

司鹏,李庆祥,李伟. 城市化进程对中国东北部气温增暖的贡献检测[J]. 气象,2010,36(2):13-21.

城市化进程对中国东北部气温增暖的贡献检测^{* 1}

司 鹏^{1,2} 李庆祥³ 李 伟⁴

1 天津市气象信息中心,天津 300074

2 沈阳农业大学,沈阳 110161

3 中国气象局国家气象信息中心,北京 100081

4 国家气象中心,北京 100081

提 要: 作者采用中国均一化历史气温数据集(CHHT),从 1954—2005 年、1979—2005 年两个时间段,通过对比分析中国东北部区域城—乡台站气温序列的变化趋势,分离出城市热岛的影响,进而就城市热岛对中国气温增暖的贡献程度进行检测。结果表明,近 50 多年来,中国东北部气温增暖显著,区域年平均最低、平均、最高气温分别约上升了 2.11℃、1.59℃、1.13℃。对此,城市热岛的贡献程度,无论是 1954 年以来还是 1979 年以来均很小,即使影响最为显著的年/冬季平均最低气温,对其贡献也均不到 5%。

关键词: 气温,增暖,城市热岛贡献,M(鲁棒)估计

Impact of Urbanization on Surface Air Temperature Warming in Northeast China

SI Peng^{1,2} LI Qingxiang³ LI Wei⁴

1 Tianjin Meteorological Information Center, Tianjin 300074

2 Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161

3 National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract: Based on China Homogenized Historical Temperature Datasets, it presents evidence for urban heat island (UHI) effects on regional temperature on a long-term scale in Northeast China, which were estimated by comparing trends of urban-rural temperature series covering two time periods of 1954—2005 and 1979—2005, respectively. Results indicate that the warming trend in Northeast China over the last 50 years is significant, and the magnitude increased for the annual mean minimum temperature is the largest (2.11℃), followed by the annual mean temperature (1.59℃), while the annual mean maximum temperature (1.13℃) is the smallest in magnitude. But the contribution of UHI is minor whenever from 1954 or 1979 to present, especially for the regional annual and winter minimum temperature, the warming attributed by UHI is only some 5%, which are both impacted mostly.

Key words: surface air temperature, warming change, UHI (urban heat island) contribution, M estimation

引 言

过去 100 年地面区域的半球平均温度记录引起了许多研究学者对全球增暖问题的关注与讨论^[1-4]。

近 50 年来中国的温度趋势变化与北半球的情况大致相似,大部分地区,特别是北方年平均和冬季气温显著增暖,一些迹象表明,人类活动可能是造成中国乃至全球地面气温变化的重要因素之一^[5-6]。城市化作为一种重要的人类活动改变土地利用形式,已

* 国家自然科学基金(批准号:40605021)和科技部基础条件平台(编号:2005DKA31700—01)资助项目
2009 年 2 月 8 日收稿; 2009 年 5 月 16 日收修定稿
第一作者: 司鹏,从事气候变化研究. Email: spsbox@163.com

经对环境气候造成很大影响^[7-13]。迄今为止,国内外已有不少研究工作针对城市化导致的区域或局地气候变化进行了分析和探讨,城、郊温差已被证明^[14]。

然而,目前,城市化对观测到的地面气温趋势增暖是否有显著贡献,存在很大分歧。Jones 等^[15-16]对前苏联西部地区、澳大利亚东部以及中国东部地区的乡村台站与气候研究中心(CRU)研制的格点地面气温数据的趋势差异进行分析,发现城市化对全球平均气温时间序列造成的增暖影响不足 $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 。Parker^[17-18]通过论证指出大尺度范围的气候增暖并不是由城市化所引起。Li 等^[19]利用经均一性订正的 1954—2001 年的地面实测气温资料,运用旋转经验正交展开法,将中国分为五大区域,通过比较各气候区中城市—乡村台站年平均气温距平序列的趋势差异,发现近 50 年来城市热岛使得我国地面年平均气温增暖不到 $0.011^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。还有 Peterson^[20-21], Easterling 等^[22], IPCC(2007)^[23], IPCC(2001)^[5]等,认为城市化对大范围的区域尺度气温增暖趋势没有显著影响;相反,赵宗慈^[24], Kalnay 和 Cai^[25], 周雅清等^[26], He^[27], Ren 等^[28]的研究结果表明,区域气候增暖有很大一部分是由城市化引起的,并且在影响程度上是不容忽视的。

