

段春锋, 缪启龙, 曹雯, 等. 2012. 以高山站为背景研究城市化对气温变化趋势的影响 [J]. 大气科学, 36 (4): 811–822, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11105. Duan Chunfeng, Miao Qilong, Cao Wen, et al. 2012. Effect of urbanization on variation trends of air temperatures based on mountain stations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 811–822.

以高山站为背景研究城市化对气温变化趋势的影响

段春锋^{1,2} 缪启龙¹ 曹雯¹ 马德栗³

¹ 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

² 安徽省气候中心, 合肥 230031

³ 武汉区域气候中心, 武汉 430074

摘 要 本文基于 1957~2005 年的逐日气象资料, 对比分析了中国东部 7 组高山气象站和山下附近的城市气象站年与四季气温变化趋势。在此基础上, 利用高山站作为气候变化背景场来分析城市化对平均气温、最高气温、最低气温变化趋势影响的性质和程度, 及其对气温变化非对称性的影响。结果表明: 平均气温和最低气温变化趋势城市站多比高山站大, 而最高气温变化趋势高山站多比城市站大; 城市站最低气温变化趋势均大于最高气温变化趋势, 具有明显的非对称性现象, 而高山站这种表现十分微弱。城市站气温变化受到明显的城市化影响, 对于平均气温和最低气温以正影响为主, 而对于最高气温为负影响为主, 说明城市化对气温变化的影响也存在非对称性。城市化影响的非对称性是气温变化非对称性形成的主要因素。

关键词 气温 气候变化 城市化 非对称性变化

文章编号 1006-9895(2012)04-0811-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11105

Effect of Urbanization on Variation Trends of Air Temperatures Based on Mountain Stations

DUAN Chunfeng^{1,2}, MIAO Qilong¹, CAO Wen¹, and MA Deli³

¹ Jiangsu Key Lab of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Anhui Climate Center, Hefei 230031

³ Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

Abstract Based on daily air temperature data from 1957 to 2005, the difference in annual and seasonal air temperature trends between seven mountain stations and seven nearby urban stations in eastern China was investigated. The effect of urbanization on the variation trends of the mean air temperature, the maximum air temperature, and the minimum air temperature and the asymmetrical change of air temperature were also analyzed with the mountain stations as the background field. Results showed that the trends of the mean and minimum air temperatures were larger at the urban stations than at the mountain stations, while the trends of the maximum air temperatures were quite opposite. The air temperature trends for the urban stations showed asymmetrical characteristics more obviously than those for the mountain stations due to higher variation rates of the minimum air temperatures in the cities compared to those of the maximum air temperatures. The effect of urbanization was positive to the mean and minimum air temperatures, while negative to the maximum air temperatures. The effect of urbanization on the air temperature trends was asymmetric. The asymmetry of

收稿日期 2011-06-09, 2012-02-20 收修定稿

资助项目 科技部公益性行业(气象)科研专项 GYHY201006006、GYHY201006012, 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目 CX10B_301Z, 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)项目

作者简介 段春锋, 男, 1983 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化及影响与适应研究。E-mail: dcf118@126.com

通讯作者 缪启龙, E-mail: miaoqilong@126.com

urban effect was the main cause for the asymmetrical change of air temperatures.

Key words air temperature, climate change, urbanization, asymmetrical change

1 引言

全球气候变暖已成为水资源、农业、生态等多个科学领域的焦点。近 100 年来 (1906~2005 年) 全球气温升高了 $0.74\pm0.18^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2007), 我国同期气温增加了 $0.6\pm0.2^{\circ}\text{C}$ (气候变化国家评估报告编委会, 2007)。然而, 这些气温序列是否存在明显的城市化影响, 到目前为止仍是一个有争议的问题。不少学者评价了全球、半球和区域平均气温序列城市化影响问题, 但对该影响的量值仍存在不同看法 (Jones et al., 1990; Kalnay and Cai, 2003; Peterson, 2003; Parker, 2004)。

关于城市化对中国气温变化的影响研究已有很多。近年来在北京、上海、南京、西安、武汉等地均发现显著的城市热岛效应 (初子莹和任国玉, 2005; 林学椿和于淑秋, 2005; 季崇萍等, 2006; 唐国利和丁一汇, 2006; 田武文等, 2006; 朱家其等, 2006; Ren et al., 2007; 邱新法等, 2008; 赵娜等, 2011)。Wang et al. (1990)、赵宗慈 (1991)、Portman (1993) 对比研究中国 1950~1980 年代各类台站地面气温序列资料发现城市站的增温效应明显高于乡村站。Zhou et al. (2004) 和 Zhang et al. (2005) 利用 NCEP/NCAR 再分析资料计算研究区未受城市影响的背景气温变化, 认为城市化和土地利用变化等因素对地面气温变化趋势造成了明显影响。而 Jones et al. (1990)、Li et al. (2004) 和 He et al. (2007) 研究认为城市化对中国气温变化的影响不显著。最近, 张爱英等 (2010) 选用 2300 个站点研究表明 1961~2004 年全国范围内国家基本/基准站地面年平均气温序列中的城市化增温贡献占同期全部增温的 27.33%。针对华北、西南、湖北、甘肃等地区的研究 (陈正洪等, 2005; 周雅清和任国玉, 2005, 2009; 白虎志等, 2006; 唐国利等, 2008) 也表明, 近 40~50 年由城市化影响引起的地面气温上升对区域平均气温增加趋势的贡献非常明显, 北京和湖北地区甚至超过 70% (陈正洪等, 2005; 初子莹和任国玉, 2005)。中国其他城镇测站在不同程度上也存在这个问题, 在长江三角洲和珠江三角洲地区由于城市化发展迅速甚至形成了“区域热岛”现象 (曾侠等, 2004; 谢志清等, 2007)。

在城市化对气温变化的影响研究中, 气候背景场的合理选择至关重要。目前广泛使用的挑选背景场的方法有四种: ① 城郊比较法。将城市周边站或郊区站作为背景场, 然而城市化快速发展使得城区的热力结构和下垫面构成发生变化, 产生热岛穹窿 (徐祥德等, 2001), 从而影响城市周边站的气温变化。② 城市乡村比较法。通常把站点附近居民点人口总数或密度小于规定阈值的台站作为“乡村站” (任国玉等, 2005)。然而我国气象站多数位于城镇区域, 东部地区尤其如此, 从中遴选和确定参考站非常困难, 放宽遴选条件的同时使得“乡村站”地面气温记录中不同程度的残留着城市化的影响 (任国玉等, 2010); ③ 器测与 NCEP 资料比较法。利用 NCEP/NCAR 再分析资料作为未受城市影响的气温背景场 (Kalnay and Cai, 2003), 然而, NCEP 资料在对气候变化长期趋势的研究中存在着较大的不确定性 (徐影等, 2001), 并且这种定量估算方法本身也存在一些争议 (Trenberth, 2004; Vose et al., 2004)。④ 城市站与临近海温比较法。Jones et al. (2008) 认为海面温度不受城市化热岛效应的影响, 可以作为参照的气候背景场。该方法至少在距离海洋较近的陆地城市化影响估计中可以考虑 (地球科学编委会, 2010)。另外, 还有使用探空资料作为背景场资料 (吴息等, 1994), 借助遥感影像、地图等来遴选参考站 (谢志清等, 2007; Yang et al., 2009; 曲培青等, 2010), 用经验正交函数第 2 特征向量指示城市化对局地温度的影响 (刘学锋等, 2005) 等。因此, 能否找到一个合理的气候变化背景场, 对于准确认识城市化对气温变化的影响十分关键。

