⅵ—华南区(图1a)。

3.2 参考站遴选

为了识别气温序列中城市化的影响,关键在于遴选没有或很少受城市化影响的乡村气象站(参考站),用来代表背景气温变化观测点。通过比较分析国家站和参考站平均气温变化趋势,可以获得城市化对国家站地面气温变化的平均影响情况。

参考站(图1b)的遴选根据中国国家站与一般站的基础信息资料和历史沿革资料完成。这些资料包括台站经纬度、海拔高度、台站具体位置、记录年限、资料缺测情况、迁站信息、附近居民点人口和建成区范围等;台站附近居民点常住人口资料取自国家统计局2000年大陆人口普查结果;台站附近人工建筑分布情况,特别是台站周围方圆12 km^{2}范围内的人工建筑面积比率,台站观测场距附近居民点地理中心的直线距离等数据,根据GoogleEarth和大比例尺地图等资料估计获得。

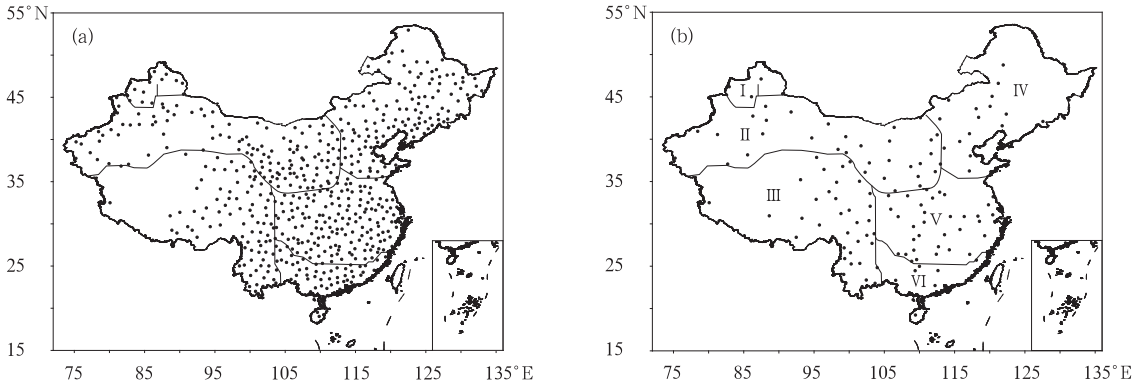

图1 中国气温分区及参考站和国家站分布

(a.国家站分布,b.参考站分布;Ⅰ—北疆区,Ⅱ—西北区,Ⅲ—青藏高原区,Ⅳ—东北区,Ⅴ—江淮流域区,Ⅵ—华南区)

Fig.1 Division of the regions and the distribution of the rural and national stations

(a. National stations, b. Rural stations; Ⅰ - the Northern Xinjiang, Ⅱ - the Northwest, Ⅲ - the Tibet Plateau, Ⅳ - the Northeast, Ⅴ - the Yangtze-Huaihe basins, Ⅵ - South China)

选择参考站的原则为:地面气温资料序列要足够长,时间连续性好;迁站次数要少,迁站等造成的资料序列不连续性可以证实和订正;避开各类城市地区,观测点附近人口相对少;达到一定数量,空间分布相对均匀;对于各类自然和人工环境具有代表性。

根据这些原则,采用以下标准和步骤遴选参考站:(1)所有备选站地面气温记录起始时间不晚于1961年;(2)台站附近居民点的常住人口数小于2万人,在东部平原地区(东北平原、华北平原、长江中下游平原)、东南沿海和四川盆地等地常住人口不超过7万;(3)台站不位于居民区中心或太靠近建城区;(4)迁站不超过2次;(5)以观测场为中心方圆12 km^{2}范围内人工建筑面积所占比例不超过40%。关于参考站遴选原则和方法的详细介绍,可参考任国玉等(2010)文章。

从各分区参考站和国家站的数量(表1)可见。除北疆区和华南区较少外,其他区域参考站数量均在20个以上。东北平原和西藏西北部难以遴选出满足上述要求的站点,参考站点稀缺。西藏西北部国家站数量也很少。

表1 各分区参考站和国家站的数量

Table 1 Number of the rural station and the national station within each of the regions

序号	区域	参考站	国家站
1	北疆区	3	12
2	西北区	34	126
3	青藏高原	35	90
4	东北区	20	146
5	江淮流域	37	171
6	华南区	9	69
	合计	138	614