由此可见,对于大范围的区域尺度气候变化来说,城市化的影响究竟有多大,是否需要对这个影响进行订正,关于这个问题,我们有必要采用更完整、可靠的气候资料和科学的方法进行进一步研究。最重要的是,近 50 年来,我国北方地区气温显著上升,其中华北和东北地区的增暖幅度最大^[29-30],同时,北方地区也是我国土地利用(城市化、荒漠化、农业、牧业等)改变最为典型的区域^[31-33]。因而,通过对中国东北部区域城市化影响的分析和检测,有助于我们更好地认识中国气温变化规律,为大尺度范围或局地气候变化的人类活动影响研究提供重要的参考依据。

1 资料与方法

本文研究的东北部区域主要包括东北、华西北部、河套及内蒙古中、东部地区,经纬度范围为($35^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$)之间(如图 1 所示)。

1.1 资料

气候资料的可靠性和准确性是进行气候变化研究及气候预测的基础。研究中用到的地面观测气温

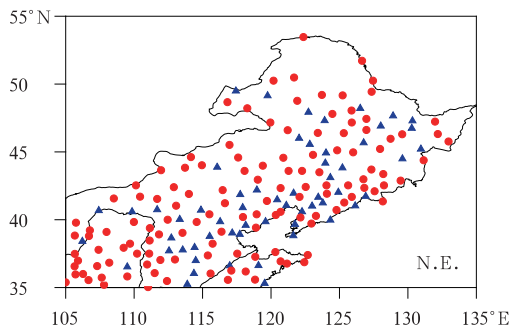


图 1 中国东北部地面气象观测台站的分布

(三角▲代表明显热岛台站 I;
圆圈●代表非明显热岛台站 II)

Fig. 1 In situ meteorological station
distribution in Northeast China

(▲symbol presents obvious UHI stations I;
●one presents non-obvious UHI stations II)

资料是由国家气象信息中心气象资料室提供的中国均一化历史气温数据集(CHHT)^①,通过评估该数据集中的气温序列能够代表中国区域气候变化特征^[34],选取其中的逐月平均最高、最低气温资料,时间范围为 1954—2005 年。考虑到地面台站定时观测次数不同的影响,研究中用到的平均气温值均采用最高、最低气温的算术平均。

为了便于向量计算,从中国均一化历史气温数据集(CHHT)^①730 个测站的逐月平均最高、最低地面气温资料中,分别选取 1954 年以来缺测年份不大于 7 年的 581 个台站的月平均温度资料。根据东北部区域定义的范围,最终确定了 187 个测站的温度序列,其中个别测站的个别月份缺测数据利用多年平均值代替。

1.2 研究方法

区域内地面观测的城市、郊区台站的划分,研究中综合 Easterling 等^[22]和 Li 等^[19]的方法,依据人口密度同时结合台站所在周围环境作为标准:根据中国第五次人口普查数据(2000)以及中国地面台站元数据信息^①,将东北部区域地面测站分为两类: I. 人口超过 500000 的城市,不管其测站设在“市区”还是“郊区”,认为是“明显热岛台站”;人口超过 50000 的城市,并且气象台站设在“市区”,也认为是“明显热岛台站”。II. 除此之外的台站,都认为是热岛影响较小的台站或“非明显热岛台站”。最终得到的东北部各类型台站数目情况,如表 1 所示。

① 李庆祥,张洪政,刘小宁,等. 中国均一化历史气温数据集(1951—2004)(1.0 版). 北京:国家气象信息中心气象资料室,2006.