高山气象站位于真正的旷野和自然生态群落内, 不仅避开了人口密集、发展迅速的城市, 而且由于海拔较高避免了城市热岛穹窿垂直和水平的热力影响, 因此高山气象站几乎不受城市化影响, 对于反映区域背景气候变化更具代表性。虽然高山站受到地形和高度的影响, 与处在平原的城市站有较大气候差异, 直接作为参照站会带来很大问题。但是当高山站和城市站处于同一气候与大气环流背景下, 城市化影响会导致两者的变化趋势存在差异。以往研究中主要侧重于对平均气温的分析,

近年来对最高、最低气温的分析也逐渐受到关注。在华北(周雅清和任国玉, 2009)和北京(张雷等, 2011)的研究均表明城市化对最低气温的影响大于最高气温, 这对于深入认识气温变化趋势的非对称现象及其原因具有重要意义。本文选择中国东部不同地区海拔 1000 m 以上的高山气象站资料来代表区域气候变化背景场, 在对比分析高山站和山下附近城市气象站年和四季气温变化趋势的基础上, 探讨城市化对平均气温、最高气温、最低气温变化趋势影响的性质和程度, 以及最高、最低气温非对称性变化的城市化贡献, 以期获得城市化影响气温变化的新认识。

2 资料与方法

2.1 资料

资料来源于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/shuju/index3.jsp?dsid=SURF_CLI_CHN_TEM_DAY_GRID&pageid=3[2010-12-29]), 从中国地面气候数据集 752 个国家基本/基准站中遴选 7 组高山气象站和山下附近的城市气象站(表 1), 从北到南依次为长白山站和东岗站、泰山站和济南站、华山站和西安站、黄山站和安庆站、南岳站和衡阳站、庐山站和九江站、九仙山站和永安站, 分别位于吉林、山东、陕西、安徽、湖南、江西和福建省。为了使两者处于同一气候与大气环流背景下, 城市站选取时尽可能与高山站距离相近, 纬度相近, 资料完整连续。所选高山站均远离城市, 且海拔都在 1000 m 以上, 位于自然生态环境中, 因此受城市建筑群及工业化发展影响较小。城市站所属城市因发展程度不同, 规模存在差异。以 2006 年各个城市主要指市辖区非农业人口(公安部治安管理局, 2007)来看(表 1), 西安和济南人口规模超过 200 万, 衡阳、安庆、九江在 50 万左右, 而永安市和东岗所属地抚松县不超过 20 万。

资料使用时为了避免非均一性, 采用了中国近 50 年均一化历史气温数据集。气温序列的非均一性主要是由于迁站、观测环境变化、海拔高度变化等造成, 因此平均气温、最高气温、最低气温的非均一性断点年份应该相同, 订正年代也应相同。但在对比均一化历史气温数据集与地面气候数据集资料时, 发现西安站和长白山站平均气温、最高气温、最低气温均一化数据订正年代完全不同。如西安站平均气温 1957~1972 年订正了 0.4℃, 1973~1994

订正了 0.1℃; 最高气温 1957~1958 年订正了 0.2℃, 1959~1989 年订正了 -0.3℃; 最低气温 1957~1958 年订正了 1.5℃, 1959~1993 年订正了 0.6℃。鉴于西安站和长白山站在 1957~2005 年没有发生迁站, 而均一化资料存在订正年代不一致的问题, 因此这两个站仍采用地面气候数据集资料。为了时间统一, 气温资料均选用 1957 年至 2005 年逐日平均气温、日最高气温和日最低气温。季节划分为: 春季(3~5 月), 夏季(6~8 月), 秋季(9~11 月), 冬季(12 月、1~2 月)。

表 1 7 组高山站和城市站的经纬度及海拔高度

Table 1 The longitudes, latitudes, and elevations of seven mountain stations and seven urban stations

站名	经纬度	海拔高度/m	非农业人口/万人
吉林长白山	(41.53°N, 128.16°E)	1017.2	
吉林东岗	(42.10°N, 127.57°E)	775.4	19.1*
山东泰山	(36.25°N, 117.10°E)	1536.5	
山东济南	(36.68°N, 116.98°E)	57.8	277.0
陕西华山	(34.48°N, 110.80°E)	2064.9	
陕西西安	(34.30°N, 108.93°E)	398.0	318.2
安徽黄山	(30.13°N, 118.15°E)	1836.3	
安徽安庆	(30.53°N, 117.05°E)	19.6	46.3
江西庐山	(29.58°N, 115.98°E)	1165.3	
江西九江	(29.73°N, 116.00°E)	37.1	46.9
湖南南岳	(27.30°N, 112.70°E)	1268.0	
湖南衡阳	(26.90°N, 112.60°E)	102.8	67.6
福建九仙山	(25.71°N, 118.10°E)	1651.1	
福建永安	(25.97°N, 117.35°E)	205.9	17.1

注: 黑体为高山站, *东岗气象站所属地抚松县的非农业人口。

2.2 城市化影响

为了定量评价城市化对气温变化趋势的影响, 定义如下术语:

城市化影响: 是指由于城市化因素引起的气温变化趋势(初子莹和任国玉, 2005; 周雅清和任国玉, 2005)。设 ΔT_c 为城市站气温变化趋势, ΔT_g 为代表气候变化背景场的高山站气温变化趋势。城市化影响(ΔT_{cg})为

$$\Delta T_{cg} = \Delta T_c - \Delta T_g. \quad (1)$$

城市化影响贡献率: 是指城市化影响对城市附近台站气温变化趋势的贡献率(初子莹和任国玉, 2005; 周雅清和任国玉, 2005), 即城市化影响在城市台站气温变化趋势中所占的百分比。设 E

为城市化影响贡献率，即

$$E = \Delta T_{cg} / |\Delta T_c| = (\Delta T_c - \Delta T_g) / |\Delta T_c| . \quad (2)$$

因此， E 有 3 种情况：(1) 当 $\Delta T_c > \Delta T_g$ 时， $E > 0$ ，表明城市化影响为增温或使其增加；(2) 当 $\Delta T_c = \Delta T_g$ 时， $E = 0$ ，表明城市化影响为 0；(3) 当 $\Delta T_c < \Delta T_g$ 时， $E < 0$ ，表明城市化影响为降温或使其减小。这里将 $E > 100\%$ 的情况视同 $E = 100\%$ 。同样，将 $E < -100\%$ 的情况视同 $E = -100\%$ 。

2.3 气温非对称性变化和城市化影响的非对称性

为了定量评价气温变化非对称性的影响，基于气温变化非对称性表现为最低气温变化趋势明显大于最高气温 (唐红玉等, 2005) 的特征，定义如下术语：

气温非对称性变化：是指最低气温和最高气温变化趋势的差。

$$\Delta T_f = \Delta T_{\min} - \Delta T_{\max} . \quad (3)$$

ΔT_f 越大，最低气温和最高气温变化趋势差异越大，表明气温非对称性变化就越明显。

为了表征城市化对气温非对称性的影响，定义城市化影响非对称性为最低气温与最高气温城市化影响的差。

$$\Delta T_{cgf} = \Delta T_{cg\min} - \Delta T_{cg\max} . \quad (4)$$

$\Delta T_{cg\min}$ 、 $\Delta T_{cg\max}$ 分别为最低气温和最高气温的城市化影响。 ΔT_{cgf} 越大，表示城市化对于最低气温和最高气温的影响差异越大。

