

王建鹏, 孙继松, 杜继稳, 等. 2009. 西安地区气温的年代际变化及其受城市化进程的影响 [J]. 气候与环境研究, 14 (4): 434-444.
Wang Jianpeng, Sun Jisong, Du Jiwen, et al. 2009. Interdecadal variation of the temperature and the impact of urban growth on the temperature in Xi'an region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 434-444.

西安地区气温的年代际变化及其受城市化进程的影响

王建鹏¹ 孙继松² 杜继稳³ 张 弦⁴ 薛春芳¹ 高维英¹

1 西安市气象局, 西安 710016

2 北京市气象局, 北京 100089

3 陕西省气象局, 西安 710015

4 中国人民解放军空军指挥学院, 北京 100089

摘 要 利用西安及周边 14 个观测站 1966~2005 年冬季 (12~2 月)、夏季 (6~8 月) 平均气温及城市化信息的相关统计资料, 以各站与 14 站区域平均气温的差值 (空间距平值) 反映城市热岛空间分布, 以城区站与区域平均气温的差值代表城市影响程度, 探讨了城市影响及城市化指数在气温突变和热岛效应中的作用。分析结果表明: 1) 冬夏季, 近城区、平原区、浅塬山区与整个区域平均气温变化一致, 表现为大尺度的气候变化特征, 而城区和全区变化同步性差, 呈现小尺度气候变化特征。2) 冬季全区在 1977 年发生增温突变, 这次突变以自然增温为主, 与全国 (1980 年) 突变时间基本同步, 但略显偏早, 比西北区 (1984 年) 偏早 7 年。夏季全区在 1988 年发生第一次气温突变增温, 比西北区 (1993 年) 偏早 5 年, 偏早原因可能是地形和城市化共同作用。3) 冬、夏季平均热岛强度分别为 0.65 °C、0.46 °C, 具有典型性。4) 城区冬季突变点 (1989 年) 后西安城区的平均气温增加 1.3 °C, 城市影响在气温突变中贡献了 0.35 °C。夏季突变点 (1987 年) 后平均气温增加了 0.4 °C, 城市影响贡献增温 0.39 °C, 夏季气温突变可能主要是由城市影响造成的。5) 城市房屋竣工面积、市区总人口、公共汽车数量等城市化指数与气温空间距平之间有着较为密切的正线性相关关系。城市化是城区在冬季 1989~1995 年、夏季 1987~1995 年间频繁发生突变式增温的主要因素。

关键词 年代际变化 气温突变 热岛效应 城市化进程

文章编号 1006-9585 (2009) 04-0434-11 **中图分类号** P463.3 **文献标识码** A

Interdecadal Variation of the Temperature and the Impact of Urban Growth on the Temperature in Xi'an Region

WANG Jianpeng¹, SUN Jisong², DU Jiwen³, ZHANG Xian⁴, XUE Chunfang¹, and GAO Weiyang¹

1 *Xi'an Meteorology Bureau, Xi'an* 710016

2 *Beijing Meteorology Bureau, Beijing* 100089

3 *Shaanxi Meteorology Bureau, Xi'an* 710015

4 *Air Force Command College, Chinese People's Liberation Army, Beijing* 100089

Abstract The impact of urban growth on the temperature jump and the heat island in Xi'an region, China, has been investigated using temperature data measured at 14 observation stations from 1966 to 2005. The urban impact was stood for

收稿日期 2008-06-16 收到, 2009-03-05 收到修定稿

资助项目 科技部行业专项 GYHY200706004

作者简介 王建鹏, 男, 1972 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事天气气候研究。E-mail: xawjp@163.com

by the difference of average temperature between urban and suburban areas. The conclusions can be drawn as follows: 1) In summer and winter, the temperature temporal variation characteristics over suburbs, plain area, hill, are conformance with the regional average temperature, and represents the large scale climate characteristics, but small scale climate variation characteristics are represented in urban region which is different with the areas mentioned above. But, there are different phases in the long-term change of the urban and regional average temperature, which has small-scale climate feature. 2) Xi'an region had a temperature increasing jump mainly with natural increase in the winter of 1977, somewhat earlier than the whole China, seven years earlier than Northwest China. The first summer temperature increasing jump appeared in 1988, five years earlier than Northwest China. 3) The effect of urban heat island was stronger in winter (0.65°C) than in summer (0.46°C). 4) In winter the average temperature increased 1.3°C after the temperature jump in 1989, and the urban impact accounts for 0.35°C ; In summer, the average temperature increased 0.4°C after the temperature jump in 1987, and the urban impact accounts for 0.39°C . It indicates that the urban impact plays an important role in the temperature increase in summer. 5) The urbanization index, such as building proportion, the population of urban area and the quantity of the buses, and the variation of temperature are closely correlated. It can be concluded that the urbanization is the main reason for the temperature increase during the winters from 1989 to 1995, and the summers from 1987 to 1995.

Key words interdecadal variation, temperature jump, urban heat island, urbanization

1 引言

近百年来, 全球气候正经历一次以增暖为主要特征的显著变化, 全球变暖问题已经成为各国政府、社会公众以及科学界共同关心的重大问题。中外科技工作者在气候变暖的趋势、幅度及原因等方面开展了大量的研究工作 (Trenberth, 1990; 王绍武, 1993; 徐世晓等, 2001; 于淑秋等, 2005), 指出引起气候变化的原因包括自然因素与人类活动两大类。研究表明, 在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初, 北半球海平面气压、500 hPa 高度及北太平洋海温发生了跃变, 在跃变前后, 我国 1 月、7 月的温度和降水也随之发生了变化 (Yu et al., 2002)。而西北地区在 1986 年前后发生了一次明显的气候跃变, 要比全国晚 6~8 年 (于淑秋等, 2003)。西安位于我国西北地区东部, 为西北最大城市, 对其气温变化进行分析, 并与全国、西北区的气温变化进行对比是本文研究的重点之一。同时热岛是人类活动对气候变化影响的表征之一, 国内各大中城市的热岛研究表明, 在气候平均意义上, 上海、北京、兰州等地都存在不同强度的热岛效应 (杨德保等, 1994; 束炯等, 2000; 佟华等, 2004; 林学椿等, 2005; 谢庄等, 2006; Liu et al., 2007)。而城市化进程是城市热岛形成的主要原因, 季崇萍等 (2006) 用北京城市热岛强度和总人口对数长期变化的回归分析表明, 两者具有很好的正相关