由于原样本气温资料受年际变化影响很大,各月的平均值不一样,所以为了使之能在同一水平下进行比较,研究中采用气温距平序列代替原样本气温序列进行区域气温年/季节变化分析。距平值的参考气候期取对应的全序列长度。

区域平均距平序列的构造,借鉴 Li 等^[19]研究中的做法,即将区域内 187 个台站年(逐月、季节)平均温度(最高、最低气温)距平序列做主分量(PCA)分析,以展开后的第一主成分的荷载平方作为权重系数,对所有台站的气温距平序列进行加权平均,得到区域平均的气温距平序列。区域背景气候序列的建立采用同样方法,对区域内非明显热岛台站Ⅱ(表 1)进行主分量展开分析得到。

城市化影响的评估:大多数工作中,城市化影响往往主要通过城市热岛效应加强来实现,这也是当今学术界用来评估城市化影响最常用的方法。研究中利用区域平均实测气温距平序列与对应的背景气候距平序列线性趋势的差值表示。其中线性趋势的拟合采用鲁棒回归(M 估计)^[35-36]。

表 1 东北部不同类型热岛台站数目
Table 1 Numbers of different types of “UHI stations” in Northeast China

分区	分区台站总数	明显热岛台站数Ⅰ	非明显热岛台站数Ⅱ
N. E.	187	58	129

2 中国东北部区域城市化影响分析

2.1 近 50 多年来区域气温变化分析

2.1.1 区域年平均温度变化

图 2 显示,1954 年以来,东北部区域气温有明显的增暖变化。其中,区域年平均最低气温的上升趋势(lowess 平滑曲线)最为突出,年平均气温次之,而年平均最高气温的增暖趋势相对最小,因而年平均日较差表现出明显的下降趋势。从变化幅度来看,近 50 多年区域年平均最低气温、平均气温、最高气温分别上升约为 2.11℃、1.59℃、1.13℃,显然,最低气温的上升幅度是最显著的,而最高气温则相对最小,从而使得日较差气温下降约 1.26℃。

从年代际角度分析,东北部区域气温增暖过程主要发生在 20 世纪 80 年代初期以来的近 20 多年里。以区域年平均气温距平序列(图 2c)为例进行说明:在 20 世纪 80 年代初期以前,主要以负距平分布为主,尤其是在 50 年代中期,60 年代中后期,80 年代前期有多个负距平分布区,其中在 1969 年出现最为严重的偏冷年;到 80 年代后期以后,以正距平

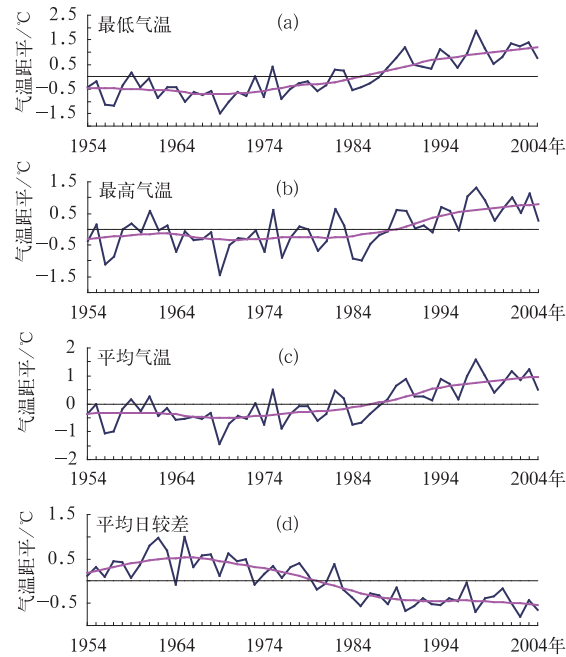


图 2 区域年平均温度距平逐年变化曲线
(去除“明显热岛台站”序列)

(a) 最低气温; (b) 最高气温; (c) 平均气温;
(d) 平均日较差(图中平滑曲线为 lowess 平滑^[37])

Fig. 2 Regional annual temperature anomalies in Northeast China. The pink line is based on the lowess smoother^[37]

(“obvious UHI stations” are excluded)

- (a) Annual mean minimum temperature,
- (b) Annual mean maximum temperature,
- (c) Annual mean temperature,
- (d) Annual daily temperature range

