

高峰, 戴新刚, 李斌, 等. 2012. 东北平原腹地城市化与城市热岛的可能驱动因子 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 353-364. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10160. Gao Feng, Dai Xingang, Li Bin, et al. 2012. Possible driving factors of urbanization and urban heat island in Northeast Plain of China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 353-364.

# 东北平原腹地城市化与城市热岛的可能驱动因子

高峰<sup>1</sup> 戴新刚<sup>2</sup> 李斌<sup>1</sup> 王宝书<sup>1</sup> 沈宾<sup>1</sup>

1 吉林省气象局, 长春 130062

2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候与环境重点实验室, 北京 100029

**摘要** 用近50年逐日气象观测记录和城市发展统计资料分析了东北平原腹地3个不同规模城市, 即大城市长春, 中等城市延吉和山区小城镇临江的年和季节平均气温、最高最低气温等, 发现其差别很大, 其排序不一定同城市化速率(人口和国内生产总值GDP)、土地利用或能见度趋势对应。但气温日较差趋势均与城市化速率成比例。3个城市气温趋势均表现为变暖, 且最低气温趋势大于最高气温趋势; 冬季变暖强于夏季。这说明影响夜间或冬季气温的才是城市热岛的主要驱动因子。冬、夏最高气温趋势排序一致, 除临江外, 最低气温趋势排序与最高气温相反。临江冬季最低气温趋势最强, 可能与其特殊地理环境造成的弱风气候有关。最低气温趋势排序与城市化速率排序大致相同, 最高气温趋势排序相反。综合对比分析表明, 这3个城市气候变暖差异的主要因子不可能是土地利用, 而是城市人为热释放和空气污染, 后者主要影响夜间的射出长波辐射。二者的影响范围趋势应该同城市化速率成比例, 对气温趋势有明显影响。其次, 不能忽略地理环境因子对气温趋势及其排序的影响。不过, 气温日较差在一定程度上可以削弱城市地理因素等的影响, 其趋势是一个反映城市化对气候影响的合适指标。研究还表明, 需要重视空气污染对长波辐射的影响并应该在数值模式辐射参数化中加以考虑。

**关键词** 城市化 城市热岛 土地利用 人为热排放 空气污染影响

**文章编号** 1006-9585(2012)03-0353-12 **中图分类号** P466 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10160

## Possible Driving Factors of Urbanization and Urban Heat Island in Northeast Plain of China

GAO Feng<sup>1</sup>, DAI Xingang<sup>2</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, WANG Baoshu<sup>1</sup>, and SHEN Bin<sup>1</sup>

1 *Meteorological Bureau of Jilin Province, Changchun* 130062

2 *Key Laboratory of East Asia Regional Climate and Environment, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029

**Abstract** This study aims to investigate the importance of local thermal factors contributing to urban heat island (UHI) for the cities of Changchun, Yanji, and Linjiang in Northeast China over the past 50 years. Changchun is a large city, the capital of Jilin Province, and Yanji is a middle one, while Linjiang which locates in a lap of hills, is a

**收稿日期** 2010-11-19 收到, 2011-03-21 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金 40775048、41075058, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400504, 国家科技支撑项目 2007BAC29B04

**作者简介** 高峰, 高级工程师, 从事天气气候业务及研究。E-mail: gaofeng585985@126.com

**通讯作者** 戴新刚, E-mail: daixg@mail.iap.ac.cn

small town situate in the down of heavy industry centre of Northeast China. Statistics shows that the rank order of their urbanization rates (URT) is the same as the city sizes. The observation shows that their minimum temperature trends (MNTT) are much greater than their maximum counterparts (noted as MXTT), and the winter trends are greater than their summer counterparts. The rank order of the MNTT is contrast to the MXTT and approximately the same as the URT, while the difference of MNTT and MXTT is proportional to the URT. The land use, anthropogenic heating, and air pollution are three major factors for UHI, and the later two are proportional to the URT. Inter-comparison reveals that the air pollution and anthropogenic heating are key factors for the UHI, because their combination could explain the major characteristics of the trends and orders, while the land use doesn't. The results also manifest the importance of local geographical environment in Linjiang, which lead to a weak wind climate that has the thermal factors localized. The localization may be one of the causes that produced the strongest MNTT and MXTT in Lingjiang in wintertime. Nevertheless, the difference of the MNTT and MXTT can reduce, to some extent, the influence of the geographic factors on the temperature trends because it is proportional to the URT. Hence, the difference can be regarded as a good climate index in representing urbanization. Besides, the results also imply that the important impact of air pollution (aerosols) on long-wave radiation should be considered not only in observation, but also in numerical model of atmosphere. A suggestion is to increase green land, and meanwhile to reduce air pollution and anthropogenic heating for mitigating city climate warming.

**Key words** urbanization, heat island effect, land-use, anthropogenic heating, air pollution influence

## 1 引言

多种观测事实证明,地球系统正经历一次以全球变暖为主要特征的气候变化(Mann et al., 1998)。IPCC第四次评估报告指出,近100年(1906~2005年)全球平均地表温度上升了 $0.74^{\circ}\text{C}$ ,1850年以来最暖的12个年份有11个出现在近期的1995~2006年(IPCC, 2007; 秦大河等, 2007)。气候变暖即有自然因素,也有人类活动的影响(Stephen et al., 2005),后者包括温室气体、气溶胶和土地利用等对气候的人为强迫作用(丁一汇等, 2006)。随着社会经济的发展,城市化对气候的影响越发突出(华丽娟等, 2006; Feng et al., 2009),其中一个显著特征是“城市热岛”(Urban Heat Island, UHI)。城市化不等同于土地利用,其影响因素还包括物质排放(气溶胶,颗粒物,温室气体及水汽等)和人为热量释放(戎春波等, 2010)。这三者中每一项对近地面气温都有特定的热力作用方式,弄清它们对UHI的作用机理及贡献对于减缓因城市化带来的气温升高有重要的实际意义。土地利用是城市规模的指标之一,主要指城市道路和建筑用地,它改变了地表反照率及其粗造高度,从而影响地面能量平衡和大气边界层结构(文莉娟等, 2009)。

人为热释放是城市化及其经济发展的必然产物。它包括工业、供暖系统、空调、热水、交通工具等热量排放。随着经济的发展人为热释放也越来越重要,已经成为一个不可忽视的因子(Kimura and Takahashi, 1991; 佟华等, 2004)。空气污染的主要成分是气溶胶、颗粒物和废气等。其中气溶胶的“阳伞效应”被人为是影响地面能量平衡的重要因子(石广玉等, 2008)。不过,碳黑气溶胶对大气是加热作用(Menon et al., 2002)。