3.3 区域平均序列建立及趋势检验

区域和大陆平均气温序列建立方法参考 Jones 等(1996)提出的经纬度网格面积加权法。首先计算逐年的月、季、年平均气温距平值，得到单站 1961－2004 年的月、季、年平均气温距平序列；然后将单站资料转化为网格点资料，网格分辨率为 2.5°×2.5°，每个网格的月、季、年平均气温距平值为该网格内所有台站相应数值的算术平均；最后根据网格中心点纬度的余弦进行面积加权平均，获得区域或中国的月、季、年平均气温距平值序列。为方便起见，以下将气温距平序列简称为气温序列。距平值计算的参考期取 1971—2000 年，季节定义以 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。采用这种办法分别得到各分区和中国平均的国家站和参考站的气温序列。

对区域或中国季节、年平均气温序列做线性趋势分析，方法借鉴施能等(1995)和魏凤英(2007)文章。本文把气温与时间序数的一元线性回归方程回归系数的 10 倍称为气温变化速率或气温变化趋势，单位为℃/10 a。采用 t 检验方法对气温变化趋势进行显著性检验，并选择 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 为显著性水平。分别对各站、各分区和大陆平均的气温变化趋势进行了显著性检验。

3.4 城市化影响的检测

已有研究把城市站与参考站间气温变化速率的差值定义为城市化增温率(初子莹等，2005；张爱英等，2005；周雅清等，2005)。由于本文的重点是分析中国国家站记录的城市化增温分量，并检验其城市化增温趋势的显著性，故也可引入国家站城市化强度概念，建立城市化强度时间序列(国家站和参考站时间序列一一相减)。显然，该时间序列的线性趋势同国家站热岛增温率是等同的。

$$\Delta T_{ur} = T_u - T_r \tag{10}$$

其中，ΔT_{ur}是国家站记录的增强的城市热岛效应影响，即城市热岛增温率；T_u 为国家站的气温变化趋势；T_r 为参考站的气温变化趋势。单位均为℃/10 a。具体计算时，T_u 为某一个区域内每个国家站的气温变化趋势，而 T_r 是该区域内所有乡村站气温变化趋势的平均值。这样，先计算出区域内每个国家站的城市化增温率，再按照网格面积加权平均方法获得区域平均的国家站城市化增温率。

城市化增温贡献率(E_u)是指国家站城市化增温率与全部增温率的比值(初子莹等，2005)。

$$E_u = \Delta T_{ur}/T_u \times 100\% = (T_u - T_r)/T_u \times 100\% \tag{11}$$

一般情况下 $T_u > T_r$，此时 $E_u > 0$，表明城市化对国家站记录的地面气温变化有正的影响；当 $T_u > 0$，$T_r < 0$ 时，或者当 $T_u < 0$，$T_r < 2T_u$ 时，$E_u > 100\%$，这种情况视同 $E_u = 100\%$。

城市化强度时间序列与年份序列号之间的相关系数，称作城市化增温趋势系数。利用 Ren 等(2008)所采用的 t 检验方法对中国及分区的国家站城市化增温趋势的显著性进行检验。同样，选择 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 为显著性水平。

4 中国及分区气温变化特征

分析中国平均国家站、参考站年平均地面气温序列变化曲线及其趋势(图 2)表明，在 1961—2004 年，

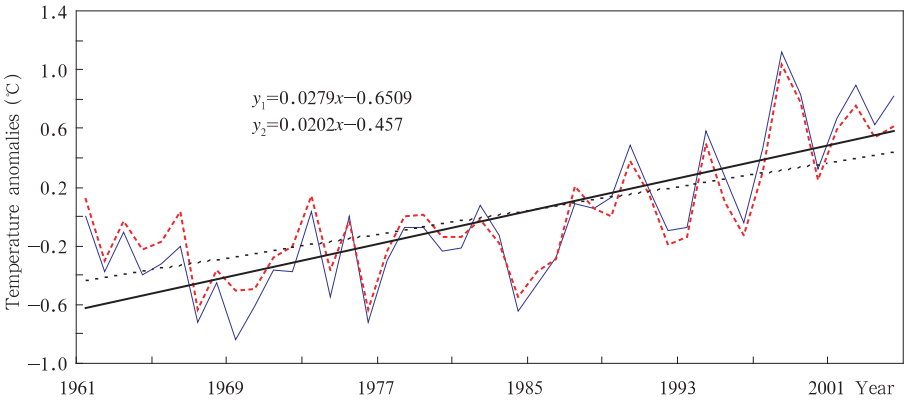

图 2 国家站和参考站年平均气温变化趋势对比

(实线代表国家站；虚线代表参考站，公式 y_1 和 y_2 分别代表国家站和参考站的线性拟合方程)