温度分布为主,最暖年份出现在 1998 年。

2.1.2 区域季节平均温度变化

据唐国利等^[38]对近百年中国地表气温变化趋势的再分析表明,和全球平均温度变化一样,近 100 年来中国的增暖主要发生在冬、春季,而夏季却有微弱变凉趋势。因此,研究中着重分析区域冬季和夏季平均温度的变化(图略)。

与年平均温度的趋势变化特点相似,近 50 多年来,各季节平均温度也均有上升趋势。同样,最低气温的增暖趋势仍然是最大的,平均气温次之,而平均最高气温的增暖趋势最小。冬季的增暖幅度要比夏季明显,尤其表现在日较差的逐年变化上。1954 年以来,冬季平均最低气温、平均气温、最高气温的上升幅度分别约为:3.30℃、2.57℃、1.90℃,大于年平均气温要素的增暖幅度,而对应的夏季则分别约为:1.29℃、0.80℃、0.58℃,明显小于冬季气温的增暖

幅度,二者的日较差下降分别约为:1.48℃、0.72℃。

从多年演变角度分析,上世纪 80 年代初期以前,冬季平均温度距平的年代际波动较大,相对而言,夏季则比较平缓。但是,冬、夏季的不同平均气温要素的增暖过程均主要发生在上世纪 80 年代以来的近 20 多年里。

2.2 城市热岛对东北部区域气温的平均影响评估

2.2.1 区域年/季节平均温度与人口密度的关系

利用前述不同类型热岛台站的划分结果(表 1),对该区域“明显热岛台站(I)”与“非明显热岛台站(II)”的统计特征量(平均值)进行计算,初步分析近 50 多年来,不同城市化程度的台站所在地的气温变化特点。

如表 2、3 中结果显示,两个时间段的年/季节平均最低气温、平均气温、最高气温的平均值,均是“明显热岛台站”的值高于“非明显热岛台站”,表现出城市热岛效应的显著特征。对于最低气温来说,城乡温差范围为 1.9℃~2.2℃,是气温平均值差别最大的,尤其是冬季(1979—2005 年)达到 2.2℃;而最高气温的城乡温差范围为 1.0℃~1.3℃,相对较小,其中最为显著的表现是在夏季(1954—2005 年)仅为 1.0℃。但是,平均日较差的平均值在两个时间段中,则是“明显热岛台站”的值低于“非明显热岛台站”,表现出城市观测到的气温日较差减少的特点,同样突出在冬季,城乡温差达到-1.0℃。由此,从某种程度上,表明了随着城市化进程,城市热岛效应存在的客观性^[5,39]。

表 2 区域不同类型台站 1954—2005 年平均温度的统计特征(单位:℃)

Table 2 Regional temperature statistics of different types of “UHI stations” in Northeast China from 1954 to 2005(Unit:℃)

平均值	平均最低气温		平均气温		平均最高气温		平均日较差	
	I	II	I	II	I	II	I	II
年	2.3	0.3	8.0	6.4	13.7	12.5	11.4	12.2
春季	2.6	0.7	8.9	7.4	15.2	14.1	12.6	13.3
夏季	17.4	15.5	22.6	21.1	27.8	26.8	10.4	11.3
秋季	3.0	1.1	8.8	7.1	14.5	13.2	11.5	12.2
冬季	-14.0	-16.1	-8.4	-10.0	-2.8	-3.9	11.2	12.2

表 3 区域不同类型台站 1979—2005 年平均温度的统计特征(单位:℃)

Table 3 Regional temperature statistics of different types of “UHI stations” in Northeast China from 1979 to 2005(Unit:℃)

平均值	平均最低气温		平均气温		平均最高气温		平均日较差	
	I	II	I	II	I	II	I	II
年	2.8	0.8	8.4	6.8	14.0	12.8	11.1	12.0
春季	3.3	1.3	9.4	7.8	15.5	14.3	12.3	13.1
夏季	17.8	15.8	22.8	21.3	28.0	26.9	10.2	11.1
秋季	3.4	1.4	9.0	7.4	14.7	13.4	11.2	12.0
冬季	-13.1	-15.3	-7.7	-9.3	-2.3	-3.4	10.8	11.8