为了反映城市化对气温非对称性变化的影响，定义气温非对称性变化的城市化贡献为城市化影响的非对称性与气温非对称性变化之比，

$$\Delta G_f = \Delta T_{cgf} / \Delta T_f . \quad (5)$$

ΔG_f 介于 -100% 到 100% ，当 $\Delta G_f < 0$ 时，表示城市

化影响的非对称性对于气温非对称性变化为负贡献，当 $\Delta G_f > 0$ 时，表示城市化影响的非对称性对于气温非对称性变化为正贡献。

2.4 线性趋势分析

采用最小二乘的回归分析方法计算年和四季的平均气温、最高气温和最低气温变化趋势，并用 t 检验方法对气温变化趋势进行显著性检验。

3 结果分析

3.1 高山站与城市站年和四季气温变化趋势

从 1957~2005 年年气温变化趋势 (表 2) 可看出：高山站平均气温均呈极显著的变暖趋势，通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平。平均气温变暖趋势随纬度增加而增大，即长白山 > 泰山 (华山) > 黄山 > 庐山 > 南岳 > 九仙山，其中最北的长白山与最南的九仙山气温变化趋势几乎相差一倍。表明中国平均气温背景场存在显著变暖趋势且北方大南方小。虽然各城市的发展水平不同，但 7 个城市站平均气温变化趋势均大于对应的高山站，且城市间变化趋势的南北差异很明显，趋势最大的西安比趋势最小的衡阳大 1.5 倍，表明城市站平均气温升温幅度比高山站大。城市站处于城区或城郊，随着城镇化进程加快，下垫面发生巨大改变，而高山站下垫面状况几乎没有变化，这种人为改变的差异使得城市站气温变暖比高山明显。

对于最高气温，高山站北方显著上升而南方变化趋势不显著；城市站最高气温变化趋势均小于高山站，北方变暖比南方明显，衡阳甚至微弱降温。对于最低气温，高山站和城市站变化趋势均为极显著上升，且城市站最低气温变化趋势均明显大于高

表 2 1957~2005 年高山站和城市站年平均气温、最高、最低气温变化趋势 (单位: $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)

Table 2 Variation trends of mean air temperatures, maximum air temperatures, and minimum air temperatures for mountain stations and urban stations from 1957 to 2005 (units: $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)

高山站	平均气温 (ΔT)	最高气温 (ΔT_{\max})	最低气温 (ΔT_{\min})	城市站	平均气温 (ΔT)	最高气温 (ΔT_{\max})	最低气温 (ΔT_{\min})
长白山	0.23**	0.32**	0.18**	东岗	0.26**	0.11	0.37**
泰山	0.21**	0.15**	0.21**	济南	0.25**	0.11	0.46**
华山	0.21**	0.20**	0.20**	西安	0.31**	0.17*	0.41**
黄山	0.18**	0.19**	0.17**	安庆	0.28**	0.15*	0.38**
庐山	0.16**	0.19**	0.13**	九江	0.18**	0.08	0.30**
南岳	0.14**	0.08	0.15**	衡阳	0.12**	-0.02	0.19**
九仙山	0.13**	0.06	0.16**	永安	0.22**	0.00	0.32**
平均值	0.18	0.17	0.17	平均值	0.23	0.09	0.35

注：**、*分别表示气温变化趋势通过 $\alpha = 0.01$ 、 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平。

山站, 趋势最大的济南比泰山大 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 最小的衡阳比南岳大 $0.04^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

从 1957~2005 年四季气温变化趋势(表略)可知: 平均气温冬、春、秋季显著上升, 而夏季变暖趋势较小; 四季中春季 7 组城市站平均气温变化趋势均大于高山站, 夏季和秋季均有 4 组大于高山站, 冬季有 6 组大于高山站。最高气温北方多显著增加而南方趋势不明显, 冬季均呈变暖趋势; 春季和秋季除一个站外均呈变暖趋势; 夏季多为下降趋势。四季中秋季和冬季高山站最高气温变化趋势均大于城市站, 夏季有 6 组大于城市站, 春季有 3 组大于城市站。最低气温冬季和秋季均为显著变暖趋势, 春季多为显著变暖, 夏季变暖趋势多不显著, 庐山甚至为微弱下降。四季中城市站最低气温变化趋势均大于高山站。

不论年和四季, 就城市站而言最低气温变暖趋势均大于最高气温, 且两者趋势相差较大。而高山站年、春季和秋季最低气温变暖趋势多数站大于最高气温, 夏季和冬季多表现为最低气温小于最高气温, 且两者趋势差异相对城市站要小得多。说明高山站最高、最低气温变化趋势的非对称性相对城市站要小得多, 甚至相反。

3.2 城市化影响分析

城市化影响 ΔT_{cg} 和城市化影响贡献率 E 由公式 (1)、(2) 计算。由图 1 可以看出, 城市化对于平均气温变化趋势的影响除衡阳外均为正贡献, 表明城市化影响加速了变暖趋势。平均气温城市化影响均值达到 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 最大的西安达到 $0.11^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 其次是安庆和永安, 达到 $0.10^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 最小的是衡阳, 为 $-0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。平均气温城市化影响贡献率均值达到 18%, 最大的是永安, 城市化影响达到城市变化趋势的 43%, 其次是西安和安庆, 为 35%; 而最小的是衡阳, 为 -24%。

城市化对于最低气温的影响均为正贡献, 而且最低气温的城市化影响大于平均气温, 表明城市化影响加速了最低气温的变暖趋势。最低气温城市化影响平均值为 $0.18^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 最大的济南为 $0.24^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 其次是西安和安庆 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 最小的是衡阳, 只有 $0.04^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。而最低气温城市化影响贡献率平均值达到 49%, 最大的是九江 57%, 其次是安庆 55%, 最小的是衡阳, 也达到 19%。城市化对于最高气温的影响均为负贡献, 表明城市化影响减弱了最高气温上升趋势。最高气温城市化影响平均值为 $-0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 最大的是东岗, 达到 $-0.21^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 其次是九江和衡阳 $-0.10^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 最小的西安和安庆为 $-0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。最高气温城市化影响贡献有四个城