关系; 丁金才等 (2002) 对上海盛夏热岛效应的研究指出, 城市的市区建成区面积、土地利用类别、人口密度等都市化因素都影响到城市热岛效应的范围和强度, 并提出风向是影响上海热岛效应的范围和强度变化的主要因子。西安城市化进程和热岛之间的关系是本文研究的另一重点。

过去的 50 年间, 尤其近 10 年来, 西安城市经历了极大的发展, 城市建成区面积、城区人口及密度、功能区设置、环境面貌、综合实力等都发生了巨大变化。孙旭东等 (1994) 分析计算了西安城市的热力场的特性和强度, 并评估了由于城市能源消耗总量的增加对未来城市热岛的影响。田武文等 (2006) 应用气候统计的方法分离了气候变暖过程中由于城市热岛效应引起的增温作用。由于前者分析时间偏早, 未能涉及近期城市发展对气温的影响, 后者在城市发展状况对城市热岛效应影响方面未展开讨论。为了尽可能地减小对热岛效应的评估差异, 适当增加远郊区的站数, 用一定时间长度城乡多点的平均值之差表示热岛强度相对好一些 (刘继韩, 1987)。本文利用西安及周边地区气温资料, 结合西安城市发展统计资料, 对西安地区气温年代际变化及城市化进程进行探讨。

2 资料来源与处理

选取西安及周围的高陵、临潼、蓝田、长安、户县、周至、富平、泾阳、咸阳 (农业气象试验

观测站)、礼泉、兴平、武功、乾县共 14 个观测站 1966~2005 年共 40 年的冬季 (12~2 月)、夏季 (6~8 月) 平均气温资料。其中, 高陵因建站晚, 1966~1969 年气温用气候平均值代替; 泾阳、礼泉 1968 年缺测, 用气候平均值代替。所选站中与西安站相差经度最大 44' (乾县)、纬度 29' (富平), 均处于关中平原或浅塬 (山) 区, 最大海拔高度差为 238.7 m。站点分布及海拔高度情况见图 1。研究区域处于关中盆地腹部, 介于陕北高原与秦岭山地之间, 北为陕北黄土高原浅塬, 南为秦岭北坡浅山区, 地貌主体为南北高中间低, 西安城区建在渭河平原的二级阶地上。

适当增加远郊区站数的限制条件是要保证所选站处于同一气候区 (林学椿等, 2005)。本文分别计算冬夏季西安城区气温与其他站的相关系数, 冬季和高陵站相关最小, 为 0.81, 夏季和礼泉相关最小, 为 0.79, 其他各站的冬夏季在 0.87~0.99, 均超过 99% 信度检验。用夏季平均气温对以上 3 站进行聚类分析 (图 2), 距离西安相对较远且地形较为复杂的乾县和西安东南部郊县蓝田气候相似; 礼泉与西安城区近郊的高陵县相比, 气候更接近于西安。以上分析说明本文所选各站处于同一气候区。

本文所用的城市化信息及相关统计资料来源于《西安 50 年——统计资料, 1949~1998 年》(西安统计局, 1999) 和 1985~2006 年的西安市统计年鉴。

本文研究区域内的一部分站在行政上不属于西安, 为了叙述方便, 将研究区域统称西安地区。

3 西安地区气温年代际变化及城市热岛特征

3.1 气温周期变化及突变特征

将以上 14 个站进行如下划分: 西安代表城

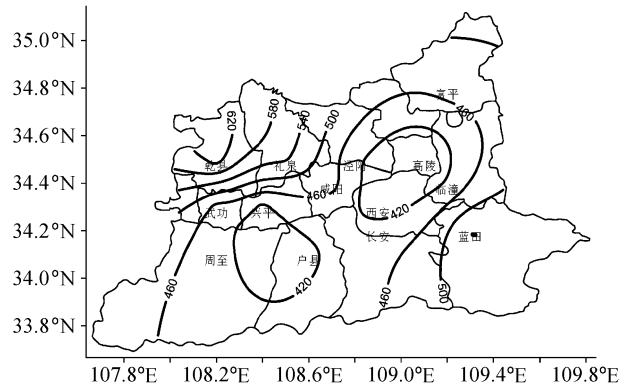


图 1 研究区域站点分布和海拔高度等值线 (间隔 40 m)
Fig. 1 Observation stations and height above sea level (interval is 40 m)

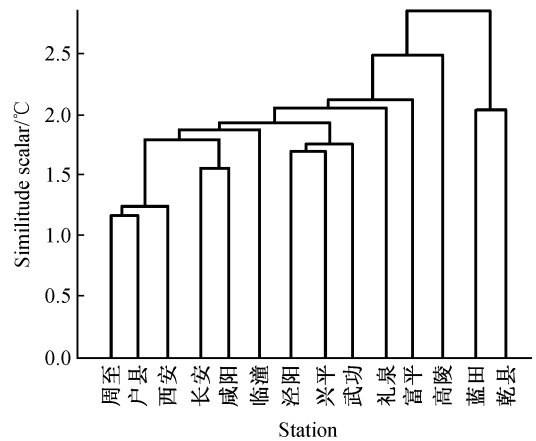


图 2 研究区域各站夏季气温聚类分析
Fig. 2 Clustering analysis of summer temperature at the observation stations

区, 临潼、高陵、长安、泾阳的平均值代表临近期区站, 兴平、武功、周至、户县、长安、泾阳、高陵、临潼的平均值代表平原区, 蓝田、礼泉、乾县的平均值代表浅塬 (山) 区。为消除因海拔高度而导致差异, 将 14 个站的平均气温按照 $0.6^{\circ}\text{C} (100\text{ m})^{-1}$ 的垂直递减率统一订正到平原地区的平均高度 (取 398 m)。用功率谱方法对冬、夏季平均气温变化进行周期分析, 如表 1 所示。