2.2.2 区域平均温度趋势的空间分布

图 3 给出了区域不同年平均气温要素趋势变化的等值线分布。图中显示,相对增暖较大区域的气温趋势基本呈现东—西向扩展,而相对较冷区域主要分布在河套南部、华北西北部。同时,图中还能观测到多个高值暖中心区,集中分布在内蒙古中部和东部、东北大部,然而这些局地地区也是城市化发展比较突出的地区。结合图 1 中“明显热岛台站”的分布位置,可以发现,中国东北部区域城市的近地面气温增暖变化的空间分布特征与城市化土地利用形式基本一致。

从图 3a、b、c 的对比来看,东北部区域的年平均最低气温的趋势增暖最大,年平均气温次之,而年平均最高气温相对最小,因此,年平均日较差(图 3d)表现出极大的降低趋势。这一点与第 2.1.1 节中区

域年平均温度变化(去除“明显热岛台站”)特点一致,说明近 50 多年来,中国东北部的增暖变化是普遍的。从趋势的空间分布特点来看,年平均最低气温(图 3a)和年平均日较差(图 3d)显示出较好的一致性,同时二者也是前述东北部气温趋势空间分布特征的典型表现。

图 4 是区域季节不同气温要素趋势变化的空间分布,同样,这里仅给出冬季和夏季气温趋势的等值线图以作论述。如图所示,无论是各季节不同气温要素的趋势变化幅度还是空间分布的特点均与年平均温度的变化(图 3)基本一致。但是,在每个季节中,平均最低、最高、平均气温以及日较差趋势的变化表现出多样的高值暖中心分布,最为显著的特点表现在,冬季各气温要素高值中心区的趋势强度相对年平均温度显著增强,而夏季则相对减弱。