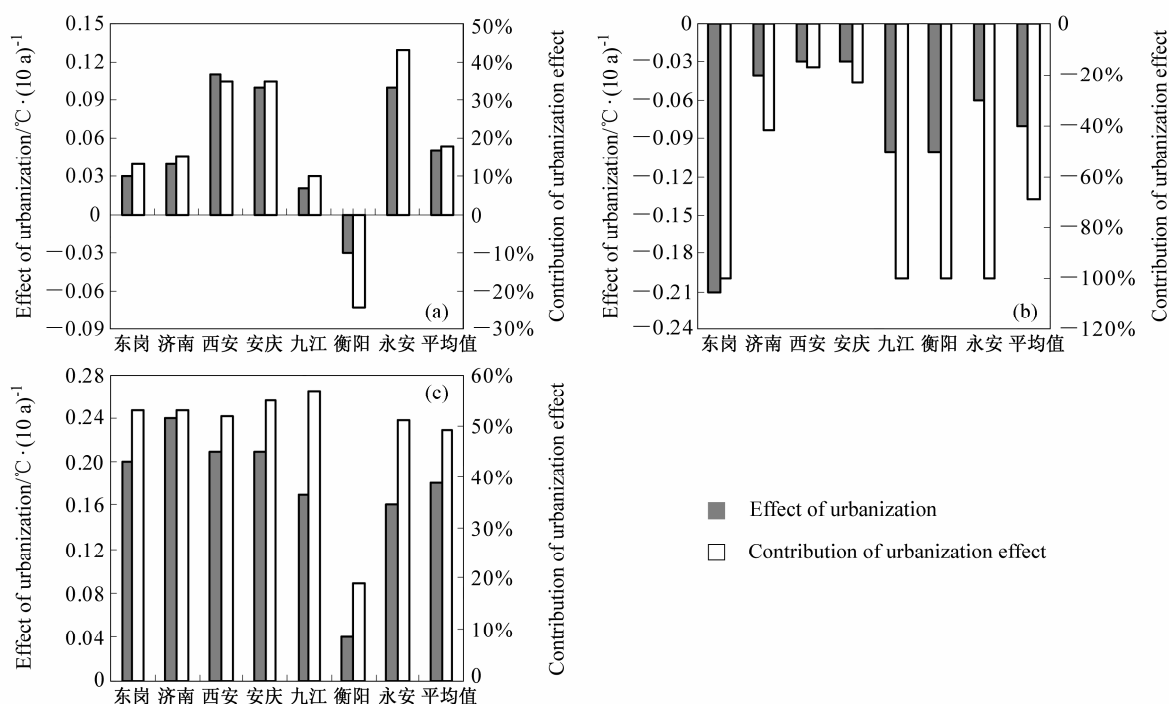


图 1 7 个城市站年平均气温 (a)、最高气温 (b)、最低气温 (c) 变化趋势的城市化影响和城市化影响的贡献率

Fig. 1 Effects of urbanization on annual variation trends of (a) mean air temperatures, (b) maximum air temperatures, and (c) minimum air temperatures and the contribution of urban effect to the overall changes for seven urban stations

市站达到 100%，而最小的西安只有 17%。

四季的情况与年基本相似 (表 3)。城市化对平均气温的影响以正影响为主，春季最明显。城市化影响平均值大小来看，春季城市化影响最大，为 0.11℃/10a，其次是秋季和冬季为 0.04℃/10a，夏季最小。城市化影响贡献率不仅与城市化影响有关，也与城市气温变化趋势有关，因此城市化影响贡献次序稍不一致，春秋季节贡献大而夏冬季贡献小。最高气温的城市化影响以负影响为主，夏季最明显。城市化影响除春季为 0.00℃/10a 外均为负影响，夏季最大，为-0.12℃/10a，其次是冬季和秋季。城市化影响贡献平均值春季正贡献为 7%，夏秋季负贡献超过-60%，冬季负贡献为-8%。最低气温城市化影响以正影响为主，春季最明显。城市化影响从大到小依次分别为：春 (0.22℃/10a)、冬 (0.18℃/10a)、

夏 (0.16℃/10a)、秋 (0.14℃/10a)，城市化影响贡献率次序不同，春夏季贡献大于秋冬季。

3.3 气温变化的非对称性分析

城市站年和四季最低气温变化趋势均明显大于最高气温，存在明显的非对称性。为了定量评价气温的非对称性变化，由公式 (3) 计算气温非对称性变化列于表 4，可见：对于年平均气温来说，高山站气温非对称性变化为-0.15℃/10a 至 0.10℃/10a，平均值为 0℃/10a，有 4 个表现为最低气温变化趋势大于最高气温，3 个表现为最低气温变化趋势小于最高气温；而城市站气温非对称性变化为 0.21℃/10a 至 0.35℃/10a，平均值为 0.26℃/10a，均表现为最低气温变化趋势大于最高气温。

四季各个高山站气温非对称性变化有正有负，从平均值来看趋势差异较小，最大的夏季仅有

表 3 7 个城市站四季平均、最高、最低气温变化趋势的城市化影响和城市化影响的贡献率
Table 3 Effects of urbanization on seasonal variation trends of mean air temperatures, maximum air temperatures, and minimum air temperatures and the contribution of urban effect to the overall changes for seven urban stations

站点	春季						夏季					
	平均气温		最高气温		最低气温		平均气温		最高气温		最低气温	
	ΔT_{cg}	E	ΔT_{cg}	E	ΔT_{cg}	E	ΔT_{cg}	E	ΔT_{cg}	E	ΔT_{cg}	E
东岗	0.03	10%	-0.17	-51%	0.19	76%	-0.10	-43%	-0.33	-95%	0.04	21%
济南	0.06	32%	-0.03	-23%	0.29	100%	0.06	100%	-0.02	-66%	0.28	100%
西安	0.28	100%	0.12	52%	0.41	100%	0.05	100%	-0.14	-100%	0.24	100%
安庆	0.22	100%	0.11	65%	0.31	100%	0.03	55%	-0.09	-100%	0.15	100%
九江	0.08	50%	0.02	9%	0.19	100%	-0.01	-54%	-0.13	-100%	0.13	100%
衡阳	0.04	36%	0.05	100%	0.07	57%	-0.07	-100%	-0.16	-100%	0.06	100%
永安	0.04	52%	-0.08	-100%	0.10	89%	0.14	100%	0.03	52%	0.23	100%
平均值	0.11	54%	0.00	7%	0.22	89%	0.02	23%	-0.12	-73%	0.16	89%

站点	秋季						冬季					
	平均气温		最高气温		最低气温		平均气温		最高气温		最低气温	
	ΔT_{cg}	E	ΔT_{cg}	E	ΔT_{cg}	E	ΔT_{cg}	E	ΔT_{cg}	E	ΔT_{cg}	E
东岗	0.09	100%	-0.16	-88%	0.19	100%	0.11	40%	-0.18	-42%	0.37	100%
济南	-0.01	-4%	-0.10	-58%	0.17	83%	0.04	9%	-0.02	-7%	0.23	57%
西安	-0.01	-2%	-0.07	-24%	0.05	20%	0.11	34%	-0.02	-9%	0.16	49%
安庆	0.10	48%	-0.05	-24%	0.21	100%	0.04	13%	-0.11	-32%	0.16	44%
九江	0.00	1%	-0.18	-62%	0.18	100%	0.00	-2%	-0.13	-48%	0.18	64%
衡阳	-0.03	-20%	-0.15	-100%	0.01	6%	-0.05	-18%	-0.14	-68%	0.02	5%
永安	0.14	100%	-0.04	-60%	0.16	92%	0.06	24%	-0.14	-64%	0.16	64%
平均值	0.04	32%	-0.11	-60%	0.14	72%	0.04	14%	-0.11	-38%	0.18	55%

注： ΔT_{cg} 表示城市化影响 (单位：℃/10a)； E 表示城市化影响贡献率。

表 4 1957~2005 年高山站和城市站的气温非对称性变化 (单位: $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)
Table 4 Asymmetrical variations of air temperatures for mountain stations and urban stations from 1957 to 2005 (units: $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)

城市站	年	春	夏	秋	冬	高山站	年	春	夏	秋	冬
东岗	0.26	0.28	0.19	0.23	0.34	长白山	-0.15	-0.08	-0.17	-0.12	-0.22
济南	0.35	0.41	0.36	0.31	0.33	泰山	0.06	0.08	0.06	0.04	0.08
西安	0.24	0.24	0.38	0.09	0.25	华山	-0.01	-0.05	0.00	-0.03	0.06
安庆	0.23	0.13	0.29	0.20	0.29	黄山	-0.02	-0.07	0.04	-0.07	0.03
九江	0.22	0.09	0.26	0.21	0.30	庐山	-0.06	-0.08	0.00	-0.14	0.00
衡阳	0.21	0.09	0.31	0.20	0.24	南岳	0.08	0.08	0.10	0.04	0.08
永安	0.32	0.29	0.34	0.32	0.33	九仙山	0.10	0.12	0.14	0.11	0.03
平均值	0.26	0.22	0.30	0.22	0.30	平均值	0.00	0.00	0.02	-0.02	0.01