关于UHI的研究越来越多(但尚铭, 2008; 胡嘉骢和朱启疆, 2010)。例如,用观测到的城市与周围乡村站点的气温差度量城市化热效应(谢庄等, 2006; Jones et al., 2008);用站点观测值减去再分析资料插值到站点的值表示UHI或土地利用的影响程度(Kalnay and Cai, 2003; 李巧萍等, 2006);用卫星遥感分辨城市与乡村气温差异及分布(陈公德等, 2008; Huang et al., 2010);用数值模拟方法定量研究一个城市UHI的形成机制(杨梅学和陈长和, 1998; 佟华等, 2004; 刘树华和周彬, 2007)。

细致比较城市间UHI影响因子趋势与气温趋势的研究有助于分辨不同因子的相对重要性。迄今,这类研究尚比较少见(Rosenfeld et al., 2007)。东北是中国的重工业基地,城市化速率很快,近50年城市气温均成上升趋势(刘实等,

2009), 城市化可能与其有关(司鹏等, 2010)。本文选择一个东北案例, 通过分析对比长春、延吉和临江 3 个城市的气温趋势、排序及其与城市化指标的关系, 对几个人为因子和自然因子与气温趋势的联系做定性分析, 并根据因子的物理性质推断其作用方式和相对贡献大小, 以便识别主要因子及其特征。下面第 1 节介绍资料; 第 2、3 节分别介绍城市化进程和能见度演变; 第 4 节分析气温趋势及其人为影响因子; 第 5 节是关于环境风趋势对城市气候变暖的影响; 最后一节是讨论和结论。

## 2 资料与方法

对比研究观测站点之间的气温变化首先要考虑观测记录的均一化问题。相关研究表明(李庆祥等, 2003), 中国气象资料非均一化的主要原因是站点搬迁和观测方式的改变。据我们核实, 从 1959~2005 年期间吉林省的长春、延吉和临江 3 个气象站均未搬迁过, 观测方式也无明显改变。因此可以认为这 3 个站的观测记录具有较好的均一性。其次是站点观测是否具有代表性。因为一般观测站都设在城市的边缘或郊区。本文的涉及的 3 个城市观测站的位置在 1950 至 1960 年代均位于城区系侧边缘, 但随着城市化进程逐渐变成市区, 其气温记录在一定程度上可以代表所在城市的气温变化。本文所使用的资料是基于这 3 个站观测记录计算的日平均气温、日最高和最低气温及日平均能见度等。其中能见度在一定程度上反映了城市空气污染程度, 假设它同气溶胶浓度成比例(Rosenfeld et al., 2007)。城市化进程指标用人口和国内生产总值 GDP 表示, 资料取自吉林省统计年鉴(张立新和黄振远, 1986; 邹亚文, 1987; 张春旗, 1987, 1988; 王立英, 1988, 1989; 王季平, 1989, 1990; 李红奕, 1990, 1991, 1992, 1993; 孙光, 1991; 冀群英, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000; 纪树, 1996, 1998; 吕桂英和林莉, 1999, 2000, 2001; 冀群英和王喜东, 2001; 王兴文, 2002; 杨文杰, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006; 王群, 2003, 2004, 2005, 2006; 何玉英, 2007)。气温和城市化指标的线性趋势用下面一元线性回

归方程求出:

$$x = a + bt + \epsilon_t, \quad (1)$$

其中,  $x$  表示样本量为  $n$  的时间序列,  $t$  为时间(年或季节),  $\epsilon_t$  为噪音或误差,  $a$  为回归常数,  $b$  为斜率(即倾向或趋势)。

## 3 城市化进程

城市化进程可以用土地利用变化、人口增加和 GDP 上升等几个指标表示, 其中人口是城市化进程最重要指标之一。根据人口普查的结果(张立新和黄振远, 1986; 邹亚文, 1987; 王立英, 1988, 1989; 李红奕, 1990, 1991, 1992, 1993; 纪树, 1996, 1998; 吕桂英, 1999, 2000, 2001; 杨文杰, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006; 何玉英, 2007), 1985 年底长春城市人口达到  $170 \times 10^4$  人, 90 年代末达到  $278.8 \times 10^4$  人, 2007 年底总人口达到  $348.8 \times 10^4$  人(见图 1a), 比 1985 年净增加了  $159.9 \times 10^4$  人。2007 年底延吉市总人口达到  $43.6 \times 10^4$  人, 比 1985 年增加了  $26.6 \times 10^4$  人(见图 1b)。1993 年临江镇改为临江市, 人口为  $18 \times 10^4$  人, 到 2000 年人口增加到  $18.6 \times 10^4$  人, 到 2007 年底人口又略有下降(见图 1c), 仅有  $17.5 \times 10^4$  人。可见长春人口增长最快, 22 年中长春和延吉人口分别增长了 94.1% 和 61%。临江人口基数小, 变化不明显。因此, 从人口及其演变看长春的城市规模最大, 城市化进程最快。其次是延吉, 最慢的是临江。

GDP 及其变化反映了一个城市的社会经济发展速率和水平。1986 年长春市的 GDP 只有  $62.7 \times 10^8$  元, 在上个世纪 80 年代末达到  $90 \times 10^8$  元, 到 90 年代末达到  $707 \times 10^8$  元。进入 21 世纪后长春市的经济有了飞速发展, 到 2007 年末达到  $2089 \times 10^8$  元, 与 1986 年相比增加了约 33 倍。在改革开放初期的 1978 年, 延吉市的 GDP 只有  $1.02 \times 10^8$  元, 在 1980 年代末达到  $9.7 \times 10^8$  元, 1990 年代末达到  $40.4 \times 10^8$  元, 2007 年末接近  $80 \times 10^8$  元, 与 1978 年相比增加了约 80 倍。临江市成立较晚, 1993 年建市时的 GDP 只有  $5.4 \times 10^8$  元, 到 90 年代末增加到  $16.3 \times 10^8$  元, 2007 年达到  $30 \times 10^8$  元, 相对于 1993 年增加了约 5.6 倍。不难算出 3 个城市 GDP 的年增长率依次为  $96.5 \times 10^8$ 、

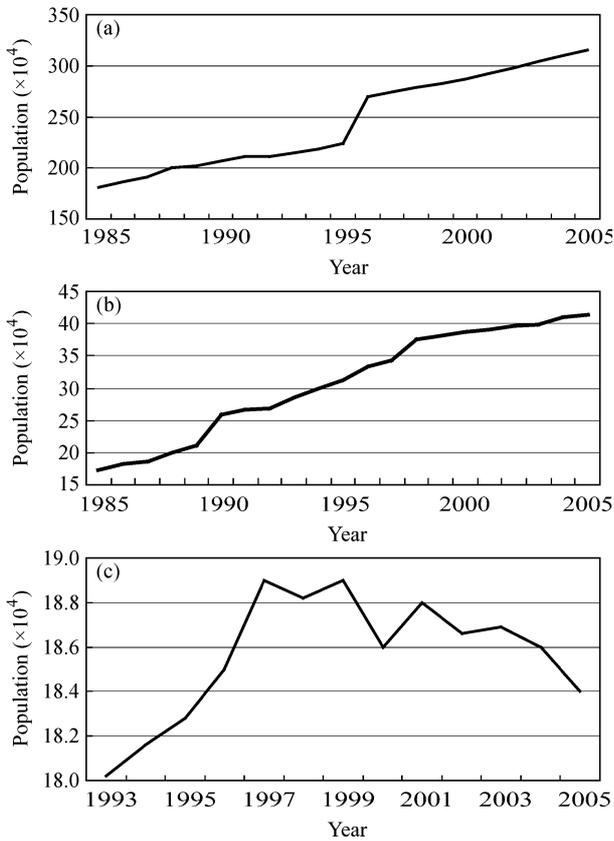


图1 近20多年人口演变: (a) 长春; (b) 延吉; (c) 临江  
Fig. 1 Population over the past 20 years; (a) Changchun; (b) Yanji; (c) Linjiang

