

张媛,任国玉. 2014. 无参考序列条件下地面气温观测资料城市化偏差订正方法:以北京站为例. 地球物理学报, 57(7):2197-2207, doi:10.6038/cjg20140715.

Zhang Y, Ren G Y. 2014. Correcting urban bias for surface air temperature series of Beijing Station over time period 1915—2012. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7):2197-2207, doi:10.6038/cjg20140715.

# 无参考序列条件下地面气温观测资料城市化 偏差订正方法:以北京站为例

张媛<sup>1,2</sup>,任国玉<sup>2\*</sup>

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 中国气象局气候研究开放实验室,国家气候中心,北京 100081

**摘要** 本文以北京气象站长期地面气温观测资料为例,发展了一种无早期参考序列条件下城镇站城市化偏差评价和订正方法.首先对北京站逐月平均最高、最低气温资料进行质量控制和均一化处理,并借助卫星遥感亮度温度资料遴选附近乡村站;然后利用最近 3 年逐时地面气温资料,计算观象台和 5 个乡村站各月平均地面气温的差值,将其作为北京站 1915—2012 年期间的城市化累积影响;最后假设城市化累积影响在整个研究时期呈匀速增长,采用线性订正法对地面月平均气温序列中的城市化偏差进行订正.分析表明:资料均一化处理,北京站近百年最高、最低和平均气温多年平均值有所下降,气温日较差则有所提高,但三种年平均气温序列增温趋势和年平均气温日较差序列下降趋势有所增强.北京站年平均最低气温、平均气温和气温日较差序列中均存在较大的城市化累积影响,其中最低气温和平均气温四个季节均为正值,冬季最大,秋季次之,夏季最小,四季和年平均气温日较差均为较大的负值.订正城市化偏差后,最低气温和平均气温增加速率均明显下降,年平均气温日较差下降趋势则明显变弱.

**关键词** 北京站;城市化累积影响;城市化偏差;订正方法;最高气温;最低气温;平均气温;气温日较差

doi:10.6038/cjg20140715

中图分类号 P423

收稿日期 2013-07-02,2014-04-11 收修定稿

## Correcting urban bias for surface air temperature series of Beijing Station over time period 1915—2012

ZHANG Yuan<sup>1,2</sup>, REN Guo-Yu<sup>2\*</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

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

**Abstract** In this paper, a new method of evaluating and correcting urban bias of surface air temperature is developed in case of no reference climate series, taking Beijing Station as an example. After quality control of the data, the discontinuities resulting from relocations are examined and adjusted using a statistical procedure in combination with the station's history information. The 5 rural stations around the urban station are selected by using the data of remote sensing to determine the relative locations of the Automatic Weather Stations (AWS) in the spatial distribution of surface brightness temperature. Applying surface air temperature data of AWS and Beijing Station for the last 3 years, the accumulated urbanization effect and its

**基金项目** 国家公益性行业专项项目(GYHY201206012)资助.

**作者简介** 张媛,女,硕士生,主要从事气候变化研究. E-mail: mepink2013@163.com

**\* 通讯作者** 任国玉,研究员,从事气候变化和古气候研究. E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

contribution are calculated. With an assumption that the accumulated urbanization effect increases at a constant rate, a linear correction method is used to correct the urban bias for the surface air temperature series of Beijing Station over 1915—2012. Analysis of the homogenized data of Beijing Station indicates that the increasing trend in annual mean temperature and the decreasing trend in annual mean diurnal temperature range (DTR) get larger than those of the original data. The accumulated urbanization effects for mean minimum, average temperature and DTR of the homogenized series are all large positive values, in spite of the small negative value for annual mean maximum. We correct the urban bias for the time series of Beijing Station. After that, the increasing rate of the annual mean minimum and average temperature, and the decreasing rate of annual mean DTR, are all brought down significantly.

**Keywords** Beijing Station; Accumulated urbanization effect; Urban bias; Adjustment; Maximum temperature; Minimum temperature; Average temperature; DTR

## 1 引言

城市化因素对中国等国家和地区的地面气温观测序列有很大的影响(Chung et al., 2004; Ren et al., 2008; Fujibe, 2009),只有客观评价并消除这种影响,才能更好地认识长期气候变化趋势,为检测和预估全球和区域气候变化奠定科学基础。

北京观象台(简称“北京站”)是我国有正式观测记录最早的地面气象站。对具有长序列观测记录的北京站地面气温资料中的观测误差特别是城市化偏差进行研究,采用合理方法对其进行评价和订正,提升地面气温观测资料的可信性,对于区域和全球气候变化研究具有十分重要的意义。

前人对北京站地面气温观测序列中的城市化影响进行过很多研究(宋艳玲和张尚印, 2003; 初子莹和任国玉, 2005; 林学椿和于淑秋, 2005; 司鹏等, 2009; 张雷等, 2011),他们发现北京站地面气温观测记录中存在明显的城市化影响。但已有研究全部集中在最近半个世纪,对 20 世纪 50 年代以前的城市化影响没有开展评价。目前的单站和区域尺度城市化影响偏差评价和订正,一般通过城乡站气温序列的趋势差异来估算,这要求乡村站与目标城市站具有相同长度的时间序列,但在 20 世纪 50 年代以前难以遴选出与目标站序列长度相当的参考序列,对许多类似北京站具有长时间观测记录的城镇站地面气温序列的城市化影响无法进行研究。在这种情况下,如何正确评价和订正具有长序列资料的目标站地面气温观测记录中的城市化影响,是需要深思的一个问题。

本文以北京站为例,发展了一种基于当前城市

热岛强度空间分布规律的城镇站地面气温资料城市化偏差评价和订正方法。该方法利用北京站较长的历史观测记录资料,借助卫星遥感资料空间分辨率高、自动气象站空间分布密度大等优势,在对原始长序列资料质量控制和均一化处理,得到相对均一的目标站长序列资料的基础上,选取自动站观测记录计算当前城市站的平均城市化影响,将其作为北京站近百年城市化累积影响和其贡献的替代指示,评价和订正北京站地面气温资料序列。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料质量控制、插补和均一化