表 1 不同代表区域功率谱周期分析

Table 1 Temperature cycles analysis in different representative regions

季节	周期	城区	近城区	平原区	浅塬 (山) 区	全区
冬季	未滑动第一周期	无显著周期	4.0	4.0	4.0	4.0
	3 年滑动第一周期	无显著周期	4.4	4.4	7.3	7.3
夏季	未滑动第一周期	3.4	24.0	24.0	24.0	24.0
	3 年滑动第一周期	5.5	5.5	5.5	无显著周期	5.5

表 1 表明各代表区域气温有两种不同的尺度变化 (95% 信度)。冬、夏季, 在未做滑动平均的情况下, 除城区外, 其他区域同全区气温变化一致, 均分别具有 4.0、24.0 a 的周期变化, 表现为大尺度的气候变化特征, 而城区在冬、夏季分别表现为无显著周期、3.4 a 的短周期特征, 和全区变化同步性差。分析其原因, 可能是由于影响城区气温变化的因素复杂, 城区气温的逐年变化受不断发展变化的城市环境影响, 多小尺度变化, 掩盖了区域性长周期、短周期变化。冬季 3 年滑动第一周期分析也表明: 近城区、平原区的 4.4 a 周期短于浅塬区及全区的 7.3 a 周期变化, 也可能是因为近城区、平原区受城市化影响相对明显的缘故。

从一个稳定的气候阶段向另一个稳定的气候阶段过渡, 且气候阶段的持续时间的长度远大于过渡时期的长度, 这种现象称作年代际气候突变 (林学椿等, 2005)。近百年来, 中国气温的变化有 3 次全国性的突变, 分别在 1920、1955 和 1980 年 (程乾生等, 1995)。气候突变可用统计方法来检测。林学椿等 (2005) 用滑动 t 检验法研究发现: 北京地区年均气温突变发生在 1981 年, 突变后比突变前增温 0.55°C 。于淑秋等 (2003) 用同样方法研究了我国西北地区近 50 年降水和温度的变化, 指出该地区全年在 1986 年前后发生了一次明显的气候突变, 要比全国气候突变晚 6~8 年, 按季节分析, 则冬季突变点在 1984 年, 夏季在 1993 年, 突变后比突变前全区年平均气温上升了

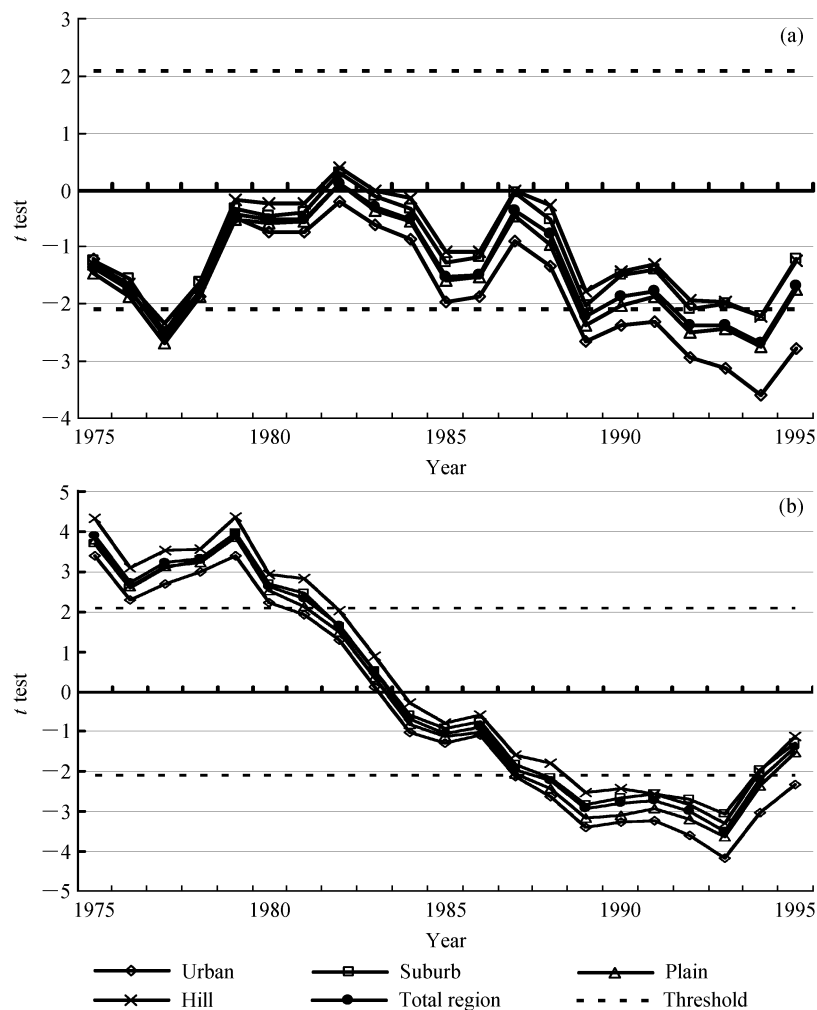


图 3 不同代表区域气温的 10 年滑动 t 检验: (a) 冬季; (b) 夏季

Fig. 3 10-year running t -test of temperature in different representative regions: (a) Winter; (b) summer

0.51℃, 冬季上升了 1.27℃, 夏季 0.08℃。

为了消除大气环流背景本身的年代际变化对平均气温造成的影响, 并考虑到所研究区域气温变化在冬夏季存在 7.3、5.5 年的周期, 应用 10 年滑动 t 检验, 分别对城区、近城区、平原区、浅塬区及全区进行气候突变检测 (图 3, 信度为 95%)。

统计量

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}},$$

其中, x_1 、 x_2 为基准点前后气温两段子序列, n_1 、 n_2 为对应子序列的年代数, 即样本数, $\bar{x}_1$ 、 $\bar{x}_2$ 为两段子序列的平均值, 方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 , 若 $t < 0$, 表示增温。