$3.76 \times 10^8$ 、 $2.05 \times 10^8 \text{ a}^{-1}$  (张春旗, 1987, 1988; 王季平, 1989, 1990; 孙光, 1991; 冀群英, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000; 冀群英和王喜东, 2001; 王兴文, 2002; 王群, 2003, 2004, 2005, 2006)。显然, 从GDP的演变看也是长春城市化进程最快, 临江最慢。

#### 4 能见度

能见度在一定程度上可以反映城市气溶胶及大气中颗粒物等的排放水平。图2a是1959~2005年3个城市的年平均能见度演变。不难看出, 长春的能见度最差且呈波状变化, 无明显趋势, 相对高值期分别出现在20世纪60年代和80年代中期至90年代中期, 相对低值期分别出现在70年代末至80年代初和21世纪初。延吉市的能见度是3个城市中最好的, 在20世纪70年代以前和

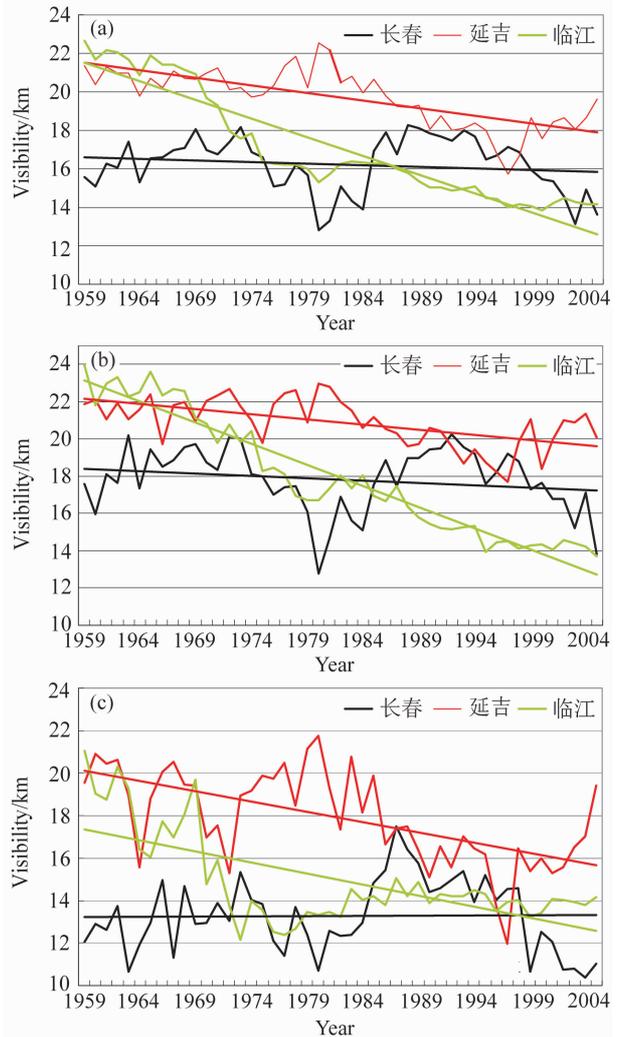


图2 1959~2005年长春、延吉和临江能见度演变: (a) 年平均; (b) 夏季平均; (c) 冬季平均  
Fig. 2 The visibility in Changchun, Yanji, and Linjiang from 1959 to 2005; (a) Annual mean; (b) summer; (c) winter

21世纪初能见度最好, 达到20 km以上, 从20世纪80年代初至90年代中期呈现下降趋势, 在90年代中达到最低值, 而后又逐渐上升。临江市的能见度在20世纪50年代至60年代中期最好, 达到20 km以上, 此后呈线性下降趋势, 80年代中期开始能见度小于长春, 90年代末达到最小值, 而后维持在一个相对低的水平上。可以看到3个城市能见度的演变并未同城市化进程完全对应。相反, 小城镇临江的能见度下降最快, 延吉次之, 长春的能见度变化不大。临江能见度下降最快可能与其地理位置有关。长春市污染物排放维持在一个相对恒定的水平上, 可能同其产业结构调整

和污染治理成效显著有关。

季节平均能见度的演变也与年平均类似。夏季 3 个城市的能见度演变同年平均情形非常相像 (见图 2b)。临江能见度的线性下降趋势最大, 从 1959 年的 24 km 下降到 2007 年的不到 14 km; 延吉的线性趋势小于临江, 从 1959 年的 22 km 下降到 1990 年代中的不到 18 km, 而后维持在 18 km 水平附近; 长春夏季能见度依然呈波状起伏, 有一个弱的下降趋势, 1960 年代、1970 年代以及 1980 年代中至 1990 年代能见度高于 14 km, 其余时段低于 14 km。长春冬季的情形不同于夏季, 能见度徘徊在 13 km 上下, 没有趋势; 延吉冬季的能见度呈波状下降, 到 1990 年代后期达到最低点, 而后逐渐上升, 在 2005 年又接近 20 km。从 1959 到 1970 年代中期临江冬季能见度快速下降, 最低达到 12 km, 低于长春的能见度, 而后围绕 14 km 上下波动, 在 1980 年代至 1990 年代期间低于长春, 2000 年后又上升并再次高于长春。因为长春自 21 世纪起能见度有快速下降的趋势。很显然, 能见度尚不能作为城市化进程的唯一科学指标, 它的变化同工业化水平、能源结构及污染治理水平等有关。但能见度与气溶胶关联, 对地面辐射平衡有重要影响, 研究其对城市气温的影响方式有助于理解城市暖化的特征和机理。

## 5 城市暖化与人为驱动因子

城市暖化的主要驱动因子应该能够定性解释城市间气温趋势的主要特征和排序差异。土地利用、污染物和人为热释放是城市暖化的 3 个主要因子。城市化对城市气温趋势的影响特征取决于这 3 个因子的相对重要性。显然, 土地利用和人为热释放与城市化速率成正比, 即与人口或 GDP 成比例。空气污染同能见度成比例, 其强度不一定同城市化速率成比例, 但其规模应该同城市化速率或土地利用成比例。由于 3 个城市均位于吉林省内, 故可以假设大尺度气候变化对它们气温趋势的影响是均匀的。3 个因子对 UHI 的相对贡献可以通过比较城市之间的城市化速率、能见度和气候特征量 (气温, 最高、最低气温等) 趋势之差异进行识别。