选取 1915—2012 年北京站的月平均最高、最低和平均气温地面观测资料。该站在观测时次、时制、日平均气温统计方法、站点位置等有多次变化,在不同程度上影响到资料的均一性(Yan et al., 2001)。本文采用月平均最高、最低气温求算月平均气温(Jones et al., 2003),同时对资料进行了均一化处理。1950 年以前的数据质量较差且缺测现象严重,故对原始资料进行质量控制和缺测值插补。从华北地区的国家基准站、基本站网中选取用于数据订补和均一化订正的候选参考站。资料来自国家气象信息中心,其中 1950 年以后资料已经过质量控制,本文对 1950 年以前各站月平均最高气温( $T_{\max}$ )、月平均最低气温( $T_{\min}$ )和月平均气温( $T_{\text{ave}}$ )资料进行了初步质量检验。

北京站月平均最高、最低气温记录中缺测数据均为 43 个,占各自总数的 3.7%,缺测年月为:1915/01—1915/04、1917/12、1926/12—1927/06、1927/10、1928/01、1928/05—1928/12、1929/02—1929/

06、1937/09—1938/12. 采用差值订正法订补缺测数据,参考站选取根据北京站与华北地区其他站年平均气温的相关程度、站点距离及平行观测记录情况确定(表 1). 在计算相关系数时,采用第一差分序列,因为对于原始数据,台站迁移将改变迁站后所有年月的值,而对于差分序列将只改变当年值,对计算

表 1 插补缺测值所用参考站与北京站的相关系数和直线距离  
Table 1 The correlation coefficient and distance between Beijing Station and its reference stations

站名(站号)	记录起始年	相关系数		与北京站 距离/km
		最高气温	最低气温	
营口(54471)	1905	0.80	0.78	493.0
天津(54527)	1890	0.94	0.89	94.3
大连(54662)	1905	0.78	0.80	454.8

表 2 1915—2012 年北京站迁站情况

Table 2 Information of relocations of Beijing Station during 1915—2012

序号	时间(年/月)	地点	纬度/N, 经度/E	海拔/m
1	1915/04—1930/07	建国门泡子河畔	39°54', 116°28'	37.5
2	1930/08—1939/12	不详	不详	不详
3	1940/01—1953/05	西郊公园	39°56', 116°20'	51.3
4	1953/06—1964/12	西郊五塔寺 7 号	39°57', 116°19'	53.3
5	1965/01—1968/12	大兴县东黑垡村	39°35', 116°19'	29.4
6	1969/01—1970/06	西郊彰化农场	39°56', 116°16'	53.3
7	1970/07—1980/12	南郊大兴县旧宫东	39°48', 116°28'	31.2
8	1981/01—1997/06	西郊北洼路又一村	39°56', 116°17'	54.0
9	1997/07—2012/12	南郊大兴旧宫东	39°48', 116°28'	31.3

检测非均一性所用参考站是 3 个站,主要考虑参考站在北京站迁址时间前后没有迁站,气温起始记录不晚于 1915 年,与北京站相关系数较高且直线距离较近.这 3 个站分别是天津、熊岳和青岛站,其中青岛站距北京站最远,为 535.3 km,但三站与北京站最高、最低气温相关系数均大于 0.72. 将参考站序列的加权平均值作为参考序列,权重系数根据第一差分序列相关系数的平方确定;然后用标准化处理后的北京站原始序列与其参考序列的差值序列作为滑动 t 检验的待检序列,对于有迁站历史数据支持的间断点,即检测出的突变点出现时间与迁站时间记录接近一致(相差不超过 6 个月),确定该点为序列的人为不连续点;对于没有迁站数据支持的间断点,不做处理.结果发现最高气温序列中有 2 个断点是人为不连续点,对应的时间分别是 1981 和 1997 年;最低气温序列中有 4 个断点是人为不连续点,对应的时间分别是 1965、1969、1981 和 1997 年.

的相关系数影响不大.这些站和北京站 1961—1990 年间均无缺测值,将其作为参考期.

如果北京站某年月缺测值为  $P$ ,对应月参考期平均气温为  $X$ ,参考站相同年月平均气温为  $Q_r$ ,对应月参考期平均气温为  $Y_r$ ,北京站与参考站的相关系数为  $CORR_r$ ,得到插补公式:

$$P = \sum_{r=1}^3 [(X - Y_r + Q_r) \times CORR_r] / \sum_{r=1}^3 CORR_r^2 \quad (1)$$

利用(1)式插补了缺测记录后,建立了北京站 1915—2012 年完整的地面月平均最高、最低气温序列.

表 2 给出北京站迁站的历史沿革情况.参照建立国家基本基准站均一化气温数据集所用的方法,以当前站址位置为基准,利用滑动 t 检验法检测资料的非均一性断点(Li et al., 2004).

由于这些人为不连续点时间都出现在 1960 年后,为使后续订正结果更可靠,采用与前述相同的方法,重新选取了与北京站相关系数更大、距离更近的参考站,用于非均一性订正.新的参考站记录起始年、迁站历史以及与北京站的距离、相关系数见表 3.

表 3 参考站有气温记录的起始年、迁站历史、与北京站相关系数和直线距离

Table 3 The starting year and information of relocations for the reference stations' temperature, the correlation coefficient and distance between Beijing Station and its reference stations

站名(站号)	记录起始年	迁站时间 (年/月)	相关系数		距离 /km
			最高气温	最低气温	
密云(54416)	1957	1988/07	0.97	0.89	72.9
廊坊(54518)	1957	无	0.96	0.89	76.0
天津(54527)	1890	1992/01	0.94	0.89	94.3

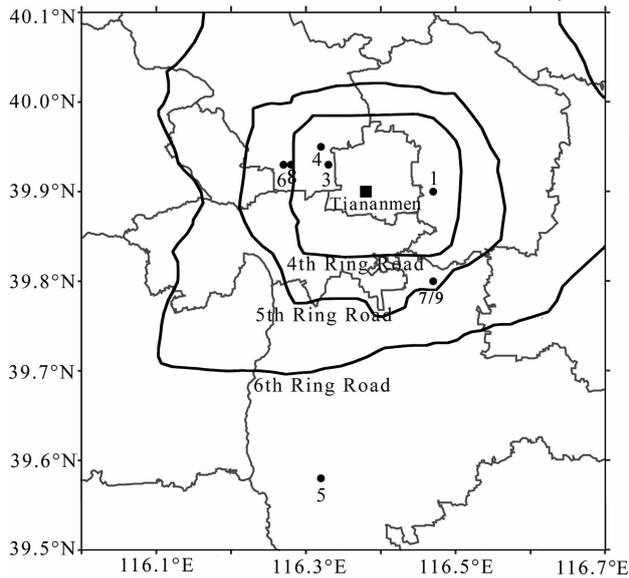


图1 1915—2012年北京站位置变化

圆圈代表站址位置,数字和表2中序号对应。

Fig. 1 Locations of Beijing Station for different time periods of 1915—2012

Circles stand for locations of Beijing Station, the numbers correspond to the ones from the table 2