$0.02^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 秋季甚至为 $-0.02^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。城市各站气温非对称性变化均为正, 从平均值来看, 夏季和冬季最大, 为 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 其次是春季和秋季, 也有 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。因此, 城市站气温变化趋势具有非常明显的非对称性, 且最低气温变化趋势均大于最高气温, 而高山站也存在最低气温变化趋势大于最高气温的非对称性特征, 但相比城市站要小得多, 甚至很多站点为反位相。说明城市化影响是气温非对称性变化的重要因素。

3.4 城市化对气温非对称性变化的贡献

最高气温的城市化影响为负而最低气温的城市化影响为正, 说明城市化影响也存在明显的非对称性。为了定量分析城市化影响的非对称性, 由公式 (4) 计算城市化影响非对称性 (图 2)。年城市化影响非对称性为 $0.14^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 至 $0.41^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 北方比南方大, 平均值为 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。四季城市化影响非对称性均表现为正, 范围为 $0.01^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 至 $0.55^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 从平均值来看, 冬季最大, 为 $0.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 其次为夏季和秋季, 最小的是春季, 为 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。说明年和四季城市化影响均存在十分明显的非对称性。

为了认识城市化对气温非对称性变化的贡献, 由公式 (5) 计算气温非对称性变化的城市化贡献列于图 2。年气温非对称性变化的城市化贡献很明显, 在 64%至 100%之间, 平均值为 88%; 四季气温非对称性变化的城市化贡献均为正贡献, 在 15%至 100%之间, 从平均值来看, 秋季最大, 为 90%, 其次是夏季和冬季, 最小的春季, 也有 79%, 而且年和四季均有多站的贡献达到 100%。说明城市化影响对于气温非对称性变化的形成起着主导作用。

4 讨论

本文以高山站作为区域气候背景场, 发现城市化影响对平均气温变暖趋势有明显的增强贡献, 贡献高达 18%。这与任玉玉等 (2010)、赵宗慈 (地球科学编委会, 2010) 总结相关研究认为在局地尺度和区域尺度上, 城市化对地面气温序列影响是不容忽视的结论基本一致。近年来学者关注到城市化对最高气温、最低气温变化趋势的影响存在差异。本文研究表明城市化影响加剧了最低气温的上升趋势, 而且城市化对最低气温的影响比最高气温的影响大得多, 这印证了陈正洪等 (2005, 2007)、邱新法等 (2008)、周雅清和任国玉 (2009)、司鹏等 (2009)、张雷等 (2011) 的相似结论。本文得出的城市化影响对于气温非对称性变化的形成起主导作用的结论也与周雅清和任国玉 (2009)、司鹏等 (2009)、张雷等 (2011) 等认为气温日较差明显减小趋势主要由城市化因素所造成的结论相似。但对于最高气温的城市化影响性质, 本文的结果与陈正洪等 (2005, 2007)、邱新法等 (2008)、司鹏等 (2009) 等分析结果不同, 他们的研究结果均表明最高气温的城市化影响虽然较小, 但仍为正影响。而本文与张雷等 (2011) 的分析结果非常一致, 最高气温的城市化影响较小, 且为负影响, 也与周雅清和任国玉 (2009) 的研究中个别台站和季节的城市化对最高气温趋势影响为负影响的结论一致。造成这种差异的原因可能在于参考站的选择上, 张雷等 (2011) 和司鹏等 (2009) 的研究就是一个例子, 同为分析北京地区气温变化的城市化影响, 因乡村站选择不同而得出最高气温的城市化影

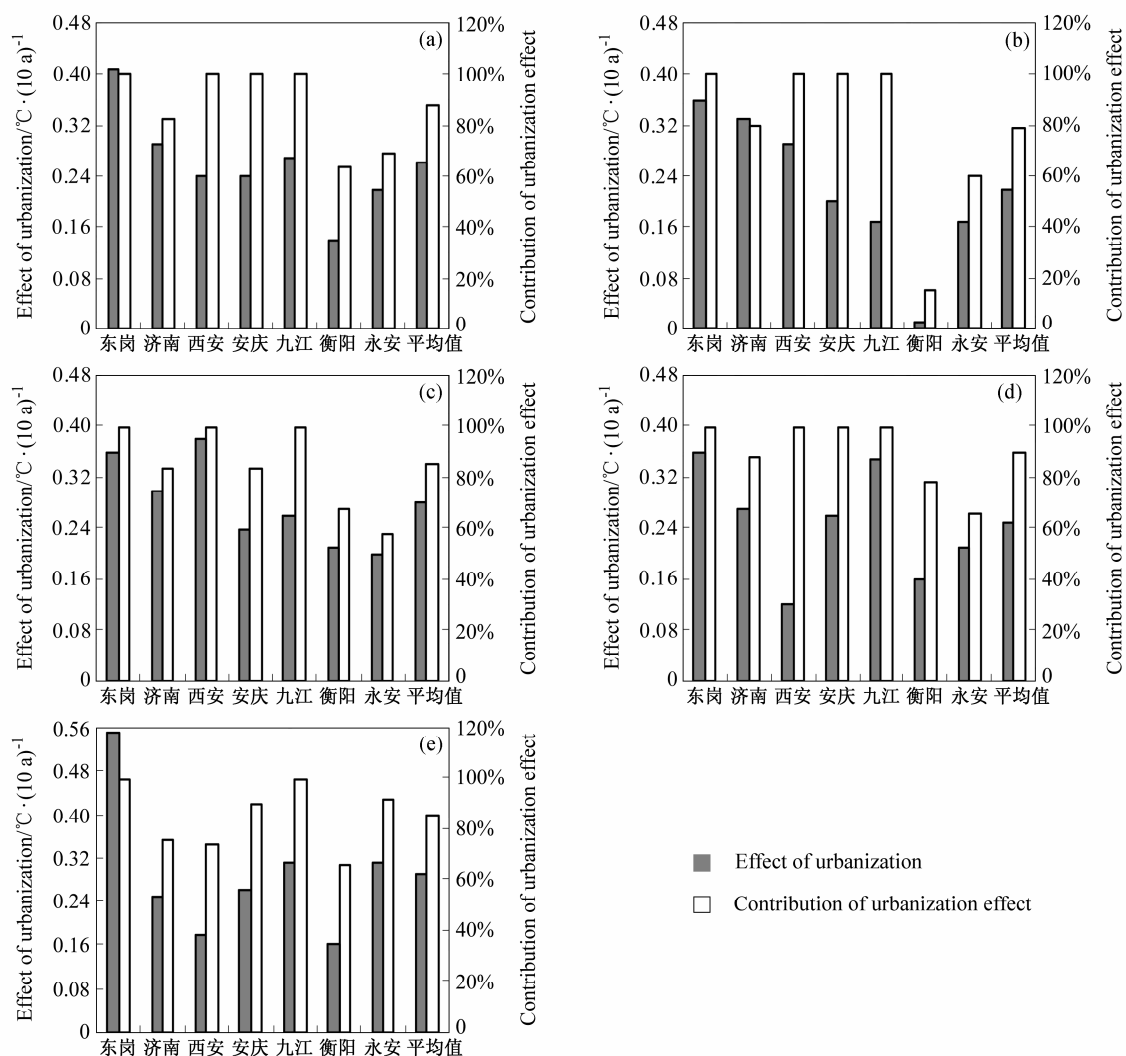


图2 1957~2005年城市站城市化影响的非对称性及气温非对称性变化的城市化贡献率:(a)年;(b)春季;(c)夏季;(d)秋季;(e)冬季

Fig. 2 Asymmetry of the urban effect on air temperatures and the contribution of urban effect to asymmetrical variations of air temperatures for seven urban stations from 1957 to 2005: (a) Annual; (b) spring; (c) summer; (d) autumn; (e) winter