Fig. 2 Change trends of the annual mean surface air temperature for national and rural stations

(Solid line: national stations; piont line: rural stations. y_1 and y_2 represent the fitting straight lines for the national and rural station mean surface air temperature series, repectively)

国家站和参考站年平均气温均呈现明显上升趋势，气温变化速率分别为 0.278 和 0.202 ℃/10 a(表2)；但二者也存在较明显的差异，线性趋势差值(城市化增温率)达到 0.076 ℃/10 a。从季节上看(表2)，气温上升速率最大值都在冬季，国家站、参考站分别为0.511和 0.418 ℃/10 a；最小值均在夏季，国家站、参考站分别为 0.172 和 0.104 ℃/10 a；国家站的次大值发生在春季(0.257 ℃/10 a)，而参考站的次大值则出现在秋季(0.192 ℃/10 a)，说明城市化对国家站地面气温的影响在春季较大，秋季较小。尽管分析时段略有差异，国家站观测的地面气温变化特征与任国玉等(2005a，2005b) 的研究结果基本接近。

表 2 1961—2004 年国家站和参考站年、季节平均气温变化速率(单位：℃/10 a)

Table 2 Temperature change trends of national stations and rural stations for the period 1961－2004 (Unit：℃/10 year)

	年	冬季	春季	夏季	秋季
国家站	0.278**	0.511**	0.257**	0.172**	0.251**
参考站	0.202**	0.418**	0.168**	0.104**	0.192**

** 表示通过了 0.01 显著性水平检验。

** Statistically significant at 0.01 confidence level.

表 3 给出各分区国家站和参考站年平均地面气温变化趋势。从气温线性趋势看，国家站与参考站之间差异最为显著的区域是江淮流域，达到 0.086 ℃/10 a；其次为东北区和青藏高原，分别为 0.060 和 0.059 ℃/10 a；西北区和华南区均为 0.042 ℃/10 a；差异最小的区域是北疆区，为 －0.006 ℃/10 a (表 3)。

表 3 各个分区国家站和参考站年平均气温变化趋势及其差异(单位：℃/10 a)

Table 3 Change trends of the annual mean surface air temperature for national and rural stations for each of the regions (℃/10 year)

	北疆	西北	青藏高原	东北	江淮流域	华南
国家站	0.381	0.306	0.254	0.391	0.155	0.181
参考站	0.387	0.264	0.195	0.330	0.069	0.139
差值	－0.006	0.042	0.059	0.060	0.086	0.042

图 3 表示国家站和参考站年平均地面气温变化速率的空间分布情况。两类台站气温变化速率空间分布特点存在明显的差异，主要表现在：(1)国家站气温变化速率具有显著的空间非均质性，存在许多孤立的闭合中心，而参考站气温变化速率具有更高的空间一致性；(2)国家站气温变化速率普遍比参考站高，在东北区、西北区和沿海地带尤其明显；(3)华中地区气温变化速率小于 0.1 ℃/10 a 的区域范围，参考站比国家站明显扩大，参考站小于 0 ℃/10 a 的变冷区域范围也较大。

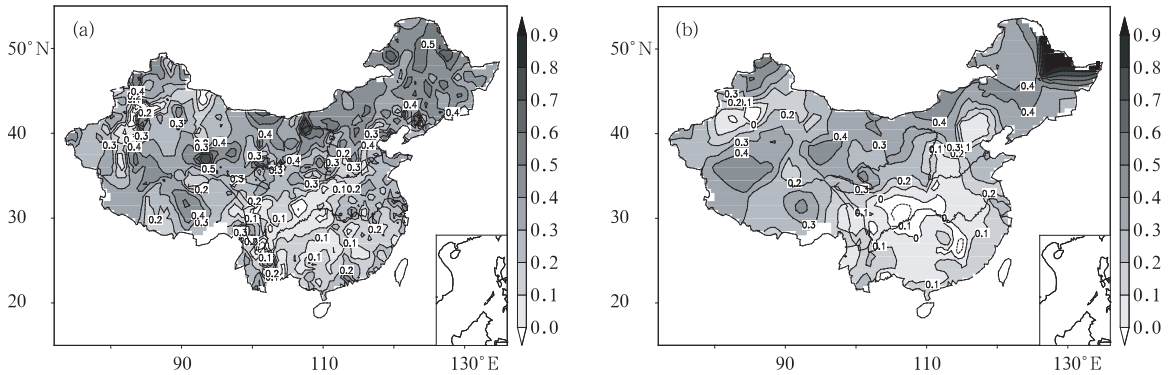

图 3 国家站和参考站地面年平均气温变化速率空间分布(℃/10 a) (a. 国家站，b. 参考站)