图1是与表2对应的北京站不同时期位置示意图。1915年4月的迁站发生在原始序列中的第一年,很难对其检测,但也不会对整个序列的均一性产生显著影响。1965年的断点是由西郊五塔寺7号(位置4)迁至大兴县东黑垡村(位置5)导致的;1968和1969年的断点是由大兴县东黑垡村(位置5)迁至西郊彰化农场(位置6)造成的;1980年的断点是由南郊大兴县旧宫东(位置7)迁至西郊北洼路又一村(位置8)引起的;1997年的断点与从西郊北洼路又一村(位置8)迁回原来的南郊大兴县旧宫东(位置9)有关。以上迁站距离都大于20 km,伴随着周围环境较明显的变化,使得气温序列出现不连续性断点。本文检测并证实的断点时间与郑祚芳(2011)利用逐日气温资料检测出的断点时间大体相同,证明台站较大距离的迁移是造成气温序列非均一性的

主要原因(李庆祥等,2003)。

在对检测出的人为不连续断点进行订正时,分别求算北京站序列和参考序列的差值序列在断点前后3年的平均值,以及前后平均值的差值,将其作为订正值,逐个订正序列的断点,得到北京站均一化的地面月最高、最低气温资料序列。表4为滑动t检验结果及其对应的迁站时间、距离和订正值。北京站月平均气温资料序列中非均一性断点的订正值介于 $-1.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $0.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。

采用订正后的月最高、最低气温序列计算得到月平均气温序列和气温日较差序列,最后建立了经过质量控制和均一化处理的1915—2012年北京站地面月最高、最低、平均气温和气温日较差序列。

图2是1915—2012年北京站年最高、最低、平均气温和气温日较差均一化序列及其与原始序列的比较。均一化后气温序列比原始序列表现出略强的增温趋势,其中最高、最低和平均气温序列趋势分别由原来的 $0.014\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.260\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.137\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 变为 $0.022\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.274\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.148\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,分别增加 $0.008\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.014\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.011\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;平均气温日较差序列趋势由原来的 $-0.246\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 变为 $-0.251\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,减少 $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

Cao等(2013)最近发现,中国中东部地区站点1901—2010年平均气温变化趋势由均一化前的 $0.05\sim 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 变为均一化后的 $0.15\sim 0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,也证实资料均一化处理致使地面气温增加趋势得到加强。当观测点从城市中心位置向郊区迁移时,通常会使得地面平均气温值比迁站前减小(Li and Yan, 2009),均一化处理后长期气温上升趋势一般会比原来加强(任国玉等, 2010; Zhang et al., 2014)。本文的订正结果表明,迁站对最低气温的均一性影响大于最高气温,这和前人研究中发现的台站迁移对最高气温影响没有对最低气温影响大的结论一致(李庆祥等, 2005; Zhang et al., 2014)。

表4 滑动t检验结果、迁站时间和水平距离以及订正值

Table 4 The result of moving t test, time and distances of relocations, and the adjustment values

最高气温				最低气温			
断点时间(年/月)	迁站时间(年/月)	迁站距离/km	订正值/ $^{\circ}\text{C}$	断点时间(年/月)	迁站时间(年/月)	迁站距离/km	订正值/ $^{\circ}\text{C}$
1997/07	1997/07	21.6	-0.63	1997/07	1997/07	21.6	-1.17
1980/08	1981/01	21.6	0.32	1981/01	1981/01	21.6	0.97
—	—	—	—	1969/01	1969/01	39.2	0.39
—	—	—	—	1965/01	1965/01	40.8	-0.70

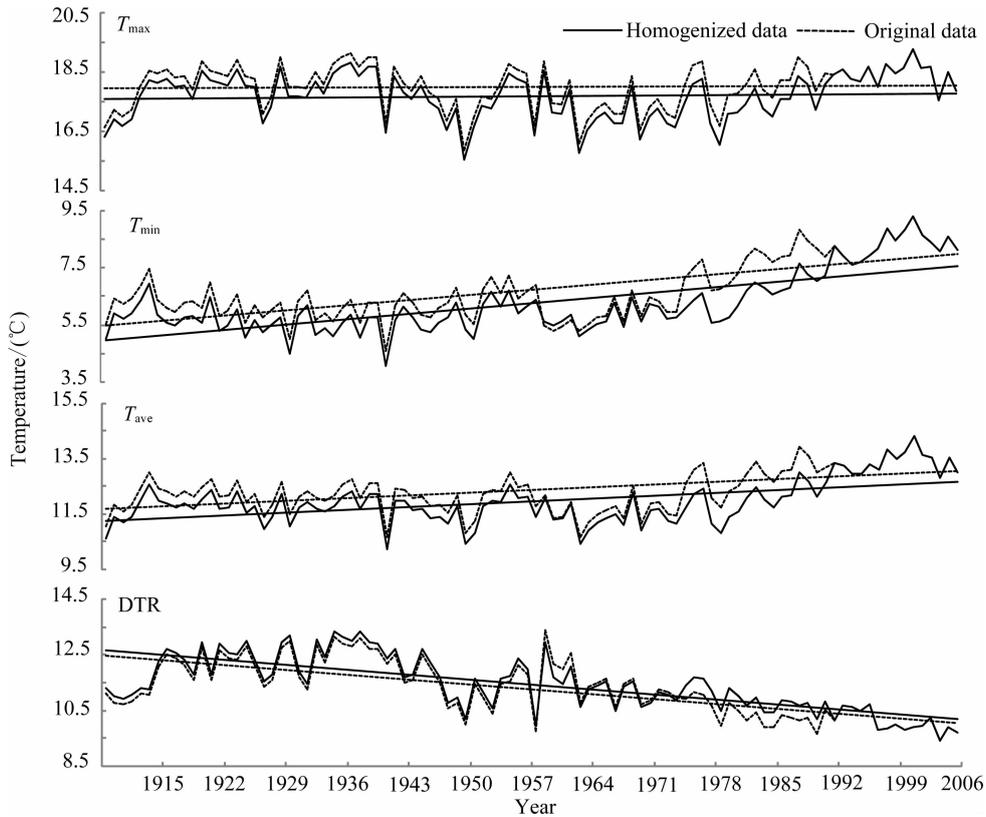


图2 1915—2012年北京站年最高( $T_{\max}$ )、最低( $T_{\min}$ )、平均气温( $T_{\text{ave}}$ )和气温日较差(DTR)序列均一化前后比较  
Fig. 2 The maximum ( $T_{\max}$ ), minimum ( $T_{\min}$ ), average temperature ( $T_{\text{ave}}$ ) and DTR time series of Beijing Station before and after homogenization for time period 1915—2012