响正负性质明显不同。另外,也有可能与地区差异、研究时段不同、资料处理和趋势计算方法不同有一定关系。

城市化影响对于最高气温变化趋势的减弱贡献最可能与大气污染物增多有密切关系。中国快速城市化过程加剧了大气污染物的排放(Qian et al., 2003, 2006; Richter et al., 2005),改变了大气中气溶胶含量(Alpert et al., 2005)。大气气溶胶通过影响辐射过程来影响气温变化,它的辐射强迫可分为两方面,一是直接辐射强迫,即通过散射和吸收太阳辐射来直接影响城市区域气温变化,城市大气中悬浮的颗粒污染物在白天能吸收一定长波的太阳辐射,粒径大的浮尘对太阳辐射有散射作用,使得到达地面的太阳直接辐射减弱,这对于白天最高气

温变暖是不利的。二是间接辐射强迫,气溶胶可作为云凝结核和冰核影响云的光学特性、云量以及云的寿命(IPCC, 2001; 邓涛等, 2010; 吴蓬萍和韩志伟, 2011)。气溶胶颗粒增多有可能使云滴的数密度增加,云滴的平均半径变小,导致云光学厚度和反射率的增大(Albrecht, 1989),这有可能使云对太阳辐射的反射率增加或使云的维持时间加长(Rotstajn and Liu, 2003),进而使得城市低云量增多(史军等, 2008; 杜春丽等, 2008; Liang and Xia, 2005),意味着在白天反射掉太阳直接辐射就更多,从而使得到达地面的太阳直接辐射减弱,同样对白天最高气温变暖是不利的。数据分析研究表明,城市化过程中大气污染所造成的气溶胶含量上升显著地降低了中国地表接收的总辐射量(李晓文等,

1998; Qian et al., 2006; Liang and Xia, 2005)。因此, 污染物排放增多可能是城市化对最高气温变化趋势为负贡献的重要原因。很多研究者 (Li et al., 1995; 施晓晖等, 2008) 将南方最高气温降低归于污染物增多, 也佐证了这一点推断。若大气污染减弱的话, 很可能会引起最高气温的城市化影响由负转正, 将会增强区域最高气温变暖。

关于气温非对称性变化成因的研究多认为与云量变化和污染排放有关 (Easterling et al., 1997; 陈铁喜和陈星, 2007; Dietmüller et al., 2008)。从高山和城市非对称对比分析结果来看城市化影响是造成气温非对称性变化的主导因素, 它可能通过大气气溶胶影响大气辐射过程来影响气温变化。谢庄和曹鸿兴 (1996)、江志红和丁裕国 (1999)、徐家良 (2000)、胡桂芳等 (2004) 对北京、上海、济南、青岛等城市比较中国 20 世纪 20 年代和近 20 年气温变暖差异时一致认为: 近 20 年来气温变化趋势以最低气温变暖为主, 而 20 年代则以最高气温变暖为主。以高山站为代表的气候背景场来看, 背景场的气温非对称性变化十分微弱, 而城市站最低气温变暖明显大于最高气温, 因此, 城市化影响极有可能是以最低气温变暖为特征的 20 世纪 70 年代以来气候变暖的重要因素。

高山站作为区域气候背景场来衡量城市化对气温变化的影响, 与一般的城郊比较有明显差异。一般在城市站与其邻近非城市化站对比中, 其邻近非城市化站的选取应该考虑: 该参照站处在与城市站在大体相当的经纬度, 处在同一气候与大气环流背景下, 并且大体海拔高度相当, 同时又不受 (或少受) 城市化影响, 具备上述条件才可以作为参照站。高山站代表未受城市化影响的参照站, 受到地形高度的影响, 与处在平原的城市站有较大气候差异, 因此作为参照站并不能直接与城市站进行比较, 但当高山站和城市站处在同一气候与大气环流背景下, 两者变化趋势的差异恰恰能够反映出城市化对气温变化趋势的影响, 这为分析气温变化的城市化影响提供了一条新途径。当然, 如同郊区站、人为选择的乡村站、NCEP 资料、临近海温资料等作为气候背景场一样, 它在拥有优点的同时也存在问题, 有待进一步探讨。

5 结论

本文在对比分析高山站和山下城市站年和四季气温变化趋势的基础上, 以高山站作为区域气候

变化背景场分析了城市化对气温变化趋势影响的性质和程度, 及其对气温非对称性变化的影响, 得出以下结论:

(1) 1957~2005 年平均气温和最低气温呈极显著上升趋势, 北方最高气温显著变暖而南方变暖多不显著。冬季三个气温指标均为显著上升趋势; 春季和秋季平均气温和最低气温多为变暖趋势, 最高气温北方显著变暖而南方变暖趋势微弱, 甚至有下降趋势; 夏季平均气温和最低气温多表现为弱变暖趋势, 而最高气温变化趋势北方有正有负, 南方多为减小趋势。

(2) 平均气温和最低气温变化趋势城市站均比高山站大, 而最高气温变化趋势高山站均比城市站大。四季和年的特征基本相似。

(3) 城市站年和四季最高、最低气温存在明显的非对称性变化, 表现为最低气温变化趋势均明显大于最高气温; 而高山站相比城市站非对称性变化要小得多, 甚至大多站点为反位相。说明城市化影响是气温非对称性变化的重要因素。

(4) 对于年来说, 城市化对于平均气温和最低气温的影响为正, 而对最高气温的影响为负。表明城市化加速了最低气温和平均气温的变暖趋势, 但同时也减弱了最高气温的变暖趋势。四季中除春季外均与年平均的特征基本相同, 最高气温的城市化影响以负影响为主, 最低气温的城市化影响以正影响为主, 而春季城市化影响对于最高气温和最低气温变化趋势均表现为正贡献, 使得春季城市化对平均气温的贡献最明显。

(5) 城市化影响对于气温非对称性变化的形成起着重要贡献。年和四季城市化影响均存在十分明显的非对称性, 且多表现为最低气温的城市化影响为正, 而最高气温的城市化影响为负。气温非对称性变化的城市化贡献不论年和四季均很明显, 进一步表明城市化影响的非对称性是气温非对称性变化的主要原因。

致谢 感谢两位匿名审稿专家提出的宝贵建议。

参考文献 (References)

- Albrecht B A. 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 245 (4923): 1227–1230.
- Alpert P, Kishcha P, Kaufman Y J, et al. 2005. Global dimming or local dimming? Effect of urbanization on sunlight availability [J]. *Geophys.*