Fig. 3 Spatial features of the annual mean surface air temperature warming rate (℃/(10 year)) for national stations (a) and rural stations (b)

参考站气温变化速率分布形势可大体代表中国背景气候增暖的空间特点。与国家站增温形势相比，大部分地区增温趋势都有所降低，北方大部分地区、青藏高原、江淮流域和华南等地区降低较明显；同时增温趋势的空间一致性更高了。但是，在东北北部地区，由于参考站少，个别站代表性可能仍有问题，有待今后进一步查证和解决。

5 城市化影响分析

表 4 给出中国大陆和分区平均的国家站年和四季平均城市化增温率及其显著性检验结果，表 5 列出国家站年和四季平均城市化增温贡献率，图 4 则

同时表示国家站城市化增温率和城市化增温贡献率。可见,中国大陆的年和四季平均城市化增温率都很显著,均通过了 0.01 显著性水平检验。中国大陆国家站年平均城市化增温率为 0.054 ℃/10 a;四季中冬季城市化增温率最高,为 0.093 ℃/10 a;其次是春季和夏季,分别为 0.089 和 0.068 ℃/10 a;秋季最小,但仍有0.059 ℃/10 a。

中国大陆国家站年平均气温增暖趋势中,城市化增温贡献率达到 27.33%,说明城市化是造成国家站地面气温上升的一个重要因素。在各个季节,夏季国家站的城市化增温贡献率最大,为 38.53%;春季次之,为 34.631%;秋季为 23.51%;冬季最小,只有 18.20%。所有季节城市化因素对国家站网观测到的地面气候增暖的贡献都是显著的。夏季城市化增温贡献率最大,是因为总的增温速率在各季节中最小,但城市化增温率却不是最低的;尽管冬季的城市化增温率是最高的,但由于总的增温趋势十分明显,其城市化增温贡献率仍是最小,说明中国冬季的增暖趋势大部分是由于大尺度背景气候变化造成的。

表 4 1961—2004 年中国平均的国家站年、季节平均热岛增温率(单位:℃/10 a)

Table 4 Region-averaged urban warming for national stations for the period 1961 - 2004 (Unit: ℃/(10 a))

	年	冬季	春季	夏季	秋季
中国大陆	0.076**	0.093**	0.089**	0.068**	0.059**
北疆区	-0.006	0.128	-0.041	-0.075*	-0.096*
西北区	0.042**	0.083**	0.053**	0.022**	0.021*
青藏高原	0.059**	0.073**	0.066**	0.048**	0.053**
东北区	0.060**	0.027	0.078**	0.073**	0.045*
江淮流域	0.086**	0.070**	0.095**	0.106**	0.095**
华南区	0.042**	0.025	0.035*	0.061**	0.052**

** 表示通过了 0.01 显著性水平检验;
* 表示通过了 0.05 显著性水平检验。
** Statistically significant at the 0.99 confidence level;
* Statistically significant at the 0.95 confidence level.