## 2.2 城市化偏差评价和订正方法

先前研究已证实,北京地区城市化影响存在着显著的随时间增强趋势(初子莹和任国玉,2005;陈正洪等,2005;林学椿等,2005;张雷等,2011;Zhang et al., 2014). 本文假设城市站所经历的城市化影响是线性递增的,可以把当前几年城市站附近的平均城市化影响程度(即平均城市热岛强度)作为该站从有记录开始至今的城市化影响历史累积值. 通过线性回归的方法可估算不同年份的城市化影响偏差,进而对原有序列进行偏差订正.

为区别前人使用等长参考序列定量评价城市化对地面气温记录影响时所用的术语(周雅清和任国玉,2005;初子莹和任国玉,2005;张爱英等,2010),本文做如下定义:

**城市化累积影响:**当前城市站气温与相似高度和环境条件下的乡村站气温的差值,代表了城市站长期以来的城市化增温累积值,亦即当前城市站附近的城市热岛强度.

城市化累积影响用  $\Delta T_{ur}$  表示:

$$\Delta T_{ur} = T_u - T_r, \quad (2)$$

其中,  $T_u$  代表当前城市站地面气温;  $T_r$  代表城市站

周围与其相似高度和环境条件下乡村站地面气温. 当  $\Delta T_{ur} > 0$  时,表示城市化累积影响使地面气温上升;当  $\Delta T_{ur} < 0$  时,表示城市化累积影响使地面气温下降.

**城市化影响贡献率:**城市化累积影响对城市站长期地面气温变化总体趋势的相对贡献,即城市化累积影响在城市站长期地面气温变化趋势中所占的百分比率. 城市站长期地面气温变化总体趋势用  $T_t$  表示,则城市化影响贡献率  $R_u$  为

$$R_u = |\Delta T_{ur} / T_t| \times 100\%. \quad (3)$$

为使城市化影响贡献率满足  $0 \leq R_u \leq 100\%$ ,故上式取绝对值. 当  $R_u = 0$  时,表示城市化累积影响对城市站地面气温的变化趋势没有贡献;当  $R_u = 100\%$  时,表示城市站地面平均气温的趋势变化完全由城市化累积影响造成.

乡村站的选取利用卫星遥感反演的地表亮度温度资料,根据自动气象台站在地表亮度温度场中的位置来确定(Ren et al., 2011). 北京地区城市热岛强度一般在冬季夜晚最强(季崇萍等,2006;谢庄等,2006;Yang et al., 2013). 采用 NASA 提供的 MOD11A2 数据集中 2010 年 12 月 3 日至 2011 年 3 月 5 日期间 8 日夜陆表温度资料,绘制平均地表

亮度温度等值线. 把在地表亮度温度场中处于闭合等值线外围背景气候条件下的站点看作乡村站, 同时参照以下原则: (1) 与北京站距离不超过 60 km, 保证与北京站处于相同的大尺度环流和气候背景下; (2) 与北京站海拔高差小于 30 m, 避免由于高度差异带来的影响; (3) Google Earth 和其他手段证实周围观测环境开阔.

据此选取 5 个乡村站, 分别是小汤山站(站号 A1401)、大孙各庄站(站号 A1553)、高丽营站(站号 A1561)、大王古站(站号 A2407)和下伍旗站(站号 A2461). 图 3 给出了北京站和 5 个乡村站的具体位置. 5 个乡村站海拔高度介于 5.0~44.0 m 之间, 平均 26.0 m, 与北京站海拔高度 31.3 m 相差 5.3 m, 不存在因海拔高度造成的地面气温差异.

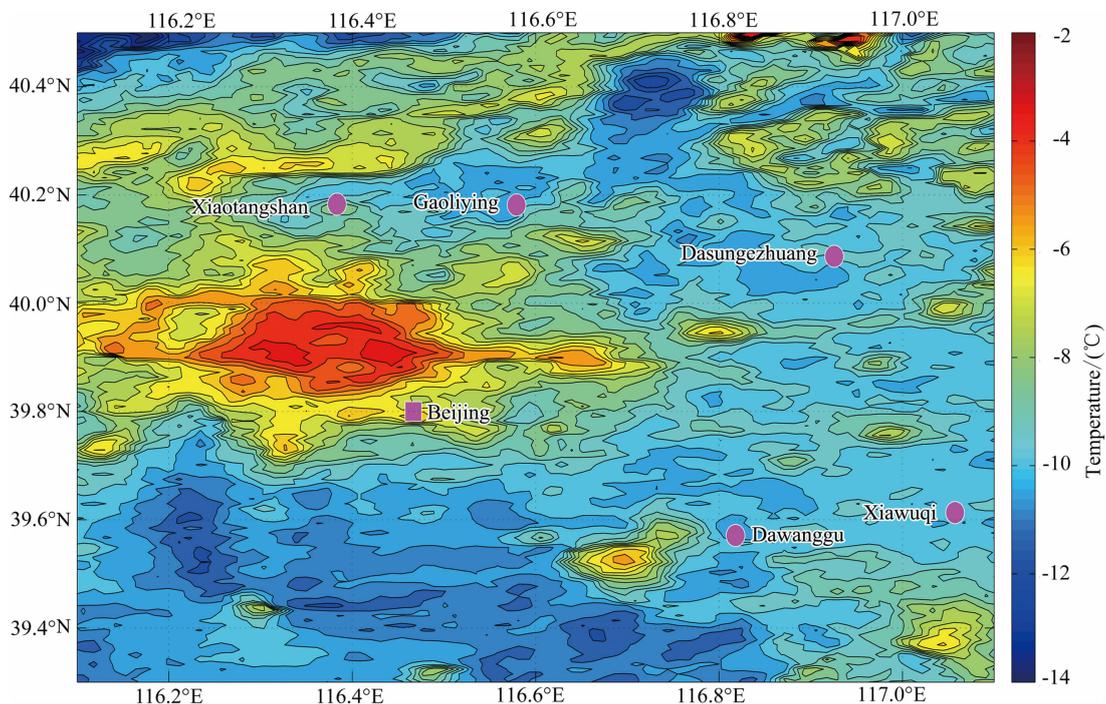


图 3 北京地区地表亮度温度分布等值线(等值线间隔为 0.05 °C)

其中实心正方形代表北京站当前位置, 实心圆代表 5 个乡村站位置.