冬季 (图 3a), 除在 1982 年略变冷外, 40 年来全区气温呈波动式上升趋势, 5 个区域 t 值逐年间距变大, 说明城乡气温差别越来越明显。就本文研究区域整体而言, 40 年来气温分别在 1977、1989、1992、1993、1994 年发生突变, 且在 1994 年升温突变最为强烈; 城区 1977 年、1989~1995 年发生突变, 也以 1994 年最为强烈; 浅塬区在 1977、1994 年突变。Yu et al. (2002) 指出: “在 20 世纪末到 80 年代初, 北半球海平面气压、500 hPa 高度及北太平洋海温发生了跃变, 在跃变后我国 1 月份的海平面气压明显减小, 冷空气活动减弱”, 可以认为 1977 年西安地区冬季气温这次突变以自然增温为主要引起因素, 基本和全国变化时间同步, 但略显偏早, 但比西北地区 (1984 年) 偏早 7 a。另外, 进入上世纪 80 年代, 城区在 1989 年开始频繁发生突变, 而浅塬山区直到 1994 年发生突变, 这充分反映着 1989~1995 年西安城市发展对城区气温的剧烈影响, 城区 1989 年开始的频繁气温突变增温主要在城市化作用影响下造成的, 对此方面将在第 4 节给予进一步论证。

夏季 (图 3b), 全区 1988 至 1994 年发生增温突变, 城区、平原区、浅塬 (山) 区 3 个区域开始增温的突变点分别在 1987、1988、1989 年, 由城区至远城区呈现逐年推后, 表明城市化进程及热岛效应逐年向外扩张。夏季 1988 年的全区性第一次气温增温突变比西北区 (1993 年) 偏早 5 a。

冬季突变后比突变前 (突变点 1977 年) 全区

增温 1.1℃, 其中城区最高, 为 1.2℃, 平原区 1.1℃, 浅塬山区最低, 为 0.9℃。夏季突变后比突变前 (突变点 1988 年) 全区增温 0.24℃, 其中城区仍最高, 为 0.46℃, 平原区 0.27℃, 浅塬山区最低, 为 0.0℃。

综上所述, 冬、夏季气温增温突变时间, 西安地区比所处的西北地区偏早, 西安城区又比平原区、浅塬 (山) 区偏早, 且增温程度又有较显著差异。这可能有以下两个方面的原因: 一方面可能是因为西安是西北最大城市, 城市化进程早于西部其他城市; 另一方面可能是因其位于西北地区东部这一地理位置, 同时受盆地地形地貌影响。陈明等 (1995) 研究指出盆地内易形成逆温稳定层结。杨梅学等 (1998) 对复杂地形上城市热岛进行了数值模拟, 结果显示地形山谷风对热岛环流有影响, 热岛强度有明显的时间变化, 在取消地形后, 热岛强度有所降低。由于本文研究区域处于关中盆地腹部, 冷暖空气受北部黄土高原、南部秦岭大地形的阻挡, 在盆地内风速减弱, 风向改变。对 1971~2000 年西安地区风向、风速进行统计, 其中静风频率最大, 最多风向常年为西北风, 具备了热岛效应易发生在小风、大气层结稳定的基础条件, 热岛效应加强了城乡温度变化的差别, 可以认为西安地区的温度变化与其所处的地理位置及地形有关, 至于两者之间细致的联系, 有待进一步分析。

3.2 不同区域气温的年代际变化对比

取 1966~1975 年、1976~1985 年、1986~1995 年、1996~2005 年 4 个阶段, 对比分析冬、夏季城区、近城区、平原区、浅塬区 4 个不同区域气温的年际变化。图 4 为夏季各个区域温度空间距平 (各代表区域温度与整个研究区域平均温度差) 的年际变化图, 可以看出: 相对整个区域平均状况而言, 城区气温持续上升, 由前 2 个时期的偏冷转变到后 2 个时期的明显偏暖, 城区和平原区温度之差, 第一时期为 -0.04℃, 到第四时期增为 0.54℃, 增幅明显。冬季城区和平原区温度之差 (图略), 第一时期为 0.1℃, 在第四时期增为 0.72℃。

3.3 西安地区热岛特征

某站每 10 年的平均气温与同期所有 14 站区域平均气温的差值 (即空间距平值) 表示空间上

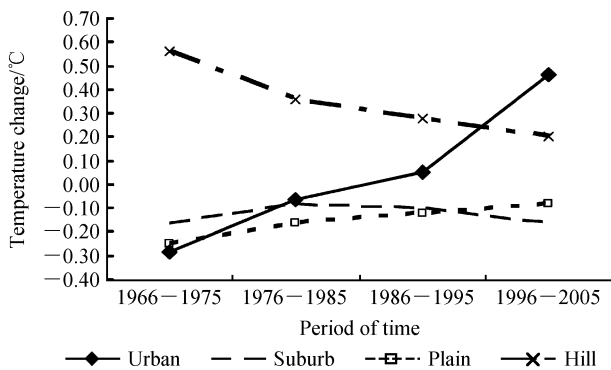


图4 不同代表区域夏季气温的年代际变化

Fig. 4 Interdecadal temperature change in different representative regions in summer

该站由于本地城市规模、观测环境改变及临近大城市影响三项所产生的局地变化，城外站如不考虑本地小县城规模及观测环境的改变，就可以认为反映的是大城市热岛效应在空间的分布（图5）。

本文把西安城区气温减去整个研究区域的平均气温定义为平均热岛强度。最近10年来，冬夏两季均形成了以西安为中心的明显“热岛”，城市热岛效应造成西安城区与临近区域的温度梯度加大，且冬强于夏，同时冬季热岛效应的影响强度和范围大于夏季。平均热岛强度冬、夏季分别为 0.65°C 、 0.46°C ，根据国内外热岛研究结果（如徐祥德等，2002），一般百万人以上的大城市平均气温约高于郊区 $0.5^{\circ}\text{C}\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ ，可见西安城区平均热岛强度具有典型性。