近 50 年在全球变暖背景下长春、延吉和临江 3

个城市的年平均气温均呈上升趋势 (见图 3a)。长春的变暖趋势最强, 达到  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ , 其次是临江和延吉 (图 3a), 分别为  $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$  和  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。可见大城市变暖趋势最强, 中小城市较弱, 反映了城市化的影响。同全国站点分析结果类似 (任国玉等, 2005), 3 个城市的最高气温超势 (MXTT) 均低于最低气温超势 (MNNTT), 但其趋势排序几乎相反。小城镇临江最高气温上升趋势最大, 达到  $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ , 其次是延吉和长春, 分别为  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$  和  $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$  (见图 3b); MNNTT 排序同年平均气温趋势一致, 依次是长春 [ $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ]、临江 [ $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ] 和延吉 [ $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ]。临江的年平均和 MNNTT 略强于延吉源于其冬季 MNNTT 最强, 可能与其特殊的地理环境有关 (见下文的分析)。MNNTT 均大于 MXTT 的现象说明夜间气温对平均气温趋势贡献最大。不过, 气温日较差下降趋势的排列 (见图 3c) 与城市化速率一致, 即长春下降趋势最大, 临江最小, 说明差值运算在一定程度上可以消除城市地理环境因素的影响。此外, 气温趋势排序与影响因子的关系会受到年平均运算的干扰, 因为不同季节的气候量趋势不同 (图略)。下面只研究冬夏季气温趋势与城市化因子的对应关系。

3 个城市的夏季 MNNTT 明显高于 MXTT 且排序相反。前者与城市化速率排序一致。长春、延吉和临江 MNNTT 依次是  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 、 $0.24$  和  $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$  (见图 4b), MXTT 均不明显, 依次为  $0.05$ 、 $0.1$  和  $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$  (图 4a)。3 个城市的冬季 MXTT 均强于夏季, 依次为  $0.24$ 、 $0.2$ 、 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ , 排序与夏季相同。冬季 MNNTT 均强于夏季, 且长春和临江的趋势相当, 分别为  $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$  和  $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ ; 延吉的趋势最小, 为  $0.56\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。无论冬、夏, MNNTT 均明显大于 MXTT 表明变暖主要发生在夜间, 影响夜间气温的才是城市冬、夏平均气候变暖的主要因子。另一方面, 冬季气温趋势普遍大于夏季, 说明影响冬季 (或冬半年) 气温的才是城市年平均气候变暖的主要因子。因而, 而土地利用不可能是 UHI 的主要驱动因子。

冬季 MXTT 强于夏季也再一次表明土地利用不可能是其主要影响因子。吉林省位于我国东北

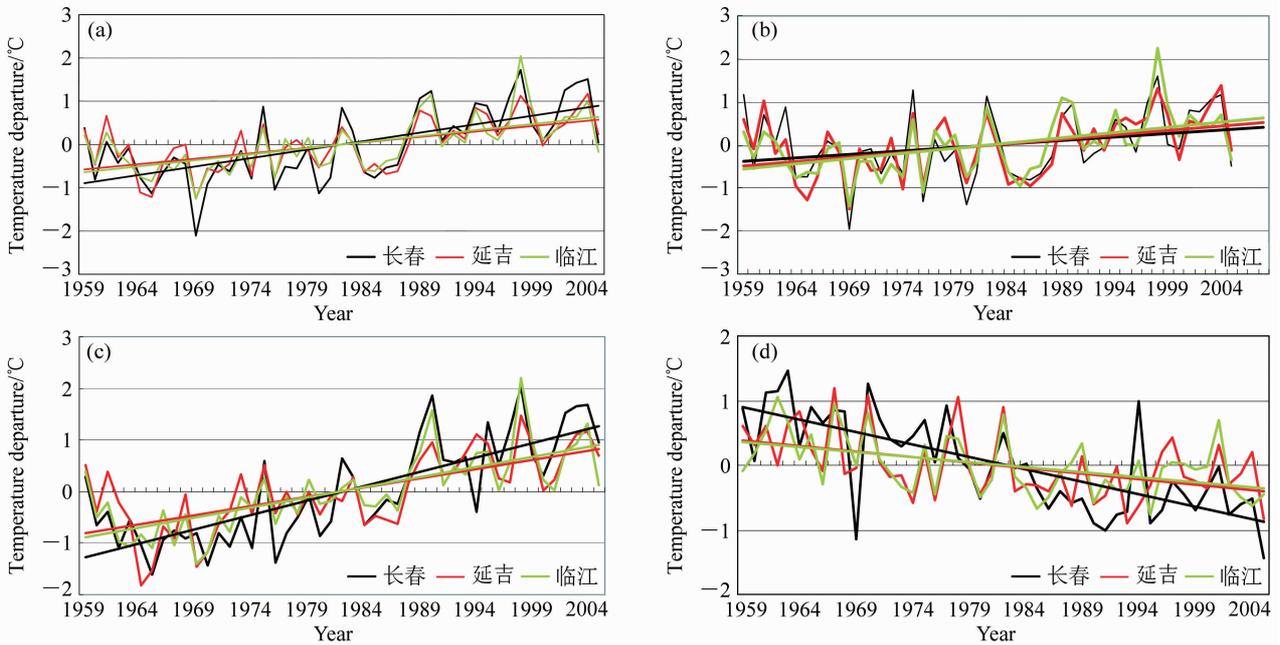


图3 1959~2005年长春、延吉和临江气温距平(单位:°C)及其线性趋势:(a)年平均气温;(b)年平均最高气温;(c)年平均最低气温;(d)年平均气温日较差

Fig. 3 Air temperature anomalies (°C) and their trends in Changchun, Yanji, and Linjiang from 1959 to 2005: (a) Annual mean; (b) annual-mean maximum; (c) annual-mean minimum; (d) annual-mean diurnal range