Fig. 3 Distribution of Beijing Station and its five reference stations, the contour lines indicate land surface brightness temperature retrieved from MOD11A2 data

计算城市化累积影响时, 所用资料为 5 个乡村站和北京站 2010 年 1 月至 2012 年 12 月 3 年时期逐小时自动站观测气温资料. 为和北京站长序列资料统计方法一致, 用月最高、最低气温的算术平均计算月平均气温. 月最高、最低气温所依据的日值, 采用自动气象站观测 24 个时次中的最高小时平均气温, 日最低气温取 24 个时次中的最低小时平均气温.

气温序列的变化趋势估计采用最小二乘法, 并用 t 检验法对线性趋势进行显著性检验. 变化速率或趋势表示为每 10 年的气温变化值. 季节划分方法: 冬季为上一年 12、当年 1、2 月; 春季为 3、4、5 月; 夏季为 6、7、8 月; 秋季为 9、10、11 月; 年平均是全年 12 个月的平均.

在订正城市化影响偏差时, 本文假设: 均一化后

的北京站地面气温序列 1915 年的观测记录未受到城市化影响, 但从 1916 年开始逐渐受到城市热岛效应影响, 同时假设北京站城市化影响在整个观测序列中呈线性递增. 根据观测序列的时间长度和城市化累积影响, 可由以下公式计算平均每年的城市化增温速率.

$$r = \Delta T_w / N, \quad (4)$$

其中,  $N$  代表序列的长度, 即 98 a,  $\Delta T_w$  代表在该时间内城市化累积影响(°C),  $r$  为该段时间内城市化增温速率(°C/a), 可称作城市化偏差订正系数. 因此, 城市化偏差订正公式为

$$A_i = B_i - r \times (Y_i - Y_1), \quad (5)$$

其中,  $Y_i$  为 1915—2012 年中的任一年(a),  $Y_1$  为 1915 年,  $B_i$  为订正前的气温(°C),  $A_i$  为订正后的气温(°C).

### 3 均一化资料序列及其城市化偏差

表 5 给出均一化处理后 1915—2012 年北京站年、季平均气温变化趋势及其显著性检验结果. 年最高、最低和平均气温增温速率分别为  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ , 年平均气温日较差减小趋势为  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ , 除年最高气温外, 其他变化趋势均通过 0.01 的显著性检验. 从季节上看, 最高气温冬季上升明显, 春季上升缓慢, 夏、秋季有微弱下降趋势; 对最低气温和平均气温, 除夏季平均气温外, 其他季节增温趋势都通过了 0.01 的显著性检验, 冬季增温最明显, 春季次之, 夏季最小; 气温日较差四季均出现下降趋势, 且都通过了 0.01 的显著性检验. 对整个分析时段, 年平均最高、最低、平均气温和气温日较差趋势分别为  $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.68\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.45\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-2.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 其中最低气温和平均气温表现出非常显著的上升趋势, 比全国和全球陆地平均增暖趋势高

出 1 倍左右 (Solomon et al., 2007; Ren et al., 2012). 最低气温比最高气温上升速率快, 冬、春季比夏、秋季增温明显, 这些特征与同期和近 60 年全国平均地面气温变化完全一致 (唐国利和任国玉, 2005; Ren et al., 2012).

图 4 给出了北京站 1915—2012 年均一化气温资

表 5 北京站 1915—2012 年地面年、季平均气温和气温日较差变化趋势 (单位:  $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )

Table 5 Linear trends of annual and seasonal mean maximum, minimum, average temperature and DTR during 1915—2012 (Unit:  $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )

	最高气温	最低气温	平均气温	日较差
春季	0.05	0.30**	0.17**	-0.25**
夏季	-0.07	0.17**	0.05	-0.24**
秋季	-0.03	0.24**	0.11**	-0.28**
冬季	0.14**	0.38**	0.26**	-0.24**
年	0.02	0.27**	0.15**	-0.25**

注: \*\* 表示通过 0.01 显著性水平检验, \* 表示通过 0.05 显著性水平检验.