由于在最后10年冬夏两季形成了明显的“岛”形分布，这样西安与周边临近各站的气温差异均将

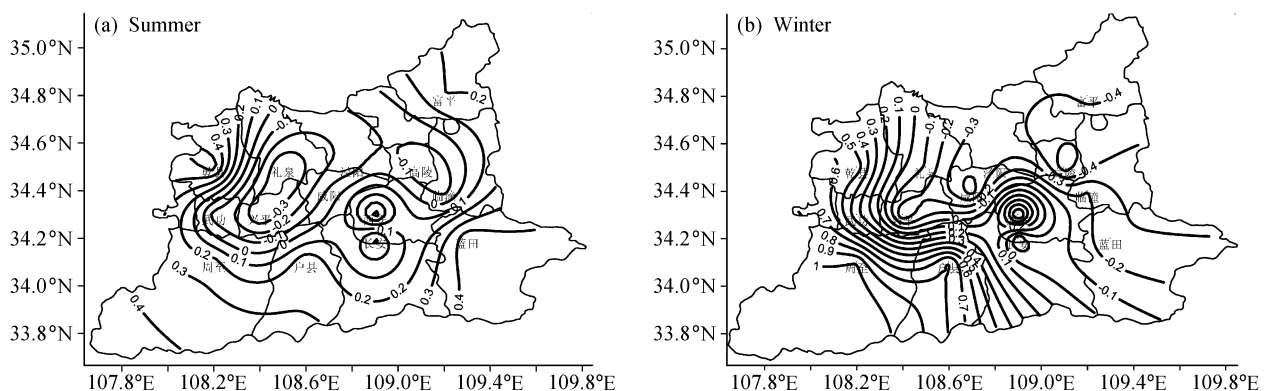
会加强。定义西安城区气温减去与城区气温差异最大的郊区所在站的气温为最大热岛强度，那么40年来，夏季最大热岛强度年际变化及与城区温差最大的郊区站为： -0.47°C （临潼）、 -0.31°C （临潼）、 0.48°C （兴平）、 0.87°C （礼泉）；冬季则为 0.5°C （泾阳）、 0.55°C （高陵）、 0.70°C （高陵）、 1.21°C （高陵）。

4 西安气温变化和城市化进程的关系

4.1 西安城市化进程概述

西安位于关中平原中部，北临渭河，南依秦岭，面积 9983 km^2 ，2001年建成区面积达 183.7 km^2 （郎海鸥等，2007），2005年总人口741.7万，市区人口533.2万，是陕西省乃至西北地区的政治、经济、文化中心。

张思锋等（2006）基于层次分析法对西安城市化水平做了定量分析：如果以美国、日本等7国及我国京、沪的城市化平均水平作为标准城市化水平，那么，西安城市化综合水平相当于标准城市化的62.16%，其中人口城市化水平达到标准城市化的72.32%。卢新卫等（2006）按照西安城市化发展速度，将西安的城市化过程大体上划分为3个阶段：第1阶段，1952~1957年，城市化快速推进，近5年时间城市化水平提高了11.1个百分点，城市化水平年增长速率平均为2.22%；第2阶段，1957~1978年，城市化进程相当缓慢，10多年时间内城市化水平基本保持不变，在10年文革期间甚至有降低趋势；第3阶段，1978~

图5 研究区域1996~2005年热岛效应空间分布（间隔 0.1°C ）：（a）夏季；（b）冬季Fig. 5 Spatial distribution of urban heat island from 1996 to 2005 in the research region (interval is 0.1°C) : (a) Summer; (b) winter

2001 年,城市化水平稳步上升,22 年时间内城市化水平提高了 10 个百分点,城市化水平年增长率在 0.45%,略低于全国的平均水平(0.62%)。城市的快速发展加大了城乡下垫面、人为热、温室气体排放及大气污染等方面的差异,从而造成了气象要素的差异。

4.2 城市化进程对西安城区温度变化的影响

设 A_1 、 T_1 和 A_2 、 T_2 为某站第 1 和第 2 个 10 年的单站气温与相应时段区域多站平均值,则该站这两个 10 年气温的空间距平差可表示为: $(A_1 - T_1) - (A_2 - T_2) = (A_1 - A_2) - (T_1 - T_2)$,即为该站气温变化 $(A_1 - A_2)$ 减去区域平均年代际气候变化量 $(T_1 - T_2)$,这样就分离了气候变化的影响,能较好地反映因城市发展造成的温度变化幅度。

从表 2 可看出,1996~2005 年与 1976~1985 年相比,冬季增温 1.7℃,其中 0.8℃为城市化影响,夏季增温 1.5℃中,0.9℃为自然气候变化增温,0.6℃为城市化影响导致的升温。冬夏季城市影响分别占 47%、40%,表明城市化进程对气温的影响显著。

分析 1966~1978 年和 1979~2005 年城市发展速度明显不同的两个时期,尤其是对 20 世纪 60 年代与 1995~2005 年的热岛效应变化情况进行对比(表 3)。可以看出,城市发展上升期与缓慢期相比,热岛效应增强,冬季增加了 0.20℃,夏季变化表现更为明显,由原来的偏冷变为偏暖,增加了 0.30℃。随着城市化进程的加快,60 年代后期与 1995~2005 年城市发展快速期相比,冬季热岛效应增加了 0.60℃,夏季增加了 0.76℃。

同样对城市影响在气温突变前后的作用进行

统计。上节指出,西安城区因城市化造成的气温突变冬季出现在 1989 年,夏季出现在 1987 年。冬季 1989 年前后西安城区的平均气温分别为 0.8℃、2.1℃,增温 1.3℃,对应城区局地变化为 0.05℃、0.40℃,即城市影响在冬季气温突变中贡献了 0.35℃,占 27%,剩余的 0.95℃主要为自然增温变化。夏季,突变后气温增加了 0.4℃,城区局地变化增温 0.39℃,占 97.5%,即夏季气温突变主要是由城市影响造成的。

张爱英等(2006)研究指出,济南站城市热岛效应的增强因素对其平均温度的贡献率为 23.43%,季节增暖以夏季最大,冬季最小;陈正洪等(2005)研究表明,湖北省基本站和基准站热岛增温贡献率可达 60%以上。本文研究结论与以上研究结果相近,但比田武文等(2006)给出的因城市影响造成的 1.07℃增温幅度略偏小,这是由于本文所选的代表站多于其所选的 4 个站,增加了一些远郊站及浅塬(山)区站。因为在一定条件下,更多站数的平均状况更能代表研究区域的气候背景特征,所以本文的结果更具有代表性。