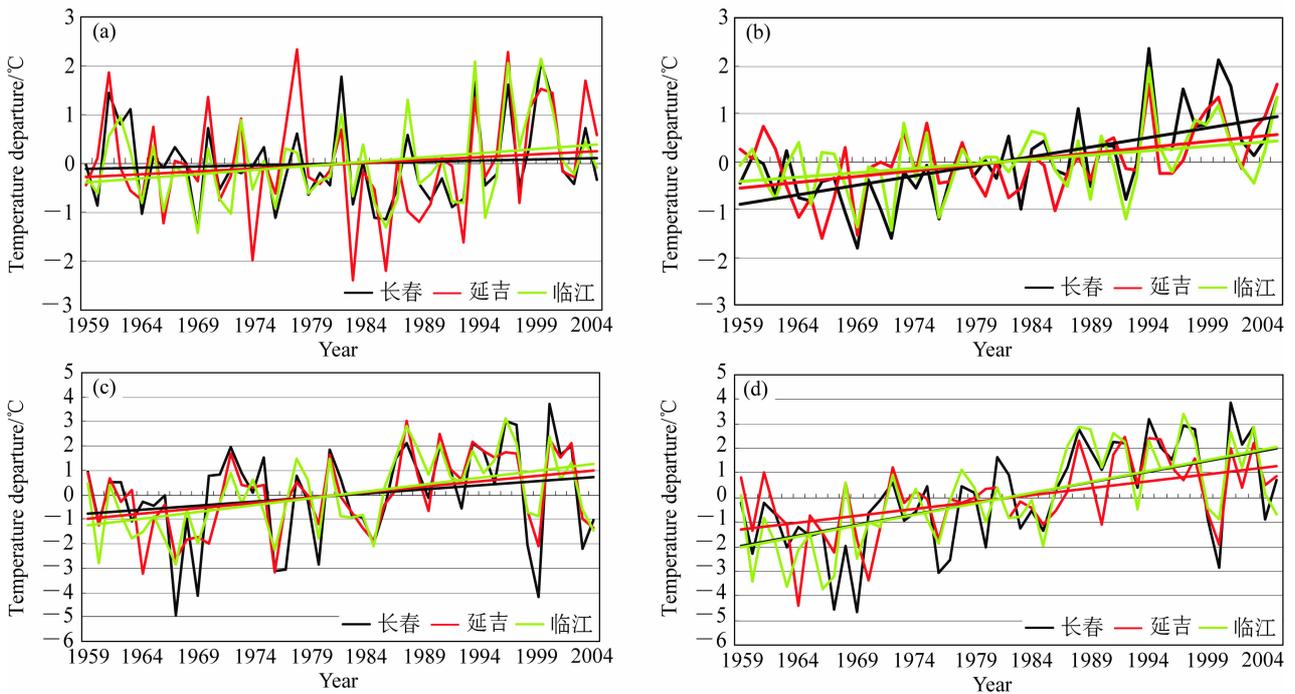


图4 长春、延吉和临江冬季和夏季平均最高最低气温距平(单位:°C)及其线性趋势:(a)夏季最高气温;(b)夏季最低气温;(c)冬季最高气温;(d)冬季最低气温

Fig. 4 Seasonally averaged temperature anomalies (°C) and their trends in Changchun, Yanji, and Linjiang: (a) The maximum in summer; (b) the minimum in summer; (c) the maximum in winter; (d) the minimum in winter

腹地, 冬季地面多为积雪覆盖, 城市土地利用的影响应该最弱, 对最高气温的驱动也应该最弱, MXTT 应该小于夏季。从物理学上来看, 城市土地利用(公路和钢筋混凝土建筑等)增强了城市反照率, 在白天应该是热源, 在后半夜应该是冷源。这与沙漠中的“绿洲效应”类似, 但作用相反(苏从先和胡隐樵, 1987)。因为城市建筑和道路热容量小, 白天因太阳短波辐射升温快, 向上的感热和潜热通量大, 对气温影响最大; 在夜晚, 又因射出长波辐射及热容量小温度下降也快, 后半夜可能成为冷源。因而, 单纯的城市土地利用作用应该对白天最高气温影响最大。越是城市化速率快的城市 MXTT 应该越强。但观测到的 MXTT 排序与这种解释矛盾, 说明城市土地利用不大可能是冬、夏白天城市气温趋势的主要驱动因子。

此外, 冬、夏 MXTT 排序一样且与城市化速率排序相反, 说明存在一个降温因子, 其作用强度与城市化速率成比例。首先, 土地利用和人为热释放在白天都是加热作用, 解释不了这个排序。因为城市扩展越快, 它们白天对低层大气的加热效果也应该越大, 最高气温趋势应该越强。尽管人为热释放可以解释冬季气温趋势强于夏季的原因, 但也解释不了最高气温排序。余下的只有空气污染。空气污染中的气溶胶在白天是一个“阳伞效应”, 削弱到达地面的太阳短波辐射(丁一汇等, 2009), 部分抵消了土地利用和人为热释放的加热作用, 从而减缓地面温度的升高, 造成最高气温下降。其强度应该与能见度成比例。因此, 能见度下降趋势越大的城市, 气溶胶在白天的降温作用增强越快, 对最高气温影响越大。但观测到的长春冬、夏能见度几乎没有趋势, 临江下降趋势最大。因此不可能用局域空气污染浓度对白天入射太阳辐射的削减解释最高气温趋势排序。那么应该还有一个重要因子未考虑到。注意到空气是一种流体, 观测站点的季节或年平均气温会受到与周围空气湍流热交换的影响, 这属于非局域因子。湍流热交换对站点气温的影响与其周围空气的热状况有关。如果周围空气温度偏高, 则有利于站点升温, 周围气温偏低, 则有利于站点降温。显然空气污染的范围越大, 降温作用的范围也越大, 湍流热交换对白天气温的降温作用也越强。虽然长春的能见度没有明显趋势, 但其城

市化速率最快, 空气污染范围趋势应该最大, 白天的降温效果应该最强。当其降温作用随着时间逐渐接近总加热因子的贡献时, 就会出现长春 MXTT 很弱的现象。延吉的情形也可以照此解释。但临江是个弱风环境, 湍流交换弱, 白天的气温主要与局地因子有关。当因子的局地加热作用超过气溶胶的局域降温作用越来越多时才可能出现其 MXTT 最强的现象。显然, 冬季局域人为热释放是造成临江 MXTT 最大的主要因子。MXTT 的排序说明 3 个城市白天气溶胶的降温作用均没有超过城市化和大尺度变暖的综合作用, 只不过长春气溶胶的降温作用最接近增温作用, 临江的降温作用与增温作用相差较远。因此空气污染的范围趋势应该是形成 MXTT 排序的主要因子。

夏季 MNTT 强于 MXTT 且前者排序与城市化速率成比例, 说明空气污染的降温作用在夜间变弱或可能成为加热因子, 因为夏季白天人为热释放要强于夜间(佟华等, 2004), 土地利用在白天的加热作用应该弱于白天, 或者成为冷源。所以不能用土地利用和人为热释放解释夏季最低气温趋势强于最高气温的现象。自然, 空气污染又成为解释 MNTT 强于 MXTT 的主要影响因子之一。注意到在中国农民们很早就开始用“熏烟防霜冻”的方法提高田间温度。这表明气溶胶能够拦截地面的射出长波辐射和放射长波辐射, 其作用是减少地面净射出长波辐射, 在夜晚成为一个保温因子。因此, 夜间能见度越低, 气溶胶的保温作用越强。考虑到湍流热交换, 气溶胶的范围在夜间同样是一个重要的保温因子。尽管平均而言夜间的湍流热交换要弱于白天。由此可知, 空气污染是影响这 3 个城市夏季最高、最低气温趋势及其排序和冬季最高气温排序的主要因子。