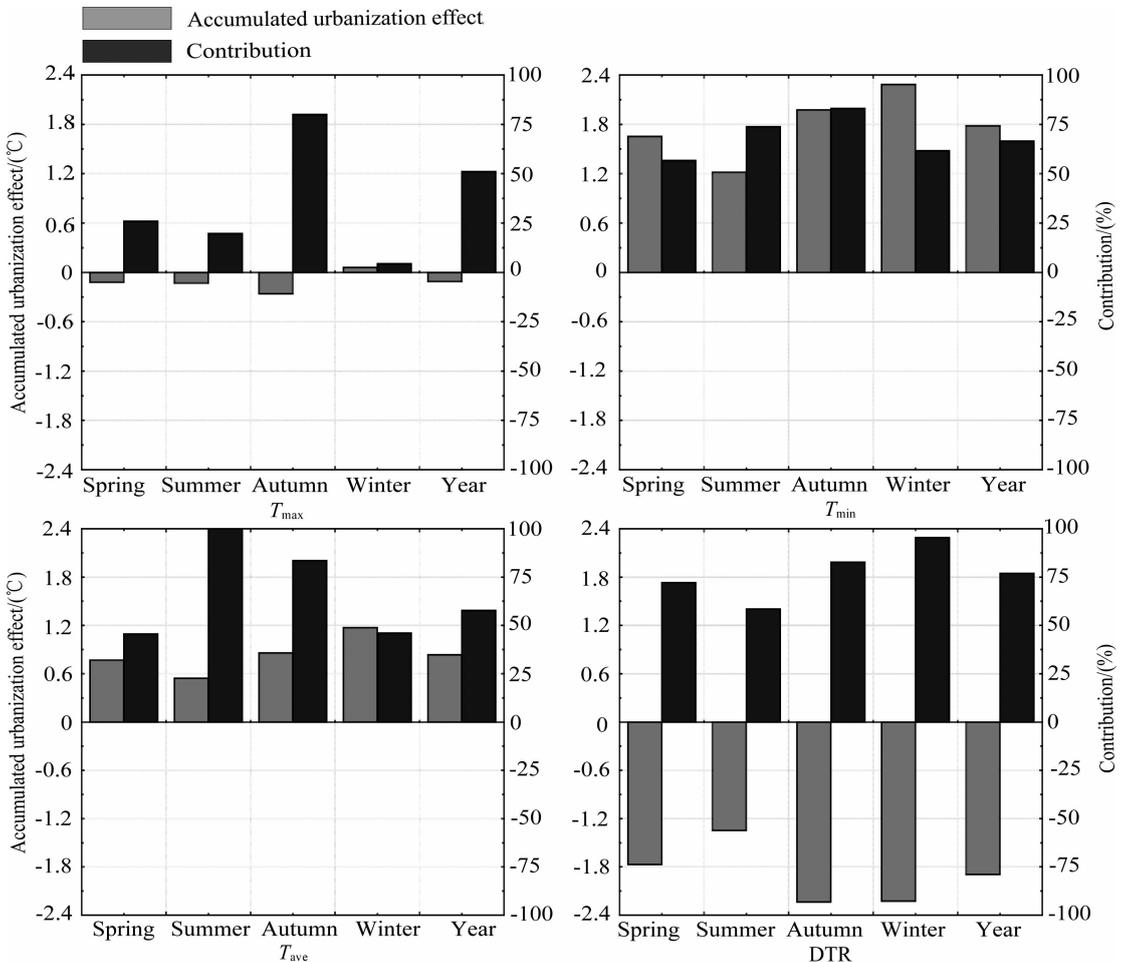


图 4 1915—2012 年北京站地面年、季最高 ( $T_{\max}$ )、最低 ( $T_{\min}$ )、平均 ( $T_{\text{ave}}$ ) 气温和气温日较差 (DTR) 的城市化累积影响及城市化影响贡献率

Fig. 4 Accumulated urbanization effects and the contributions to overall temperature trends and DTR for Beijing Station during 1915—2012

料序列中的年、季平均城市化累积影响及其贡献率. 年最高、最低、平均气温和气温日较差序列中的城市化累积影响分别为  $-0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-1.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 对应的城市化影响贡献率分别为 51.1%、66.5%、57.7% 和 77.0%. 把上述城市化累积影响转化为城市化增温率, 分别是  $-0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $-0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ . 因此, 在近百年内, 北京站年最高、最低、平均气温和年气温日较差序列均表现出较大的城市化影响偏差, 这种系统偏差占同期总体变化趋势的 50% 以上.

从四季的城市化累积影响来看, 最高气温序列很小, 除冬季外, 其他季节均为负值, 秋季绝对值最高, 为  $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 最低气温序列较大, 介于夏季的  $1.22\text{ }^{\circ}\text{C}$  到冬季的  $2.29\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间; 平均气温序列也较大, 冬季最大, 为  $1.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 夏季最小; 气温日较差序列均为负值, 秋、冬季约  $-2.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 春、夏季较小, 但绝对值也在  $1.30\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上. 四季的城市化累积影响贡献率, 最高气温秋季达 80%, 其余三季均在 30% 以下; 最低气温秋季最大, 为 83%, 其他三季均在 50% 以上; 平均气温夏季最大, 为 100%, 秋季次之, 春季和冬季

均接近 50%; 气温日较差冬季最大, 为 95.4%, 夏季最小, 但也达 58.4%.

#### 4 城市化偏差订正结果及其分析

对 1915—2012 年北京站月气温资料进行了城市化偏差订正, 利用订正后资料建立了年、季平均地面气温序列. 消除了城市化偏差后, 最高气温趋势改变不明显, 最低气温和平均气温上升趋势都有不同程度的减小, 气温日较差下降趋势也有明显减弱.

图 5 表示均一化资料序列与城市化偏差订正后资料序列逐年值及其线性趋势. 城市化偏差订正后, 年平均最高气温增加趋势略有上升, 增温趋势由均一化序列的  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  上升为  $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ; 年平均最低气温和平均气温增加趋势有不同程度下降, 分别由均一化序列的  $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  下降到  $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ; 年气温日较差趋势由均一化序列的  $-0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  变为  $-0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ , 绝对值出现较大幅下降.