4.3 城市化指数和热岛效应的关系

气温的变化和城市热岛效应密切相关,大量研究指出,热岛效应是城市化的人为因素和因地形地貌决定的局地天气气候条件共同作用下形成的。人为因素以下垫面性质的改变(如建筑、城市道路建设等)、人为热(如能源消耗、人口数量变化等)和过量温室气体排放以及大气污染(如工业的发展、汽车数量变化)等为最重要,与此相对应,城市房屋竣工面积、市区总人口、汽车数量变化这 3 类城市化指数较好地描述了城市化进程

表 2 城市化对西安城区增温幅度的影响(1996~2005 年与 1976~1985 年相比)

Table 2 Temperature increasing of 1996 - 2005 to 1976 - 1985 in Xi'an urban areas °C

季节	1976~1985 年平均温度(A_2)	1996~2005 年平均温度(A_1)	年代际气候变化量($T_1 - T_2$)	1996~2005 年城市影响量
夏季	25.0	26.5	0.9	0.6
冬季	0.9	2.6	0.9	0.8

表 3 城市发展不同时期热岛效应对比

Table 3 Comparison of urban heat island effect at different development stages

°C

季节	1966~1978 年,城市发展缓慢期	1979~2005 年,城市发展稳步上升期	1966~1975 年	1995~2005 年
夏季	-0.20	0.10	-0.30	0.46
冬季	0.10	0.30	0.10	0.70

(曲学实等, 1993; 丁淑娟等, 2008)。城市公共汽车数量的变化能较好地反应城市汽车保有量的变化趋势, 汽车排放的尾气增加了城市“人为热”的份额, 另一方面造成了温室气体及污染物浓度的增加, 引起温室效应的增强, 从而加重了城市热岛效应。近 40 年来, 西安市的城市建设迅速发展, 城市规模不断扩大, 本文利用城市房屋竣工面积、市区总人口、公共汽车数量这 3 类城市化指数来描述西安城市的巨大变化, 并讨论其与城市热岛效应的关系, 其中市区总人口、公共汽车数量部分年代数据用前后年份的数据插值得到。

对 1966~1998 年以上 3 个城市化指数与西安城区气温空间距平(代表热岛效应)相关性分析表明, 冬季的相关系数分别为 0.71、0.63、0.31(通过 90%信度检验)。夏季有较为密切的正线性相关(见图 6), 相关系数分别为 0.78、0.82、0.65(通过 99.9%信度检验)。城市房屋竣工面积与城区气温空间距平线性回归方程为: $y = 0.0023x - 0.2765$, 其中, y 为气温空间距平(单位: $^{\circ}\text{C}$), x 为房屋竣工面积(单位: 10^4 m^2), 即当房屋竣工面积每增加 $100 \times 10^4 \text{ m}^2$, 西安城区气温比临近区域平均气温偏高幅度增加 0.23°C 。同理, 根据与市区总人口、公共汽车数量建立的回归方程计算可得: 市区人口每增加 100 万、公共汽车每增加 1 万辆, 城乡温差将分别增加 0.31°C 、 0.15°C 。

对 1966~1998 年西安城区冬季气温空间距平与城市化指数逐年变化分析表明(如图 7): 1966~1978 年西安城市房屋竣工面积、市区总人口缓慢增加, 公共汽车数量呈波动式增加。从 1979 年改革开放起, 房屋竣工面积、公共汽车数量增幅剧烈, 并持续到 1986 年, 受其影响, 1983~1988 年城区冬季气温稳定偏高。

1989 年冬季(气温跃变点)后, 城市房屋竣工面积第二次快速发展, 而且增幅更加剧烈。据统计, 1966~1989 年平均每年房屋竣工面积为 67.86 m^2 , 1990~1998 年达 $168.47 \times 10^4 \text{ m}^2$, 增长了近 2 倍。此期间人口持续增长, 增幅加大, 1995~1996 年市区人口增加最多, 达到 378.2 万人, 比 1989 年增加了 107.4 万人, 城市公共汽车数量虽然较 80 年代中期有所下降, 但仍维持在一个较高的平均水平, 城市化进程在此阶段表现得更为明显。城市化的快速发展使城郊气温差由 1989 年前的平均 0.05

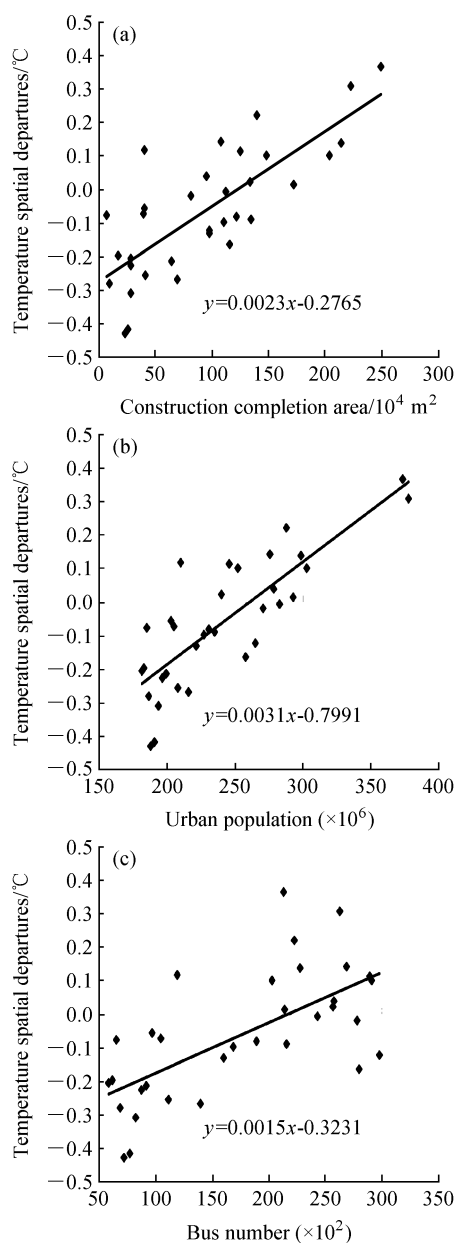


图 6 城市化指数与西安城区夏季温度空间距平点聚图

Fig. 6 Scatter plots of urbanization indexes and summer temperature spatial departures in the urban areas of Xi'an