- Res. Lett., 32: L17802, doi: 10.1029/2005GL023320.
- 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 [J]. 高原气象, 25 (1): 90–94. Bai Huzhi, Ren Guoyu, Zhang Aiying, et al. 2006. The effect urban heat island on change of regional mean temperature in Gansu Province, China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (1): 90–94.
- 陈铁喜, 陈星. 2007. 近 50 年中国气温日较差的变化趋势分析 [J]. 高原气象, 26 (1): 150–157. Chen Tiexi, Chen Xing. 2007. Variation of diurnal temperature range in China in the past 50 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (1): 150–157.
- 陈正洪, 王海军, 任国玉. 2007. 武汉市城市热岛强度非对称性变化 [J]. 气候变化研究进展, 3 (5): 282–286. Chen Zhenghong, Wang Haijun, Ren Guoyu. 2007. Asymmetrical change of urban heat island intensity in Wuhan, China [J]. Advance Climate Change Research (in Chinese), 3 (5): 282–286.
- 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 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 771–779. Chen Zhenghong, Wang Haijun, Ren Guoyu, et al. 2005. Change of urban heat island intensity and its effect on regional temperature series: A case study in Hubei Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 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 [J]. 气象学报, 63 (4): 534–540. Chu Ziyang, Ren Guoyu. 2005. Change in urban heat island magnitude and its effect on mean air temperature record in Beijing region [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (4): 534–540.
- 邓涛, 张镭, 陈敏, 等. 2010. 高云和气溶胶辐射效应对边界层的影响 [J]. 大气科学, 34 (5): 979–987. Deng Tao, Zhang Lei, Chen Min, et al. 2010. The influence of high cloud and aerosol radiative effect on boundary layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 979–987.
- Dietmüller S, Ponater M, Sausen R, et al. 2008. Contrails, natural clouds, and diurnal temperature range [J]. J. Climate, 21 (19): 5061–5075.
- 地球科学编委会. 2010. 10000 个科学难题·地球科学卷 [M]. 北京: 科学出版社, 843–846. Editorial Board of Earth Sciences. 2010. 10, 000 Scientific Problems: Volume of Earth Sciences (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 843–846.
- 杜春丽, 沈新勇, 陈渭民, 等. 2008. 43a 来我国城市气候和太阳辐射的变化特征 [J]. 南京气象学院学报, 31 (2): 200–207. Du Chunli, Shen Xinyong, Chen Weimin, et al. 2008. Urban climate and solar radiation changes in China in recent 43 years [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (2): 200–207.
- Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. 1997. Maximum and minimum temperature trends for the globe [J]. Science, 277 (5324): 364–367.
- 公安部治安管理局. 2007. 中华人民共和国全国分县市人口统计资料 (2006) [M]. 北京: 群众出版社. Ministry of Public Security's Security Authority. 2007. National Sub-County Population Statistics of the People's Republic of China (2006) (in Chinese) [M]. Beijing: Mass Press.
- He J F, Liu J Y, Zhuang D F, et al. 2007. Assessing the effect of land use/land cover change on the change of urban heat island intensity [J]. Theoretical and Applied Climatology, 90 (3–4): 217–226.
- 胡桂芳, 李芸, 李德萍. 2004. 山东近百年来的最高、最低温度变化 [J]. 气象, 30 (11): 42–46. Hu Guifang, Li Yun, Li Deping. 2004. Changes of maximum and minimum temperature for recent 100 years in Shandong Province [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 30 (11): 42–46.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 291–336.
- IPCC. 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 [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 237.
- 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 [J]. 地球物理学报, 49 (1): 69–77. Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. 2006. Impact of urban growth on the heat island in Beijing [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (1): 69–77.
- 江志红, 丁裕国. 1999. 近百年上海气候变暖过程的再认识——平均温度与最低、最高温度的对比 [J]. 应用气象学报, 10 (2): 151–159. Jiang Zhihong, Ding Yuguo. 1999. Renewed study on the warming process of shanghai during the past 100 years [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 10 (2): 151–159.
- Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, et al. 1990. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land [J]. Nature, 347 (6289): 169–172.
- Jones P D, Lister D H, Li Q. 2008. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China [J]. J. Geophys. Res., 113: D16122, doi: 10.1029/2008JD009916.
- Kalnay E, Cai M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate [J]. Nature, 423 (6939): 528–531.
- Li Q, Zhang A, Liu X, et al. 2004. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 79 (3–4): 165–174.
- 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 1998. 中国近 30 年太阳辐射状况研究 [J]. 应用气象学报, 9 (1): 24–31. Li Xiaowen, Li Weiliang, Zhou Xiuji. 1998. Analysis of the solar radiation variation of China in recent 30 years [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (1): 24–31.
- Li X W, Zhou X J, Li W L, et al. 1995. The Cooling of Sichuan Province in recent 40 years and its probable mechanisms [J]. Acta Meteorologica Sinica, 9 (1): 57–68.
- Liang F, Xia X A. 2005. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961–2000 [J]. Ann. Geophys., 23 (7): 2425–2432.
- 林学椿, 于淑秋. 2005. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应 [J]. 地球物理学报, 48 (1): 39–45. Lin Xuechun, Yu Shuqiu. 2005. Interdecadal changes of temperature in the Beijing region and its heat island effect [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (1): 39–45.
- 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 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 763–770. Liu Xuefeng, Yu Changwen, Ren Guoyu. 2005. Change in urban heat island magnitude and its effect on surface mean air temperature record in Hebei Province, China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese),