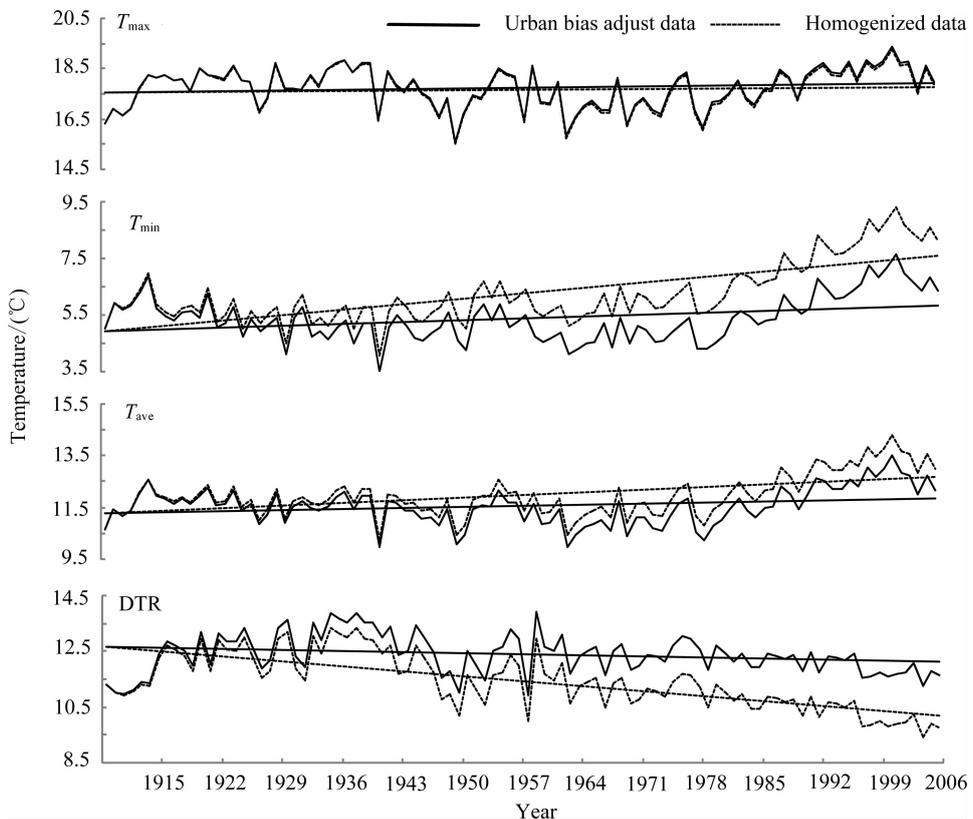


图 5 1915—2012 年北京站城市化偏差订正前、后年最高 ( $T_{\max}$ )、最低 ( $T_{\min}$ )、平均气温 ( $T_{\text{ave}}$ ) 和气温日较差 (DTR) 变化趋势比较

Fig. 5 Annual maximum ( $T_{\max}$ ), minimum ( $T_{\min}$ ), average temperature ( $T_{\text{ave}}$ ) and DTR series before and after urban bias correction

表 6 给出了 1915—2012 年北京站最高、最低、平均气温和气温日较差城市化偏差订正前后年、季变化趋势的差值. 城市化偏差订正前后年、季最高气温趋势变化不明显, 最低气温和平均气温趋势减弱较明显, 气温日较差趋势变弱很明显.

表 6 1915—2012 年北京站年、季平均最高、最低、平均气温和气温日较差城市化偏差订正前后的线性趋势的差值  
(单位:  $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )

Table 6 The difference of linear trends of annual and seasonal mean temperature and DTR before and after urban bias correction (Unit:  $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ )

	春	夏	秋	冬	年
最高气温	0.01	0.01	0.03	-0.01	0.01
最低气温	-0.17	-0.13	-0.20	-0.24	-0.18
平均气温	-0.08	-0.06	-0.09	-0.12	-0.09
日较差	0.18	0.14	0.23	0.23	0.20

## 5 讨论

利用均一化处理后的地面气温资料, 本文得到北京站 1915—2012 年年最高、最低和平均气温, 其气温变化趋势分别为  $0.02^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ . 季节平均气温增加趋势按从大到小排序分别是冬、春、秋、夏季. 以上结果与先前分析(唐国利和任国玉, 2005; Ren et al., 2012)获得的过去百余年来中国大陆平均地面气温变化趋势比较, 数值偏高, 但季节性特征完全一致. Yan 等(2001)在对资料进行均一化处理, 得出 1915—1998 年间北京站年平均气温显示出更明显的上升趋势, 而且增温主要表现在 20 世纪 60 年代以后, 与本文的结果大体一致. 此外, 本文分析结果也同谢庄和曹鸿兴(1996)发现的北京站最低气温比最高气温上升趋势明显的结论一致.

本文在资料均一化的基础上, 进一步评价了城市化对长期地面气温变化趋势的影响, 发现由于均一化过程致使观测序列中的城市热岛效应影响得以恢复, 订正后的气温资料序列中存在更明显的城市化偏差. 徐祥德和汤绪(2002)在总结国内外热岛研究结果时指出, 百万人以上的大城市平均气温一般约高于郊区  $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ , 本文年平均气温序列中的城市化累积影响为  $0.84^{\circ}\text{C}$ . Yang 等(2013)根据迄今最密集观测站点资料的研究指出, 北京六环以内的城区年平均城市热岛强度达到  $1.63^{\circ}\text{C}$ , 四环以

内中心城区冬季平均城市热岛强度高达  $2.40^{\circ}\text{C}$  以上, 夜间和清晨城市热岛强度明显大于白天, 表明近百年来大部分时间处于或接近城区的北京站地面气温记录中包含着明显的城市化累积影响.

尽管分析时期不同, 本文对平均气温序列中的城市化影响估算结果与先前研究(Ren et al., 2008; 张爱英等, 2010)得到 1961—2004 年间华北地区城市化引起的国家基准站和基本站增暖偏差约为  $0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  到  $0.11^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  的结果可以对比; 但与多数研究(宋艳玲和张尚印, 2003; 初子莹和任国玉, 2005; 林学椿和于淑秋, 2005; 司鹏等, 2009; Yan et al., 2010)得出的 1960 年后北京站的城市化影响程度范围  $0.16\sim 0.54^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  相比, 本文结果偏低, 原因可能是城市化影响在早期较弱, 改革开放后明显增大(林学椿等, 2005). 关于最高、最低气温城市化的估算与司鹏等(2009)针对 1960—2006 年的分析结果具有可比性, 最高、最低气温的城市化影响比后者明显偏低, 可能也与早期城市化影响偏弱有关. 张雷等(2011)对北京 1960—2008 年地面平均和极端气温指数序列的城市化影响进行了分析, 发现年最低气温和气温日较差序列的城市化影响分别为  $0.70^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $-0.73^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ , 其对应的城市化影响贡献率均为 100%, 是目前报告的最高估计值. 造成不同研究结果差异的原因, 可能主要与所选乡村站的代表性以及所分析时间段不同等有关.

本文发展的无早期参考序列条件下城镇站城市化偏差评价和订正方法, 只要求参考站具有最近几年的气温记录, 因而只能得到当前城市化影响程度, 无法细分城市化进程快(慢)阶段对不同时期地面气温变化的具体贡献, 这是该方法的一个局限. 但气候变化研究主要关注某一时气候要素的长期线性趋势, 对于该时期各个阶段的具体城市化影响偏差可以忽略.