$^{\circ}\text{C}$ 增至 0.22°C , 这也可能是冬季城区平均气温在 1989~1995 年每年都发生突变的原因。

5 结论

综上所述, 本文的分析研究可归纳为以下几点初步结论:

(1) 西安气温周期分析表明, 冬、夏季, 西安城市周边的近城区、平原区、浅塬山区同整个区域

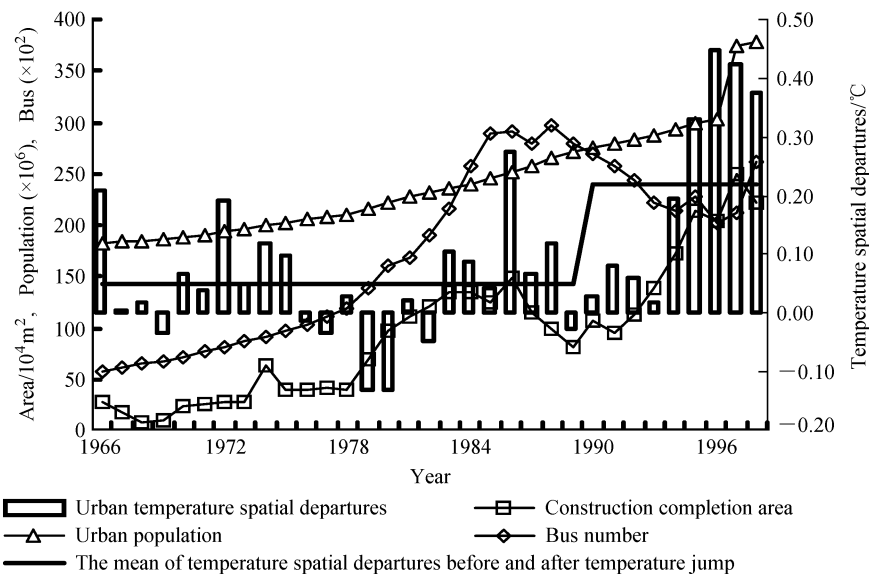


图 7 1966~1998 年城市化指数与西安城区冬季温度空间距平关系

Fig. 7 Urbanization indexes and winter temperature spatial departures in the urban areas of Xi'an from 1966 to 1998

平均气温变化一致, 表现为大尺度的气候变化, 而城区和全区变化同步性差, 多小尺度气候变化, 可能是由于影响城区气温变化的因素复杂, 城区气温的逐年变化受不断发展变化的城市环境影响, 掩盖了区域性长周期和短周期变化。冬季近城区、平原区短于浅源区及全区周期变化, 也可能是因为近城区、平原区受城市化影响相对明显的原故。

(2) 气温突变分析发现, 全区冬季气温分别在 1977、1989、1992、1993、1994 年发生增温突变, 城区在 1977 年、1989~1995 年发生突变式增温。全区 1977 年的突变以自然增温为主要因素, 突变时间基本和全国突变同步, 但略显偏早, 比西北区 (1984 年) 早 7 a, 这可能是由于关中特殊的盆地地形地貌使冷空气难以入侵, 城市边界层暖空气难以扩散造成的。夏季, 1988 年的全区性第一次气温突变增温主要是城市化引起的, 比西北区 (1993 年) 偏早 5 a, 这是由特殊地理条件和城市化进程共同影响的。

(3) 冬、夏季均形成了以西安为中心的明显“热岛”, 平均热岛强度分别为 0.65°C 、 0.46°C ; 最大热岛强度冬季和夏季分别为 1.21°C (高陵) 和 0.87°C (礼泉)。西安热岛强度具有典型性。

(4) 在西安城区气温年代际变化中, 冬、夏季城市影响分别占 47%、40%, 表明城市化进程对气温的影响显著。

(5) 冬季突变点 (1989 年) 后西安城区的平均气温增温 1.3°C , 城市影响在气温突变中贡献了 0.35°C , 剩余的 0.85°C 主要为自然增温变化。夏季突变点 (1987 年) 后平均气温增加了 0.4°C , 城区局地变化增温 0.39°C , 即夏季气温突变主要是由城市影响造成的。

(6) 城市房屋竣工面积、市区总人口、公共汽车数量等城市化指数与城区气温空间距平之间有着较为密切的正线性相关关系, 夏季相关系数分别为 0.78、0.82、0.65; 冬季分别为 0.71、0.63、0.31。城市化的快速发展使城郊气温差加大, 这也可能是导致城区在冬季 1989~1995 年、夏季 1987~1995 年间平均气温发生突变式增温的主要因素。

参考文献 (References)

- 陈明, 傅抱璞. 1995. 盆地环流型及冷湖的形成和消散的数值研究 [J]. 气象科学, 15 (2): 28-37. Chen Ming, Fu Baopu. 1995. Numerical study of circulation in basin with formation and dissipation of cold air lake [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 15 (2): 28-37.
- 陈正洪, 王海军, 任国玉. 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. 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.