除了临江外, 其他两个城市冬季最低气温趋势也同城市化速率成比例。冬季的大气层结更稳定, 空气污染更重, 范围更广, 空气污染的保温效应应该更强。另一方面, 东北冬季供暖造成人为热释放强于夏季, 其加热效应与城市化速率成比例。因此, 二者即是造成冬季 MNTT 强于夏季的主要原因, 也能解释其排序。临江冬季的最低气温趋势甚至略强于长春, 不可能用整个城市总的土地利用、人为热释放或空气污染加以解释。与冬季最高气温的解释类似, 只有当局域人为热

释放趋势很强才能解释其 MNTT 最强的现象。这显然与其特殊的地理环境有关。

## 6 环境因素影响

城市热岛的形成同自然环境因子也密切相关。例如环境风场就是其中之一。风速大有利于城市污染物或热量消散,不利于城市热岛的形成。有研究发现,当风速大于 3 级北京的热岛就会消失(王喜全等, 2006)。对于这 3 个城市而言,虽然可以视大尺度气温变化为均匀的,但风场的局地性很强。因为一个城市的风场除了受大尺度风场控制外还与城市的地理环境和城市化有关。例如,1959~2005 年长春、延吉和临江的年平均风速依次为  $3.96$ 、 $2.46$ 、 $1.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。临江的弱风环境是因为它处于一个山坳中,冬季的平均风速为  $0.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,全年近  $1/3$  天数是静风,冬季更多。因此,临江的地理环境最有利于城市热岛的形成。另一方面,城市化改变了城市边界层的动力、热力结构,提高了城市的粗糙高度,从而减弱了大尺度风场。这些特征和差异可以通过比较 3 个城市风速演变加以识别。1959~2005 年期间大尺度风场也在减弱(You, 2010),3 个城市的平均风速都有不同程度的下降(图 5a),其中长春下降最明显,临江下降趋势最弱。

3 个城市的风速趋势依次为  $-0.298$ 、 $-0.213$ 、 $-0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。这同城市化速率排序是一致的,体现了城市化对风场的削弱影响。从图 5 还可以看到,3 个城市在 1980 年代中期都存在明显的年代际突变。突变后风速明显减弱。这表明在 3 个城市风速下降中大尺度风场的变化有重要贡献,有利于近 20 多年东北平原腹地城市热岛的形成。比较冬、夏的风速演变可以发现,冬季风速下降趋势均快于夏季(图 5b、5c),3 个城市冬季风速趋势依次  $-0.35$ 、 $-0.215$ 、 $-0.063 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,夏季为  $-0.193$ 、 $-0.156$ 、 $-0.056 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。这说明大尺度风速减弱的季节差异也是冬季城市暖化强于夏季的原因之一。不过,临江的风速小,风速趋势及季节差异均不明显,说明大尺度风场和城市化对当地风速变化的作用可以忽略。然而,小风意味着空气污染和人为热排放难于散失或被输运,城市化对

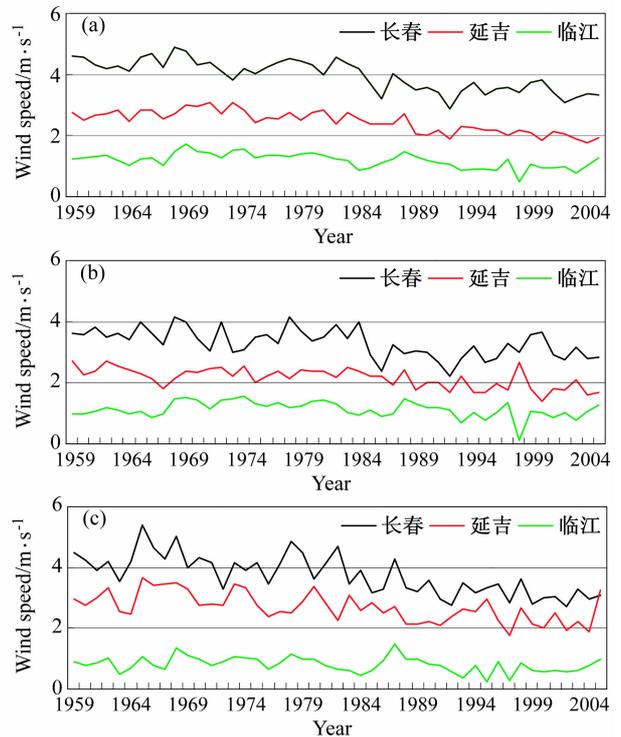


图 5 1959~2005 年平均风速: (a) 年平均; (b) 夏季平均; (c) 冬季平均

Fig. 5 Annual and seasonal mean wind speed from 1959 to 2005; (a) Annual; (b) summer; (c) winter

气温趋势的影响更局域化或局地化。这种情况在冬季尤为突出,因为冬季稳定的大气层结更不利于空气污染物和人为热释放的散失。注意到图 2c,虽然冬季临江能见度线性趋势很大,但实际上它存在一个非线性趋势,自 1970 年代中期后其能见度变化不大,因此不能用局地空气污染趋势解释冬季临江 MNTT 最强的现象。余下的局地因子只有人为热释放。由于临江城市化速率最慢,总的热释放趋势最弱,因而也无法解释其最低气温趋势最大的现象。其实,临江气象观测站位于火车站旁,近 30 年逐渐由城市边缘变成市中心,可能随着经济的发展观测站点附近的局域人为热排放不断增强,造成其冬季 MNTT 很大。看来,只有综合考虑人为的和自然因子才能解释观测到的城市间变暖现象的差异。

## 7 结论

上述研究表明,近 50 年东北平原腹地长春、

延吉和临江城市化速率是呈降序排列, 年和季节平均气温、最高、最低气温都成上升趋势。3 个城市 MXTT 排序与 MNTT 大致相反, 后者同城城市化速率排序一致。夏季最低气温趋势大于最高气温, 排序与城市化速率大致一致。冬季最高气温趋势强于夏季, 排序相同。冬季, 除了临江外, 最低气温趋势排序也与夏季最低气温一样。临江冬季最低气温趋势与长春相当, 可能与当地特殊地理环境造成的局域人为热量释放增加有关。这些气温趋势的特征表明, 影响夜间和冬季气温趋势的才是城市热岛的主要驱动因子。

对于城市热岛的形成本文着重考虑了土地利用、空气污染和人为热释放等 3 个人为因子及 1 个自然环境因子——风速, 分析了它们在物理上与气温趋势及其排序的可能关系。据此定性解释了这些趋势形成的共同特征及其差异。冬季气温趋势强于夏季, 最低气温趋势大于最高气温趋势的事实表明, 土地利用不可能是主要因子, 而人为热释放和空气污染是城市热岛形成的最重要的驱动因子。不仅后二者的强度, 它们的范围 (与土地利用成比例) 对城市热岛的形成同样重要。此外, 自然环境因子对城市气温趋势的影响也不能忽略。全球气候暖化在 3 个城市气温趋势中都有体现, 环境风速的减弱也有利于城市热岛的形成。而小城镇临江特殊的地理环境造成了终年弱风的环境, 致使人为因子对观测站点气温的影响局域化, 导致其冬季最低气温趋势与大城市长春相当。