## 6 结论

本文发展了一个无早期参考序列条件下城市化偏差评价和订正方法, 在对资料进行非均一性检验和订正的基础上, 分析了北京站 1915—2012 年最高、最低和平均气温的变化趋势, 评价了城市化对气温序列变化趋势的影响, 并对城市化偏差进行了订正, 得到以下结论:

(1)北京站最高、最低和平均气温的均一化资料序列表现出比原始资料序列更明显的上升趋势, 气

温日较差序列均一化后下降趋势略变大,均一化后年最高、最低、平均气温和气温日较差变化速率分别为  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $-0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

(2)北京站平均气温序列受到很大的城市化影响,年最高、最低、平均气温和气温日较差序列中的城市化累积影响分别为  $-0.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-1.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,其对应的城市化影响贡献率分别为  $51.1\%$ 、 $66.5\%$ 、 $57.7\%$  和  $77.0\%$ 。城市化累积影响在最高气温序列中只有冬季为正值,在最低和平均气温序列中四季均为正值,冬季最大,夏季最小;在气温日较差序列中四季均为负值。

(3)订正城市化偏差后,最高气温序列的增温速率变化不明显,最低和平均气温序列的增温速率均有明显下降,气温日较差下降趋势明显变弱。

## References

- Cao L J, Zhao P, Yan Z W, et al. 2013. Instrumental temperature series in eastern and central China back to the nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15): 8197-8207.
- Chen Z H, Hu J L, Zhang D S, et al. 2005. Correction of urban "Heat Island" strength and forecast of heat load. *Meteorology* (in Chinese), 31(1): 69-71.
- 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.
- Chung U, Choi J, Yun J I. 2004. Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951—1980 and 1971—2000 in Korea. *Climatic Change*, 66(1-2): 127-136.
- Fujibe F. 2009. Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan. *International Journal of Climatology*, 29(12): 1811-1822.
- Li Q X, Liu X N, Zhang H Z, et al. 2003. Homogeneity study of in situ observation climate series. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 31(1): 3-10.
- Li Q X, Liu X N, Zhang H Z, et al. 2004. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21(2): 260-268.
- Li Q X, Menne M J, Williams C N Jr, et al. 2005. Detection of discontinuities in Chinese temperature series using a multiple test approach. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10(4): 736-742.
- Li Z, Yan Z W. 2009. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960—2008. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 2(4): 237-243.
- Lin X C, Yu S Q. 2005. Interdecadal changes of temperature in the Beijing region and its heat island effect. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48(1): 39-45.
- Lin X C, Yu S Q, Tang G L. 2005. Study on the relation between urbanization and Beijing UHI intensity. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 15(7): 882-886.
- 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.
- Jones P D, Moberg A. 2003. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate*, 16(2): 206-223.
- Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. 2008. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. *Journal of 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.
- Ren G Y, Ding Y H, Zhao Z C, et al. 2012. Recent progress in studies of climate change in China. *Advance in Atmospheric Sciences*, 29(5): 958-977.
- Ren Y Y, Ren G Y. 2011. A remote-sensing method of selecting reference stations for evaluating urbanization effect on surface air temperature trends. *Journal of Climate*, 24(13): 3179-3189.
- Si P, Li Q X, Xuan C Y, et al. 2009. Contribution of urbanization to change of air temperature in Beijing. *Journal of Natural Disasters* (in Chinese), 18(4): 138-144.
- Solomon S, Qin D, Manning M, et al. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- Song Y L, Zhang S Y. 2003. The study on heat island effect in Beijing during last 40 years. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (in Chinese), 11(4): 126-129.
- Tang G L, Ren G Y. 2005. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10(4): 791-798.
- Xie Z, Cao H X. 1996. The asymmetric trend of change in maximum and minimum temperature in Beijing. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 54(4): 501-507.
- Xie Z, Cui J L, Chen D G, et al. 2006. The annual, seasonal and monthly characteristics of diurnal variation of urban heat island intensity in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11(1): 69-75.
- Xu X D, Tang X. 2002. *An Introduction to Meteorology in Urbanization Environment* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press.
- Yan Z W, Yang C, Jones P. 2001. Influence of inhomogeneity on the estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18(3): 309-322.

- Yan Z W, Li Z, Li Q X, et al. 2010. Effects of site change and urbanization in the Beijing temperature series 1977—2006. *International Journal of Climatology*, 30(8): 1226-1234.
- Yang P, Ren G Y, Liu W D. 2013. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(8): 1803-1816.
- Zhang A Y, Ren G Y, Zhou J X, et al. 2010. On the urbanization effect on surface air temperature trends over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 68(6): 957-966.
- 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.
- Zhang L, Ren G Y, Ren Y Y, et al. 2014. Effect of data homogenization on estimate of temperature trend: a case of Huairou station in Beijing Municipality. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(3-4): 365-373.
- Zheng Z F. 2011. Characteristics of extreme temperature variation and their response to urbanization in Beijing. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 31(4): 459-463.
- Zhou Y Q, Ren G Y. 2005. Identifying and correcting urban bias for regional surface air temperature series North China over period of 1961—2000. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10(4): 743-753.
- 李庆祥, Menne M J, Williams C N Jr 等. 2005. 利用多模式对中国气温序列中不连续点的检测. *气候与环境研究*, 10(4): 736-742.
- 林学椿, 于淑秋. 2005. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应. *地球物理学报*, 48(1): 39-45.
- 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 2005. 北京城市化进程与热岛强度关系的研究. *自然科学进展*, 15(7): 882-886.
- 季崇萍, 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.
- 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.
- 司鹏, 李庆祥, 轩春怡等. 2009. 城市化对北京气温变化的贡献分析. *自然灾害学报*, 18(4): 138-144.
- 宋艳玲, 张尚印. 2003. 北京市近 40 年城市热岛效应研究. *中国生态农业学报*, 11(4): 126-129.
- 唐国利, 任国玉. 2005. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析. *气候与环境研究*, 10(4): 791-798.
- 谢庄, 曹鸿兴. 1996. 北京最高和最低气温的非对称变化. *气象学报*, 54(4): 501-507.
- 谢庄, 崔继良, 陈大刚等. 2006. 北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析. *气候与环境研究*, 11(1): 69-75.
- 徐祥德, 汤绪. 2002. 城市化环境气象学引论. 北京: 气象出版社.
- 张爱英, 任国玉, 周江兴等. 2010. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差. *气象学报*, 68(6): 957-966.
- 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.
- 郑祚芳. 2011. 北京极端气温变化特征及其对城市化的响应. *地理科学*, 31(4): 459-463.
- 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.

(本文编辑 胡素芳)

## 附中文参考文献

- 陈正洪, 胡江林, 张德山等. 2005. 城市热岛强度订正与供热量预报. *气象*, 31(1): 69-71.
- 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.
- 李庆祥, 刘小宁, 张洪政等. 2003. 定点观测气候序列的均一性研究. *气象科技*, 31(1): 3-10.