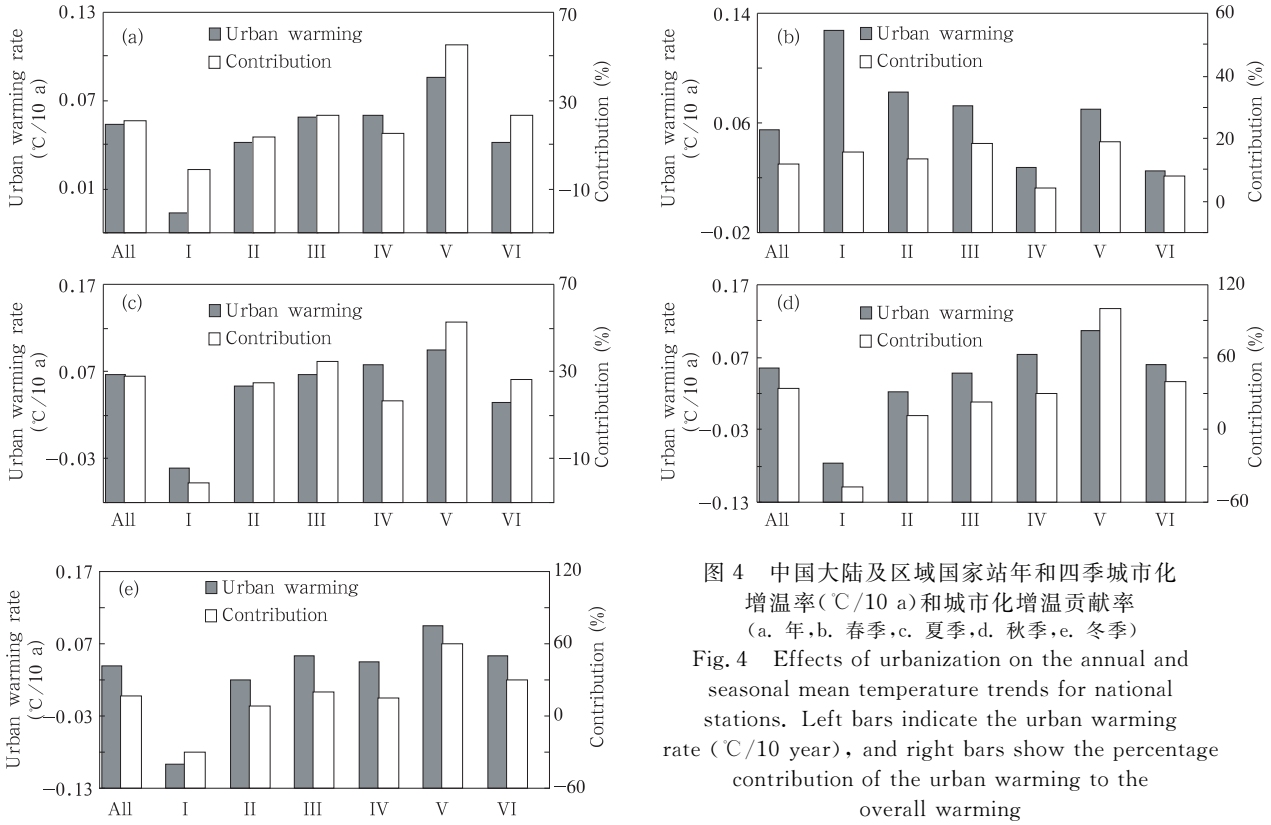

图 4 中国大陆及区域国家站年和四季城市化增温率(℃/10 a)和城市化增温贡献率
(a. 年,b. 春季,c. 夏季,d. 秋季,e. 冬季)

Fig. 4 Effects of urbanization on the annual and seasonal mean temperature trends for national stations. Left bars indicate the urban warming rate (℃/10 year), and right bars show the percentage contribution of the urban warming to the overall warming

除北疆区外,其他分区国家站年平均城市化增温率都很显著,均通过了 0.01 的显著性检验(图 4 和表 4)。其中,江淮流域城市化增温率最大,达到 0.086 ℃/10 a;东北和青藏高原分别为 0.060 和 0.059 ℃/10 a;华南和西北区同为 0.042 ℃/10 a;北疆区为负值,说明国家站地面气温上升趋势比参考站还弱,但趋势未通过统计显著性检验。

各个分区季节平均城市化增温率不尽相同(图 4 和表 4)。北疆、西北和青藏高原城市化增温率在冬季最大,分别为 0.128、0.083 和 0.073 ℃/10 a;

东部3个分区城市化增温率在春季或夏季最大,其中东北区春季最大,为0.078 ℃/10 a,而江淮流域和华南区夏季最大,分别为0.106和0.061 ℃/10 a。季节平均城市化增温率最大值出现在江淮流域的夏季。出现这种情况可能与南方地区城市最近20年扩展迅速以及夏季空调使用逐渐普及等因素有关。北疆区春、夏、秋季城市化增温率为负值,其中夏季和秋季通过了0.05的显著性检验,说明国家站地面平均气温相对于参考站有较显著变凉趋势。这可能与北疆区城市多位于绿洲内,气象站观测受到绿洲的"凉岛效应"影响有关。