- 程乾生, 周小波, 朱迎善. 1995. 气候突变的聚类分析 [J]. 地球物理学报, 38 (2): 156 - 163. Cheng Qiansheng, Zhou Xiaobo, Zhu Yingshan. 1995. Cluster analysis of climate jump [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 38 (2): 156 - 163.
- 丁金才, 张志凯, 奚红. 2002. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究 [J]. 大气科学, 26 (3): 412 - 420. Ding Jincai, Zhang Zhikai, Xi Hong. 2002. A study of the high temperature distribution and the heat island effect in the summer of the Shanghai area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 412 - 420.
- 丁淑娟, 张继权, 刘兴朋, 等. 2008. 哈尔滨市城市发展与热岛效应的定量研究 [J]. 气候变化研究进展, 4 (4): 230 - 234. Ding Shujuan, Zhang Jiquan, Liu Xingpeng, et al. 2008. Quantitative relationship between urban development and heat island effect for Harbin City [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4 (4): 230 - 234.
- 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.
- 郎海鸥, 周杰. 2007. 西安市地表水水质变化与城市化过程的关系 [J]. 干旱区研究, 24 (4): 460 - 465. Lang Haiou, Zhou Jie. 2007. Study on the relationship between the change of surface water quality and the urbanization process in Xi'an City [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 24 (4): 460 - 465.
- 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.
- Liu W, Ji C, Zhong J, et al. 2007. Temporal characteristics of the Beijing urban heat island [J]. Theoretical and Applied Climatology, 87: 213 - 221.
- 刘继韩. 1987. 论城市热岛强度的表示方法 [J]. 地理研究, 6 (3): 50 - 56. Liu Jihan. 1987. On the methods of expressing the urban heat island intensity [J]. Geographical Research (in Chinese), 6 (3): 50 - 56.
- 卢新卫, 陈鹏. 2006. 西安城市化进程与环境生态问题研究 [J]. 干旱区资源与环境, 20 (1): 8 - 12. Lu Xinwei, Chen Peng. 2006. Urbanization and ecological environment problems of Xi'an [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 20 (1): 8 - 12.
- 曲学实, 虞静明. 1993. 影响城市热岛的因子分析 [J]. 气象科学, 13 (3): 320 - 326. Qu Xueshi, Yu Jingming. 1993. The analysis of factors affecting urban heat island [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 13 (3): 320 - 326.
- 孙旭东, 孙孟伦, 李兆元. 1994. 西安市城市边界层热岛的数值模拟 [J]. 地理研究, 13 (2): 49 - 54. Sun Xudong, Sun Menglun, Li Zhaoyuan. 1994. Analyses and numerical studies of heat island of Xi'an City [J]. Geographical Research (in Chinese), 13 (2): 49 - 54.
- 束炯, 江田汉, 杨晓明. 2000. 上海热岛效应的特征分析 [J]. 上海环境科学, 19 (11): 532 - 534. Shu Jiong, Jiang Tianha, Yang Xiaoming. 2000. Temporal characteristics of urban heat island in Shanghai [J]. Shanghai Environmental Science (in Chinese), 19 (11): 532 - 534.
- 田武文, 黄祖英, 胡春娟. 2006. 西安市气候变暖与城市效应问题研究 [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]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (4): 438 - 443.
- 佟华, 刘辉志, 桑建国. 2004. 城市人为热对北京城市热环境的影响 [J]. 气候与环境研究, 9 (3): 409 - 421. Tong Hua, Liu Huizhi, Sang Jianguo. 2004. The influence of man-made heat in urban on the heat environment of Beijing City [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (3): 409 - 421.
- Trenberth K E. 1990. Recent observed interdecadal climate change in the Northern Hemisphere [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 71 (5): 1239 - 1250.
- 王绍武. 1993. 全球气候变暖的检测及成因分析 [J]. 应用气象学报, 4 (2): 226 - 236. Wang Shaowu. 1993. The detection of global climate warming and its causes [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 4 (2): 226 - 236.
- 西安统计局编. 1999. 西安 50 年——统计资料, 1949 ~ 1998 年 [M]. 北京: 中国统计出版社, 310 - 315. Xi'an Municipal Bureau of Statistics. 1999. Xi'an 50 Years Statistical Data (1949 - 1998) [M] (in Chinese). Beijing: China Statistical Press, 310 - 315.
- 徐祥德, 汤绪. 2002. 城市化环境气象学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 62 - 80. Xu Xiangde, Tangxu. 2002. Urbanization Environmental Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 62 - 80.
- 徐世晓, 赵新全, 孙平. 2001. 人类不合理活动对全球气候变暖的影响 [J]. 生态经济, 6: 59 - 61. Xu Shixiao, Zhao Xinquan, Sun Pin. 2001. Effect on the global climate warming by the human being irrationality actions [J]. Ecological Economy (in Chinese), 6: 59 - 61.
- 谢庄, 崔继良, 陈大刚. 2006. 北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 11: (1) 69 - 75. Xie Zhuang, Cui Jiliang, Chen Dagang. 2006. The annual, seasonal and monthly characteristics of diurnal variation of urban heat island intensity in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 69 - 75.
- 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 2003. 我国西北地区近 50 年降水和温度的变化 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 9 - 18. Yu Shuqiu, Lin Xuechun, Xu Xiangde. 2003. The climatic change in Northwest China in recent 50 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 9 - 18.
- 于淑秋, 卞林根, 林学椿. 2005. 北京城市热岛"尺度"变化与城

- 市发展 [J]. 中国科学 (D 辑), 35 (增刊 D): 97-106. Yu Shuqiu, Bian Ling, Lin Xuechun. 2005. The scale changes of urban heat island and city development in Beijing [J]. Science in China (Ser. D), 35 (Suppl. D): 97-106.
- Yu Shuqiu, Lin Xuechun. 2002. Climatic jump from late 1970s to early 1980s and its effect [J]. Acta Meteorologica Sinica, 16 (1): 62-74.
- 杨德保, 王式功, 王玉玺. 1994. 兰州城市气候变化与热岛效应分析 [J]. 兰州大学学报, 30 (4): 161-167. Yang Debao, Wang Shigong, Wang Yuxi. 1994. Analyses of climatic variation and heat island effect in Lanzhou [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 30 (4): 161-167.
- 杨梅学, 陈长和. 1998. 复杂地形上城市热岛的数值模拟 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 34 (3): 117-124. Yang Meixue, Chen Changhe. 1998. Numerical simulation of the urban heat island on complex terrain [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 34 (3): 117-124.
- 张思锋, 廖园园. 2006. 基于层次分析法的西安城市化水平测度 [J]. 西安交通大学学报 (社会科学版), 26 (2): 41-45. Zhang Sifeng, Liao yuanyuan. 2006. The urbanization level measurement of Xi'an based on analytic hierarchy process [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences) (in Chinese), 26 (2): 41-45.
- 张爱英, 任国玉. 2006. 山东省城市化对区域平均温度序列的影响 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 754-762. Zhang Aiying, Ren Guoyu. 2006. Urban heat island effect on change of regional mean temperature over Shandong Province, China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 754-762.