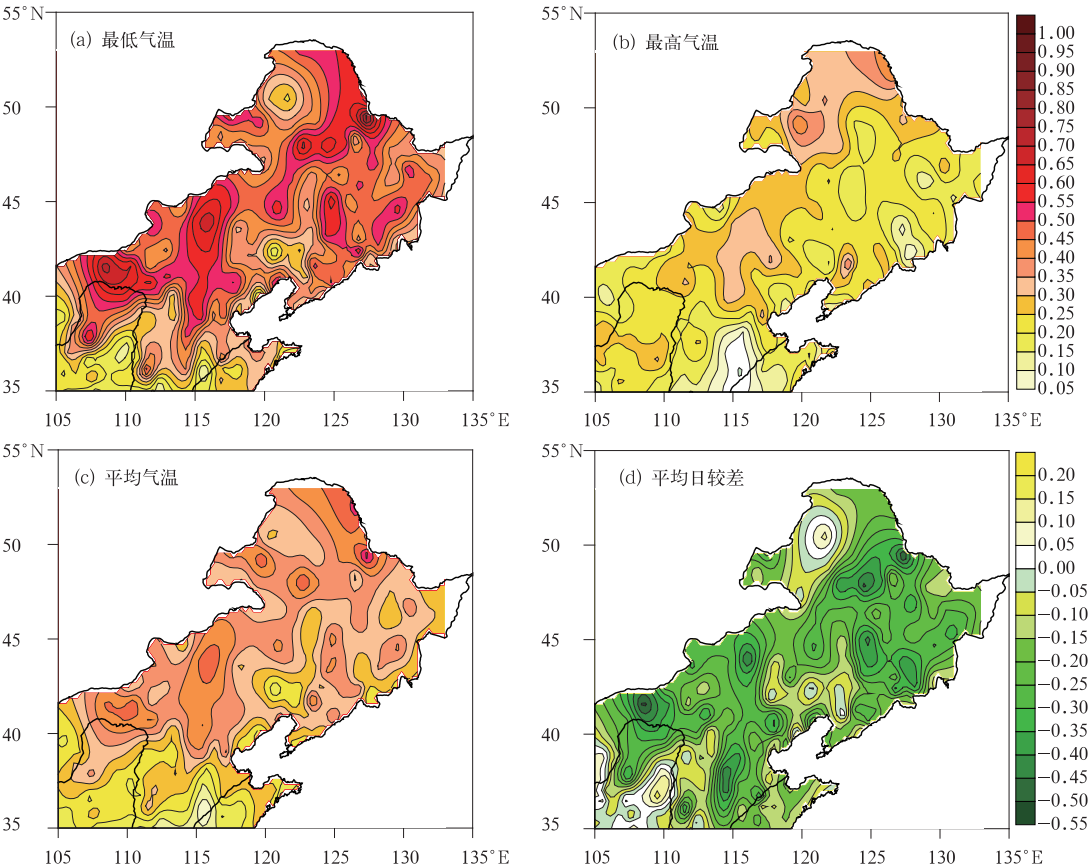


图3 区域年平均温度趋势变化的空间分布(单位:℃/10a)(1954—2005年)

(a)最低气温;(b)最高气温;(c)平均气温;(d)平均日较差

Fig.3 The trend distribution of regional annual temperature in Northeast China during 1954—2005(Unit: ℃/10a)

(a) Annual mean minimum temperature, (b) Annual mean maximum temperature, (c) Annual mean temperature, (d) Annual daily temperature range

从而,通过以上初步分析表明,东北部区域增暖现象是普遍的,但同时其中的城市化影响也是显著的。并且,冬季各气温要素趋势的高值暖中心,相对于年和其他季节表现明显增强,显示出城市化对冬季气温的增暖影响相对突出。这一影响特点在许多其他研究结论中也有所体现^[40-41]。

2.2.3 近 50 多年来城市热岛的影响

2.2.3.1 年平均温度的热岛效应贡献

如表 4 所示,对于年平均气温变化来说,含“明显热岛台站”的气温变化趋势是 0.317 ℃/10a,剔除“明显热岛台站”后的变化趋势是 0.306 ℃/10a,因此热岛效应对东北部区域年平均气温增暖影响为 0.011 ℃/10a,52 年来将近 0.06 ℃。而 Li 等^[19]利用同样方法研究过去 50 年城市热岛对中国年平均气温的影响中得出,东北部年平均气温趋势减小 0.002 ℃/10a,

50 年平均不到 -0.01 ℃,与本文得出的结论有些出入。这可能与区域划分方法不同有关,其存在着研究台站选择上的空间抽样误差。但是表 4 中热岛贡献显示,52 年来热岛效应的年平均气温增暖贡献仅占背景气温增暖的 3.6%,其贡献程度是非常小的。因此,以上不同的结论并不矛盾。从表 4 还可以看出,尽管热岛效应对区域年平均最低气温的增暖影响最大,为 0.016 ℃/10a,52 年来约升高 0.08 ℃,而对区域年平均最高气温的影响相对最小,为 0.008 ℃/10a,52 年来约上升 0.04 ℃,但二者分别仅占对应的背景气温增暖的 4.0%、3.7%,同时,年平均日较差序列在剔除明显热岛效应前、后并没有表现出明显的趋势下降,二者趋势差值仅为 -0.003 ℃/10a。显然,近 50 多年来,热岛效应对东北部区域年平均温度的增暖贡献并不显著。