年平均城市化增温贡献率以江淮流域为最大,达到55.48%;青藏高原、华南、东北和西北区分别为23.23%、23.20%、15.35%和13.73%;北疆区的年平均城市化增温贡献率为-1.57%(图4和表5)。因此,江淮流域地区国家站记录的地面气温增暖趋势中,有超过一半的部分是由于城市化影响引起的,难以代表背景气候变化情况;其他地区的年平均气温变化也在很大程度上受到局地人类活动的影响,需要在气候变化检测分析中认真对待。

表5 中国大陆和各分区国家站年和四季平均气温增暖趋势中城市化增温贡献率(%)

Table 5 Contributions of the urban warming to the overall warming as recorded from national stations for the mainland of China as a whole and the 6 regions (%)

区域	年	冬季	春季	夏季	秋季
中国大陆	27.33	18.20	34.63	38.53	23.51
北疆区	-1.57	15.69	-20.81	-47.77	-29.91
西北区	13.73	13.63	24.77	12.02	7.64
青藏高原	23.23	18.86	34.55	22.54	19.20
东北区	15.35	3.97	16.35	29.32	15.00
江淮流域	55.48	19.23	52.78	100.00	60.13
华南区	23.20	8.04	26.72	39.87	30.41

图5给出了国家站和参考站年平均气温变化速率增温趋势的差异,也就是中国大陆城市化增温趋势分布图。可以看出,城市增温高值区主要分布在青藏高原北部、内蒙一带以及东北地区北部和江淮流域东部地区。

季节平均城市化增温贡献率在各个分区有较大差异(图4和表5)。青藏高原和西北区在春季最大,分别为34.55%和24.77%;东部3个分区都是在夏季最大,冬季最小。江淮流域夏季甚至达到100%,说明夏季的增温全部是由城市化造成的;北

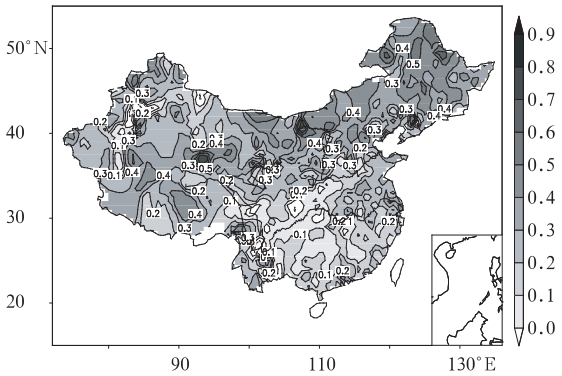

图5 国家站和参考站年平均气温变化速率增温趋势的差异(℃/10 a)

Fig. 5 Difference in the annual mean surface air temperature change trend between national stations and rural stations(℃/(10 year))

疆区城市化增温贡献率在冬季为正值,其他季节则为负值,其中夏季负值的绝对值最大。

6 结论和讨论

本文对1961—2004年中国国家站地面气温序列中城市化影响的偏差进行了分析,得到以下结论:

(1) 由国家站和参考站资料建立的中国地面年平均气温序列都呈现明显变暖趋势,但国家站增暖幅度更大,东部各区和青藏高原尤其明显,说明国家站地面气温序列中还保留着城市化的影响。

(2) 国家站年和四季平均城市化增温率都很显著。年平均城市化增温率为0.076 ℃/10 a,四季中冬季城市化增温率最高,春季和夏季居中,秋季最小。

(3) 国家站年平均城市化增温贡献率达到27.33%。在各个季节,夏季的城市化增温贡献率最大,为38.53%;春季和秋季次之;冬季最小(18.20%)。

(4) 中国6个分区中,除北疆区外,国家站地面气温序列中的城市化影响均很显著。其中江淮流域年平均城市化增温率最大,其后依次为东北、青藏高原、华南和西北区。各分区年平均城市化增温贡献率由大到小排列依次为:江淮流域55.48%、青藏高原23.23%、华南区23.20%,东北区15.35%,西北区13.73%,北疆区-1.57%。