上述分析建立在对影响城市热岛诸因子的物理性质基础上, 使用的方法属于归纳推理, 所得结果是定性的。定量的科学证据还需要严格的现场观测和精细的数值模拟确定。不过, 目前模式的辐射参数化中几乎都没有考虑气溶胶对长波辐射吸收和放射的影响, 而重点考虑了水汽的作用。不过本研究没有涉及城市水汽和温室气体排放的差异及其可能影响。显然, 不同地区城市热岛效应的主要影响因子可能不同, 自然环境因子也不一样, 还需要更多的案例研究。

**致谢** 本文第二作者同石广玉、韩志伟和王跃思等研究员就本文涉及的问题进行了有益的讨论。

## 参考文献 (References)

- 陈公德, 徐建华, 戴晓燕, 等. 2008. 运用遥感数据挖掘分析城市地表气温的空间变异规律 [J]. 遥感技术与应用, 23 (4): 405-409. Chen Gong de, Xu Jian hua, Dai Xiao yan, et al. 2008. Applying geo-data mining to analysis spatial variance churaoters of urban land surface temperature [J] Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 23 (4): 405-409.
- 但尚铭, 许辉熙, 叶强, 等. 2008. 我国城市热岛效应研究方法综述 [J]. 四川环境, 27 (4): 88-91. Dang Sangmin, Xu Huixi, Ye Qiang, et al. 2008. Overview of research method to urban heat island [J]. Sichuan Environment (in Chinese), 27 (4): 88-91.
- 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 2006. 气候变化国家评估报告 (1): 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2 (1): 3-8. Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. 2006. National assessment report of climate change (1): Climate change in China and its future trend [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 2 (1): 3-8.
- 丁一汇, 李巧萍, 柳艳菊, 等. 2009. 空气污染与气候变化 [J]. 气象, 35 (3): 3-14. Ding Yihui, Li Qiaping, Liu Yanju, et al. 2009. Atmospheric aerosols, air pollution and climate change [J]. Journal of Meteorology (in Chinese), 35 (3): 3-14.
- Feng Guolin, Yang Jie, Wan Shiquan, et al. 2009. On prediction of record-breaking daily temperature events [J]. Acta Meteorologica Sinica, 23 (6): 666-680.
- 何玉英. 2007. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 78-80. He Yuying. 2007. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 78-80.
- 胡嘉骢, 朱启疆. 2010. 城市热岛研究进展 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 46 (2): 186-193. Hu Jiacong, Zhu Qijiang. 2010. Urban heat island: Progress of the field [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science) (in Chinese), 46 (2): 186-193.
- 华丽娟, 马柱国, 曾昭美. 2006. 中国东部地区大城市和小城镇极端温度及日较差变化对比分析 [J]. 大气科学, 30 (1): 80-92. Hua Lijuan, Ma Zhuguo, Zeng Zhaomei. 2006. A comparison analysis of the changes of extreme temperatures and extreme temperature range of large cities and small towns in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 80-92.
- Huang J, Minnis P, Yan H, et al. 2010. Dust aerosol effect on semi-arid climate over Northwest China detected from A-Train satellite measurements [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 10 (5): 12465-12495.
- IPCC. 2007. 2007: Climate Change [C] // Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 1-996.
- 纪树. 1996. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 30. Ji Shu. 1996. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 30.
- 纪树. 1998. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 36. Ji Shu. 1998. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 36.
- 冀群英. 1992. 吉林省经济主要指标发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 44-51. Ji Qunying. 1992. Survey of major indices on Jilin economic development [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 44-51.
- 冀群英. 1993. 吉林省经济主要指标发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 153-155. Ji Qunying. 1993. Survey of major indices on Jilin economic development [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 153-155.
- 冀群英. 1994. 吉林省经济主要指标发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 27-32. Ji Qunying. 1994. Survey of major indices on Jilin economic development [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 27-32.
- 冀群英. 1995. 1994年吉林省经济和社会发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 59-61. Ji Qunying. 1995. Survey of 1994 major indices on Jilin economic development [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 59-61.
- 冀群英. 1996. 1995年吉林省经济和社会发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 35-36. Ji Qunying. 1996. Survey of 1995 major indices on Jilin economic development [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 35-36.
- 冀群英. 1997. 1996年吉林省经济和社会发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 46-47. Ji Qunying. 1997. Survey of 1996 major indices on Jilin economic development [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 46-47.
- 冀群英. 1998. 1997年吉林省经济和社会发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 48-53. Ji Qunying. 1998. Survey of 1997 major indices on Jilin economic development [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 48-53.
- 冀群英. 1999. 1998年吉林省经济和社会发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 20-24. Ji Qunying. 1999. Survey of 1998 major indices on Jilin economic development [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 20-24.
- 冀群英. 2000. 1999年吉林省经济和社会发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 16-19. Ji Qunying. 2000. Survey of 1999 major indices on Jilin economic development [M] // Jilin Yearbook (in Chinese) // Changchun: Jilin People's Publishing House, 16-19.
- 冀群英, 王喜东. 2001. 2000年吉林省经济发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 10-15. Ji Qunying, Wang Xidong. 2001. Survey of 2000 major indices on Jilin economic development [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 10-15.
- 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: 10.1029/2008/JD009916.
- Kalnay E, Cai Ming. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate [J]. *Nature*, 423 (6939): 528-531.
- Kimura F, Takahashi S. 1991. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment [J]. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25 (2): 155-164.
- 李红奕. 1990. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 79. Li Hongyi. 1990. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 79.
- 李红奕. 1991. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 54. Li Hongyi. 1991. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 54.
- 李红奕. 1992. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 43-44. Li Hongyi. 1992. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 43-44.
- 李红奕. 1993. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 18-19. Li Hongyi. 1993. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 18-19.
- 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 2006. 中国近代土地利用变化对区域气候影响的数值模拟 [J]. *气象学报*, 64 (3): 257-270. Li Qiaoping, Ding Yihui and Dong Wenjie. 2006. A numerical simulation on impact of historical land-use changes on regional climate in China since 1700 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (3): 257-270.
- 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 [J]. *气象科技*, 31 (1): 2-12. Li Qingxiang, Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, et al. 2003. Homogeneity study of in situ observational climate series [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 31 (1): 2-12.
- 刘实, 闫敏华, 随波. 2009. 东北三省冬季气温变化的有关研究进展 [J]. *气候变化研究进展*, 5 (6): 357-361. Liu Shi, Yan Minhua, Sui Bo. 2009. Advances in the research of winter air temperature variation of three provinces in Northeast China [J].