- 10 (4): 763–770.
- Parker D E. 2004. Large-scale warming is not urban [J]. *Nature*, 432 (7015): 290.
- Peterson T C. 2003. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: no difference found [J]. *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]. *J. Climate*, 6 (12): 2298–2308.
- 气候变化国家评估报告编委会. 2007. 气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 80–105. Editorial Board on Chinese National Assessment Report on Climate Change. 2007. Chinese National Assessment Report on Climate Change (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 80–105.
- Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, et al. 2006. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33: L01812, doi: 10.1029/2005GL024586.
- Qian Y, Leung L R, Ghan S J, et al. 2003. Regional climate effects of aerosols over China: Modeling and observation [J]. *Tellus Series B*, 55 (4): 914–934.
- 邱新法, 顾丽华, 曾燕, 等. 2008. 南京城市热岛效应研究 [J]. *气候与环境研究*, 13 (6): 807–814. Qiu Xinfu, Gu Lihua, Zeng Yan, et al. 2008. Study on urban heat island effect of Nanjing [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (6): 807–814.
- 曲培青, 施润和, 刘剡, 等. 2010. 基于遥感和 BP 人工神经网络的城乡气象站点划分分析 [J]. *地球信息科学学报*, 12 (5): 726–732. Qu Peiqing, Shi Runhe, Liu Ke, et al. 2010. Discrimination of urban and rural meteorological stations based on remote sensing and BP artificial neural network [J]. *Journal of Geo-Information Science* (in Chinese), 12 (5): 726–732.
- Ren G Y, Chu Z Y, Chen Z H, et al. 2007. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L05711, doi: 10.1029/2006GL027927.
- 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 701–716. Ren Guoyu, Chu Ziyang, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (4): 701–716.
- 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 [J]. *气象科技*, 38 (1): 79–85. Ren Guoyu, Zhang Aiyang, Chu Ziyang, et al. 2010. Principles and procedures for selecting reference surface air temperature stations in China [J]. *Meteorological Science & Technology* (in Chinese), 38 (1): 79–85.
- 任玉玉, 任国玉, 张爱英. 2010. 城市化对地面气温变化趋势影响研究综述 [J]. *地理科学研究进展*, 29 (11): 1301–1310. Ren Yuyu, Ren Guoyu, Zhang Aiyang. 2010. An overview of researches of urbanization effect on land surface air temperature trends [J]. *Progress in Geography* (in Chinese), 29 (11): 1301–1310.
- Richter A, Burrows J P, Nüß H, et al. 2005. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space [J]. *Nature*, 437 (7055): 129–132.
- Rotstain L D, Liu Y G. 2003. Sensitivity of the first indirect aerosol effect to an increase of cloud droplet spectral dispersion with droplet number concentration [J]. *J. Climate*, 16 (21): 3476–3481.
- 史军, 崔林丽, 周伟东. 2008. 1959 年–2005 年长江三角洲气候要素变化趋势分析 [J]. *资源科学*, 30 (12): 1803–1810. Shi Jun, Cui Linli, Zhou Weidong. 2008. Change trend of climatic factors in the Yangtze River Delta from 1959 to 2005 [J]. *Resources Science* (in Chinese), 30 (12): 1803–1810.
- 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. 2008. 暖季中国东部气溶胶影响显著区的气候变化特征 [J]. *中国科学 D 辑*, 38 (4): 519–528. Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Xie Li'an. 2008. Climate change of aerosols significantly affected zone in eastern China in the warm season [J]. *Science China Earth Sciences* (in Chinese), 38 (4): 519–528.
- 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 [J]. *自然灾害学报*, 18 (4): 138–144. Si Peng, Li Qingxiang, Xuan Chunyi, et al. 2009. Contribution of urbanization to change of air temperature in Beijing [J]. *Journal of Natural Disasters* (in Chinese), 18 (4): 138–144.
- 唐国利, 丁一汇. 2006. 近 44 年南京温度变化的特征及其可能原因的分析 [J]. *大气科学*, 30 (1): 56–68. Tang Guoli, Ding Yihui. 2006. The changes in temperature and its possible causes in Nanjing in recent 44 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (1): 56–68.
- 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影响 [J]. *应用气象学报*, 19 (6): 722–730. Tang Guoli, Ren Guoyu, Zhou Jiangxing. 2008. Change of urban heat island intensity and its effect on surface mean air temperature records in southwest China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 19 (6): 722–730.
- 唐红玉, 翟盘茂, 王振宇. 2005. 1951–2002 年中国平均最高、最低气温及日较差变化 [J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 728–735. Tang Hongyu, Zhai Panmao, Wang Zhenyu. 2005. On change in mean maximum temperature, minimum temperature and diurnal range in China during 1951–2002 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (4): 728–735.
- 田武文, 黄祖英, 胡春娟. 2006. 西安市气候变暖与城市热岛效应问题研究 [J]. *应用气象学报*, 17 (4): 438–443. Tian Wuwen, Huang Zuying, Hu Chunjuan. 2006. Research on climate warming and urban heat island in Xi'an [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 17 (4): 438–443.
- Trenberth K E. 2004. Rural land-use change and climate [J]. *Nature*, 427 (6971): 213.
- Vose R S, Karl T R, Easterling D R, et al. 2004. Impact of land-use change on climate [J]. *Nature*, 427: 213–214.
- Wang W C, Zeng Z M, Karl T R. 1990. Urban heat islands in China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 17 (13): 2377–2380.
- 吴蓬萍, 韩志伟. 2011. 东亚地区硫酸盐气溶胶间接辐射和气候效应的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 35 (3): 547–559. Wu Pengping, Han Zhiwei. 2011. A modeling study of indirect radiative and climatic effects of sulfate over East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (3): 547–559.
- 吴息, 王少文, 吕丹苗. 1994. 城市化增温效应的分析 [J]. *气象*, 20 (3): 7–9. Wu Xi, Wang Shaowen, Lü Danmiao. 1994. The analysis of heating effect of urbanization [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 20 (3): 7–9.
- 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 2007. 长江三角洲城市带扩展对区域温度变化

- 的影响 [J]. 地理学报, 62 (7): 717–727. Xie Zhiqing, Du Yin, Zeng Yan, et al. 2007. Impact of urbanization on regional temperature change in the Yangtze River Delta [J]. Journal of Geographical Sciences (in Chinese), 62 (7): 717–727.
- 谢庄, 曹鸿兴. 1996. 北京最高和最低气温的非对称变化 [J]. 气象学报, 54 (4): 502–507. Xie Zhuang, Cao Hongxing. 1996. The asymmetric trend of change in maximum and minimum temperature in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (4): 502–507.
- 徐家良. 2000. 近百余年来上海两次增暖期的特征对比及其成因 [J]. 地理学报, 55 (4): 501–506. Xu Jialiang. 2000. Features of two warming periods and their causes in Shanghai for the last 127 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 55 (4): 501–506.
- 徐祥德, 汤绪, 张光智. 2001. 城市化环境气象原理 [M]. 北京: 气象出版社, 11–55. Xu Xiangde, Tang Xu, Zhang Guangzhi. 2001. Principles of Urban Environment Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: Meteorological Press, 11–55.
- 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 2001. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析 [J]. 应用气象学报, 12 (3): 337–347. Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. 2001. Confidence analysis of NCEP/NCAR 50 year global reanalyzed data in climate change research in China [J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (3): 337–347.
- Yang X C, Zhang Y L, Liu L S, et al. 2009. Sensitivity of surface air temperature change to land use/cover types in China [J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 52 (8): 1207–1215, doi: 10.1007/s11430-009-0085-0.
- 曾侠, 钱光明, 潘蔚娟. 2004. 珠江三角洲城市群城市热岛效应初步研究 [J]. 气象, 30 (10): 12–16. Zeng Xia, Qian Guangming, Pan Weijuan. 2004. Study on urban heat island effect in Pearl River Delta urban group [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 30 (10): 12–16.
- 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 [J]. 气象学报, 68 (6): 957–966. Zhang Aiyang, Ren Guoyu, Zhou Jiangxing, et al. 2010. On the urbanization effect on surface air temperature trends over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (6): 957–966.
- Zhang J Y, Dong W J, Wu L Y, et al. 2005. Impact of land use changes on surface warming in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22 (3): 343–348.
- 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 [J]. 地球物理学报, 54 (5): 1150–1169. Zhang Lei, Ren Guoyu, Liu Jiang, et al. 2011. Urban effect on trends of extreme temperature indices at Beijing Meteorological Station [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 54 (5): 1150–1169.
- 赵娜, 刘树华, 虞海燕. 2011. 近 48 年城市化发展对北京区域气候的影响分析 [J]. 大气科学, 35 (2): 373–385. Zhao Na, Liu Shuhua, Yu Haiyan. 2011. Urbanization effects on local climate in Beijing in recent 48 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 373–385.
- 赵宗慈. 1991. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响 [J]. 气象, 17 (4): 14–16. Zhao Zongci. 1991. The changes of temperature and the effects of the urbanization in China in the last 39 years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 17 (4): 14–17.
- Zhou L M, Dickinson R E, Tian Y H, et al. 2004. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101 (26): 9540–9544.
- 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 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 743–753. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2005. Identifying and correcting urban bias for regional surface air temperature series of North China over period of 1961–2000 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 743–753.
- 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 [J]. 高原气象, 28 (5): 1158–1166. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2009. The effect of urbanization on maximum, minimum temperatures and daily temperature range in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (5): 1158–1166.
- 朱家其, 汤绪, 江灏. 2006. 上海市城区气温变化及城市热岛 [J]. 高原气象, 25 (6): 1154–1160. Zhu Jiaqi, Tang Xu, Jiang Hao. 2006. The air temperature variation and heat island effect in urban area of Shanghai city [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (6): 1154–1160.