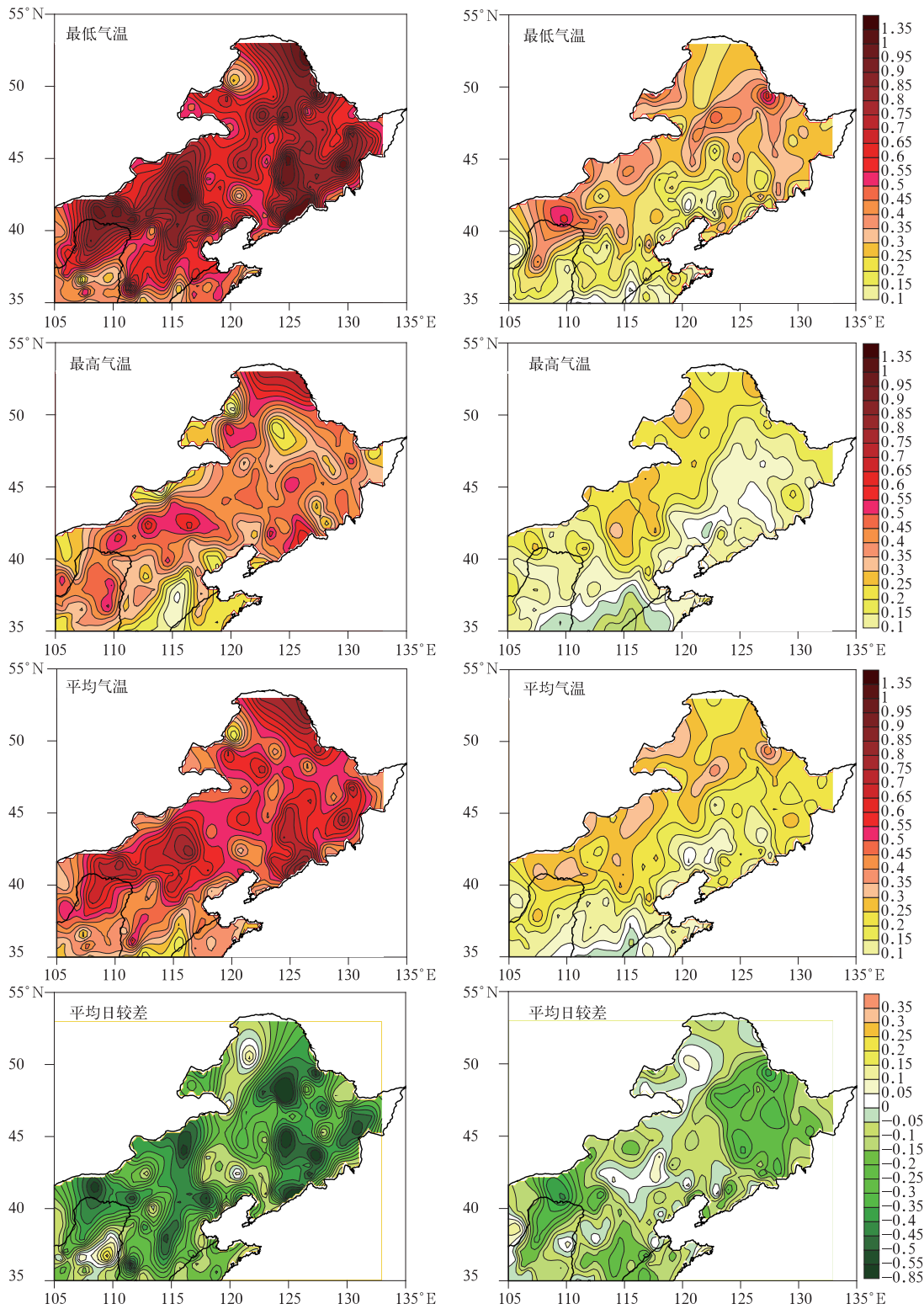


图 4 区域季节平均温度趋势变化的空间分布(单位: °C/10a)(1954—2005 年)
左: 冬季; 右: 夏季

Fig. 4 The trend distribution of regional seasonal temperature
in Northeast China during 1954–2005 (Unit: °C/10a)
(Left panel is winter temperature; Right panel is summer temperature)

表 4 剔除明显热岛效应前、后的区域年平均温度变化趋势(1954—2005 年)

Table 4 Regional annual temperature trend with/without “obvious UHI stations” in Northeast China from 1954 to 2005				
	含明显热岛台站(℃/10a)	剔除明显热岛台站(℃/10a)	差值(℃/10a)	热岛贡献(%)
平均最低气温	0.421	0.405	0.016	4.0
平均气温	0.317	0.306	0.011	3.6
平均最高气温	0.225	0.217	0.008	3.7
平均日较差	−0.246	−0.243	−0.003	1.2