(5) 本文对于中国大陆和各分区国家站地面气温序列中城市化影响偏差的估计是保守的。如何有效地订正由于城市化引起的国家站地面气温序列中

的增暖偏差,是今后需要高度重视的问题。

本文在遴选参考站时采用了所有具有长时间记录的气象台站资料,并根据包括台站附近居民点人口、建筑环境、资料记录长度和连续性、迁站次数等多种指标,确定候选台站,遴选原则和标准比以往工作要严格、合理。但是,由于中国气象台站建设的特殊情况,以及近几十年经济的快速发展,在东部平原地区仍然很难获得能够反映背景气候变化的观测点,不得不降低标准,以求得到足够数量的参考站。因此,本文获得的国家站城市化增温率应当看作为最低估计值,在一些地区真实的城市化影响偏差可能比本文估计结果还要高。

即使这样,本文获得的国家站城市化增温趋势仍是很显著的,东部各区和青藏高原、西北区城市化增温率都通过了信度为 0.01 的显著性检验。这说明,在根据国家站资料建立的大陆年和季节平均地面气温序列中,还明显地保留着城市化因素引起的增暖偏差。在年平均气温序列中,这个偏差至少达到 27.33%。剔除城市化引起的增暖偏差,中国 1961—2004 年年平均气温增暖趋势将由 0.278 ℃/10 a 降低到 0.202 ℃/10 a。考虑到国家站气温序列中城市化影响偏差可能是被低估的,中国平均 0.202 ℃/10 a 的增暖趋势应看作为最高估计值。

关于中国东部和世界其他大陆城市化对地面气温观测的影响,此前还存在一定争议(Jones, et al, 1990;Wang, et al, 1990;Portman, et al, 1993;Li, et al, 2004;Zhou, et al, 2004;Ren, et al, 2007, 2008)。Jones 等(1990)的研究指出,在他们所应用的中国东部地面气温记录中,城市化的影响可以忽略不计。这个结论有深远影响,IPCC 报告也多次引用。后来的一些分析曾暗示,Jones 等(1990)的研究结论具有局限性(赵宗慈,1991;Portman, et al, 1993;Zhou, et al, 2004)。但 Li 等(2004) 对 1954－2001 年中国地面气温序列的城市化影响分析,仍得出了城市化影响并不明显的结论,因而支持 Jones 的观点。Ren 等(2007,2008)指出,造成分析结果不同的主要原因在于如何选取参考站点。从现有的国家站中很难遴选出具有足够数量和代表性的参考站点,研究时段、区域和方法的不同也是造成分析结果存在差异的部分原因。Li 等(2004) 更新了研究所用的资料,对资料的非均一性进行了订正,对比前人工作无疑是一个进步。但他们的参考站是取自国家站中的小城市(镇)站。中国小城镇在过去几十年发展速度较快,城市化对气温记录的影响仍然较明显。这可能是导致他们得出城市站和参考站增温率差别甚小的主要原因。

最近几年的区域性分析揭示,城市化对中国城市和国家站地面气温变化趋势产生了明显影响(初子莹等,2005;陈正洪等,2005;张爱英等,2005;周雅清等,2005;白虎志等,2006;唐国利等,2008)。本文首次从中国范围研究证实,城市化对国家站地面气温变化具有显著影响。今后,需要进一步研究如何有效订正国家站地面气温资料序列中的这种局地人类活动影响的偏差,为区域气候变化检测和预估研究提供可靠的地面气温观测数据。同时,本文的研究也表明,中国现有和计划的地面气候观测系统还需要进一步改进和完善。

参考文献

白虎志,任国玉, 张爱英等. 2006. 城市热岛效应对甘肃省温度序列的影响. 高原气象,25(1):90-94

陈隆勋, 朱文琴. 1998. 中国近 45 年来气候变化的研究. 气象学报, 56(3):257-271

陈隆勋,周秀冀,李维亮等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制. 气象学报,62(5):634-646

陈正洪,王海军,任国玉等. 2005. 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,10(4): 771-779

初子莹,任国玉. 2005. 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,63(4):534-540