- Advances in Climate Change Research (in Chinese), 5 (6): 357 - 361.
- 刘树华, 周彬. 2007. 应用一改进的模式对北京夏季风、温和湿度场的模拟 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 43 (1): 42 - 47.
- Liu Shuhua, Zhou Bin. 2007. Simulation of wind, temperature, and humidity fields over Beijing Area in summer using an improved model [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 43 (1): 42 - 47.
- 吕桂英, 林莉. 1999. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 11 - 13. Lv Guiying, Linli. 1999. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 11 - 13.
- 吕桂英, 林莉. 2000. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 10 - 12. Lv Guiying, Linli. 2000. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 10 - 12.
- 吕桂英, 林莉. 2001. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 6 - 8. Lv Guiying, Linli. 2001. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 6 - 8.
- Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries [J]. Nature, 392 (6678): 779 - 787.
- Menon S, Hansen J, Nazarenko L. et al. 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 297 (5590): 2250 - 2253.
- 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 2007. 气候变化科学的最新认知 [J]. 气候变化研究进展, 3 (2): 63 - 73. Qin Dahe, Chen Zhenlin, Luo Yong, et al. 2007. Updated understanding of climate change sciences [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (2): 63 - 73.
- 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 Ziyin, 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.
- Rosenfeld D, Dai Jin, Yu Xing, et al. 2007. Inverse relations between amounts of air pollution and orographic precipitation [J]. Science, 315 (5817): 1396 - 1398. doi: 10.1126/science.1137949.
- 戎春波, 朱莲芳, 朱焱, 等. 2010. 城市热岛影响因子的数值模拟与统计分析研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (6): 718 - 728. Rong Chunbo, Zhu Liangfang, Zhu Yan, et al. 2010. Numerical simulation and statistic analysis of influencing factors on the urban heat island [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (6): 718 - 728.
- 石广玉, 王标, 张华, 等. 2008. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. 大气科学, 32 (4): 826 - 840. Shi Gu angyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2008, 32 (4): 826 - 840
- Stephen W, Sanderon R A, Tyson P D, et al. 2005. Global Change and the Earth System [M]. Berlin: Springer, 1 - 343.
- 司鹏, 李庆祥, 李伟. 2010. 城市化进程对中国东北部气温增暖的贡献检测 [J]. 气象, 36 (2): 13 - 21. Si Peng, Li Qinxiang, Li Wei. 2010. Impact of urbanization on surface air temperature warming in northeast China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (2): 13 - 21.
- 苏从先, 胡隐樵. 1987. 河西地区绿洲的小气候特征和“冷岛效应” [J]. 大气科学, 11 (4): 390 - 396. Su Congxian, Hu Yingqiao. 1987. The microclimate character and “cold island effect” over the oasis in Hexi region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 11 (4): 390 - 396.
- 孙光. 1991. 1990年吉林省经济主要指标发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 475 - 476. Sun Guang. 1991. Survey of economic development indices [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jinlin People's Publishing House, 475 - 476.
- 佟华, 刘辉志, 桑建国, 等. 2004. 城市人为热对北京热环境的影响 [J]. 气候与环境研究, 9 (3): 409 - 421. Tong Hua, Liu Huizhi, Sang Jianguo, et al. 2004. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 9 (3): 409 - 421.
- 王季平. 1989. 吉林省国民经济发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 297 - 300. Wang Jiping. 1989. Survey of economic development indices [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jinlin People's Publishing House, 297 - 300.
- 王季平. 1990. 吉林省国民经济发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 255 - 257. Wang Jiping. 1990. Survey of economic development indices [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jinlin People's Publishing House, 255 - 257.
- 王立英. 1988. 概况人口 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 255 - 257. Wang Liying, Linli. 1988. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 255 - 257.
- 王立英. 1989. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 122. Wang Liying, Linli. 1989. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 122.
- 王群. 2003. 2002年吉林省国民经济发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 12 - 18. Wang Qun. 2003. Survey of 2002 economic development indices [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jinlin People's Publishing House, 12 - 18.
- 王群. 2004. 2003年吉林省国民经济发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 11 - 16. Wang Qun. 2004. Survey of 2003 economic development indices [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jinlin People's Publishing House, 11 - 16.
- 王群. 2005. 2004年吉林省国民经济发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 10 - 12. Wang Qun. 2005. Survey of

- 2004 economic development indices [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 10 - 12.
- 王群. 2006. 2005 年吉林省国民经济发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 39 - 42. Wang Qun. 2006. Survey of 2005 economic development indices [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 39 - 42.
- 王兴文. 2002. 2001 年吉林省国民经济发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 9 - 14. Wang Xinwen. 2002. Survey of 2001 economic development indices [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 9 - 14.
- 王喜全, 王自发, 郭虎. 2006. 北京"城市热岛"效应现状及特征 [J]. 气候与环境研究, 11 (5): 627 - 636. Wang Xiquan, Wang Zifa, Guo Hu. 2006. The study of the urban heat island in Beijing city [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 11 (5): 627 - 636.
- 文莉娟, 吕世华, 孟宪红, 等. 2009. 绿洲内城镇气候效应的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 105 - 112. Wen Lijuan, Lu Shihua, Men Xianhong, et al. 2009. Numerical simulation of the climate effect on town in oasis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 105 - 112.
- 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 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 69 - 75. Xie Zhuang, Cui Jiliang, Cen Dagang, et al. 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.
- 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 - 125. Yang Meixue, Chen Changhe. 1998. Numerical simulation of urban heat island on complex surface [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition) (in Chinese), 34 (3): 117 - 125.
- 杨文杰. 2002. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 5 - 8. Yang Wenjie. 2002. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 5 - 8.
- 杨文杰. 2003. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 10 - 12. Yang Wenjie. 2003. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 10 - 12.
- 杨文杰. 2004. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 9 - 11. Yang Wenjie. 2004. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 9 - 11.
- 杨文杰. 2005. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 4 - 5. Yang Wenjie. 2005. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 4 - 5.
- 杨文杰. 2006. 人口民族 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林年鉴出版社, 35 - 37. Yang Wenjie. 2006. Population and Minority [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin Annual Publishing House, 35 - 37.
- You Qinglong, Kang Shichang, Flügel W A, et al. 2010. Decreasing wind speed and weakening latitudinal surface pressure gradients in the Tibetan Plateau [J]. Climate Research, 42 (1): 57 - 64. doi: 10.3354/cr00864.
- 张春旗. 1987. 1986 年吉林省国民经济和社会发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 740 - 741. Zhang Chunqi. 1987. Survey of 1986 economic development indices [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 740 - 741.
- 张春旗. 1988. 1987 年吉林省国民经济和社会发展概况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 255 - 257. Zhang Chunqi. 1988. Survey of 1987 economic development indices [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 255 - 257.
- 张立新, 黄振远. 1986. 人口和行政区划 [M] // 中国城市统计年鉴. 北京: 新世界出版社, 587 - 590. Zhang Lixin, Huang Zhenyuan. 1986. Population and administration division [M] // Statistical Annual of China Cities (in Chinese). Beijing: New World Press, 587 - 590.
- 邹亚文. 1987. 1986 年全省人口状况 [M] // 吉林年鉴. 长春: 吉林人民出版社, 740 - 741. Zou Yawen. 1987. Population of Jilin Province in 1986 [M] // Jilin Yearbook (in Chinese). Changchun: Jilin People's Publishing House, 740 - 741.