丁一汇,戴晓苏. 1994. 中国近百年来的温度变化. 气象, 20(12):19-26

龚道溢,王绍武. 2002. 全球气候变暖研究中的不确定性. 地学前缘, 9(2):371-376

黄嘉佑. 1991. 我国夏季气温、降水量场的时空特征分析. 大气科学, 15(3):124-132

黄嘉佑,刘小宁,李庆祥. 2004. 中国南方沿海地区城市热岛效应与人口的关系研究. 热带气象学报,20(6): 713-722

李克让,林贤超,王维强. 1990. 近四十年来我国气温的长期变化趋势. 地理研究, 9(4): 26-37

林学椿,于淑秋. 1995. 中国近百年温度序列. 大气科学,19(5):525-534

任国玉. 2003. 地表气温变化研究的现状和问题. 气象,29(8):3-6

任国玉,初子莹,周雅清等. 2005a. 中国气温变化研究最新进展. 气候与环境研究,10(4):701-716

任国玉,郭军,徐铭志等. 2005b. 近 50 年中国地面气温变化基本特征. 气象学报,63(6):942-956

任国玉,张爱英,初子莹等. 2010. 我国地面气温参考站遴选的依据、原则和步骤. 气象科技,38(1):79-85

石春娥,王兴荣,马晓群等. 2000. 一种研究城市发展对局地气候要素

影响的新方法及其应用. 气象学报,58(3):370-375

施能,陈家其,屠其璞. 1995. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征. 气象学报,53(4):432-438

施晓晖,徐祥德,谢立安. 2006. NCEP/NCAR 再分析风速、表面气温距平在中国区域气候变化研究中的可信度分析. 气象学报, 64(6):709-722

唐国利,林学椿. 1992. 1921－1990 年我国气温序列及变化趋势. 气象,18(7):3-6

唐国利,任国玉,周江兴. 2008. 西南地区城市热岛强度变化对地面气温序列的影响. 应用气象学报,19(6):722-730

屠其璞,邓自旺,周小兰. 1999. 中国近 117 年年平均气温变化的区域特征研究. 应用气象学报,10(增刊):34-42

王绍武. 1990. 近百年我国及全球气温变化趋势. 气象,16(2):11-15

王绍武,叶瑾琳,龚道溢等. 1998. 近百年中国年气温序列的建立. 应用气象学报,9(4):392-401

王遵娅,丁一汇,何金海等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报,62(2):228-236

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京:气象出版社, PP296

曾侠,钱光明,潘蔚娟. 2004. 珠江三角洲都市群城市热岛效应初步研究. 气象,30(10):12-16

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

张爱英,任国玉. 2005. 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,10(4):754-762

张兰生,方修琦. 1988. 我国气温变化的区域分异规律. 北京师范大学学报(自然科学版),3:78-85

赵宗慈. 1991. 近 39 年中国气温变化与城市化影响. 气象,17(4):14-16

周淑贞,束炯. 1994. 城市气候学. 北京:气象出版社, 618pp

周雅清,任国玉. 2005. 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,10(4):743-753

GHansen J,Ruedy R, Glascoe J,et al. 1999 . GISS analysis of surface temperature change. Geophys Res Lett,104(D24):30997-31022

Hughes W E, Balling R C. 1996. Urban influences on South African temperature trends. J Climate, 16: 935-940

Johnson G L, Davis J M, Karl T R,et al. 1994. Eestimating of urban temperature bias using polar-orbiting satellite data. J Appl Meteor,33:358-369

Jones P D, Hulme M, et al. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations. Int J Clim,16:361-377

Jones P D, Ya P Groisman, Coughlan M,et al. 1990. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. Nature,347:169-172

Kalnay E,Cai M. 2003. Impact of urbanization and land use change on climate. Nature, 423: 528-531

Karl T R, Jones P D. 1989. Urban bias in area-averaged surface air temperature trends. Bull Amer Met Soc,70:265-270

Karl T R, Diaz H, Kukla G. 1988. Urbanization: its detection and effect in the United States climate record. J Climate, 1: 1099-1123

Li Q, Zhang H, Liu X ,et al. 2004. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China. Theor Appl Clim,79:165-174

Peterson T C. 2003. Assessment of urban versus rural in situ surface temperature in the contiguous United St, tes :No difference found. J Climate,16(18):2941-2959

Portman D A. 1993. Identifying and correcting urban bias in regional time series: surface temperature in China's northern plains. J Climate,6:2298-2308

Ren G Y, Chu Z Y, Chen Z H, et al. 2007. Implication of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations. Geophys Res Lett,34,L05711,doi: 10.1029/2006GL027927

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,doi:10.1175/2007JCL1348.1

Wang W C, Zeng Z, Karl T R. 1990. Urban heat islands in China. Geophys Res Lett, 17: 2377-2380

Wood F B. 1988. Comment:On the need for validation of the Jones et al. Temperature trends with respect to urban warming. Climatic Change,12:297-312

Zhou L M, Dickinson R E, Tian Y H, et, al. 2004. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. Pro Natl Acad Sci,101(26):9540-9544