2.2.3.2 季节平均温度的热岛效应贡献

如表 5 所示,受热岛效应(“差值”)影响,近 50 多年来,区域季节平均最低气温的增暖幅度最大,平均气温次之,而平均最高气温相对最小,其中,春、冬季表现显著;而平均日较差趋势降低明显表现在秋、冬季节。1954 年以来,冬季平均最低气温的热岛增暖幅度为 0.030℃/10a,受城市热岛影响最大;冬季日较差在热岛效应影响下趋势降低 0.034℃/10a,同样也是所有季节中最为明显的。但是,从热岛贡献来看,二者分别仅占冬季背景气温变化的 4.7%

和 12.0%,贡献极小。同时表中其他季节气温要素的热岛贡献值显示,均要比对应的背景气温增暖幅度小一个量级以上。

但是,在另文中^[42]对同一时期北京地区的热岛效应评估结果显示,城市热岛对北京年/冬季平均气温的增暖影响分别为 0.221℃/10a、0.239℃/10a,贡献达到 44.8%、34.5%,无论是增暖幅度还是贡献均是非常显著的。结合本文的分析结果表明,城市热岛对东北部区域气温的增暖影响确实存在,尤其表现在冬季,但从贡献来看具有局地性。

表 5 剔除明显热岛效应前、后的区域季节平均温度变化趋势(1954—2005 年)(单位:℃/10a)

Table 5 Regional seasonal temperature trend with/without “obvious UHI stations” in Northeast China from 1954 to 2005(Unit:℃/10a)					
		春季	夏季	秋季	冬季
平均最低气温	含热岛	0.509	0.254	0.320	0.664
	剔除热岛	0.487	0.249	0.314	0.634
	差值	0.022	0.005	0.006	0.030
	热岛贡献(%)	4.5	2.0	1.9	4.7
平均气温	含热岛	0.416	0.156	0.219	0.513
	剔除热岛	0.399	0.154	0.217	0.494
	差值	0.017	0.002	0.002	0.019
	热岛贡献(%)	4.3	1.3	0.9	3.8
平均最高气温	含热岛	0.333	0.115	0.111	0.378
	剔除热岛	0.321	0.111	0.111	0.366
	差值	0.012	0.004	0.000	0.012
	热岛贡献(%)	3.7	3.6	0.0	3.3
平均日较差	含热岛	−0.220	−0.141	−0.100	−0.318
	剔除热岛	−0.200	−0.139	−0.074	−0.284
	差值	−0.020	−0.002	−0.026	−0.034
	热岛贡献(%)	10.0	1.4	35.1	12.0

2.2.4 1979 年以来的热岛效应贡献分析

对于 1979 年以来的热岛效应贡献来说(表略),除了冬季平均最低气温和春季平均最高气温略有增暖趋势外,其他季节及年平均温度均表现出气温趋势减小。对于年、冬季平均最低气温的变化来说,热岛效应的影响分别为−0.001℃/10a、0.005℃/10a,相对于对应的背景气温趋势增暖 0.654℃/10a、

0.916℃/10a 可以忽略。同时,东北部区域年、冬季平均日较差受热岛效应影响趋势下降分别为 0.007℃/10a、0.008℃/10a,分别仅占对应背景日较差变化的 2.6%、1.9%,显然也是微不足道的。

同样,相对区域尺度,热岛效应对近 30 年来北京气温的增暖贡献仍然是显著的^[42],并且增暖影响的幅度要大于近 50 年来的。

3 结论

采用均一化的中国历史气温数据,从 1954—2005 年、1979—2005 年两个时间段,分别讨论分析了城市化进程对中国东北部区域长时间气温序列的增暖贡献,得到以下几点结论:

(1) 近 50 多年来,中国东北部区域增暖显著,突出表现在冬季。年平均最低、平均、最高气温的增暖幅度分别为:0.405 °C/10a、0.306 °C/10a、0.217 °C/10a,对应冬季气温增暖分别为:0.634 °C/10a、0.494 °C/10a、0.366 °C/10a;

(2) 对近 50 多年来区域气温与人口密度关系的初步分析发现,城市台站所在的局地气温明显高于非城市台站,表明了热岛效应的真实存在;

(3) 通过进一步研究发现,城市热岛的影响是局地的,对区域大尺度范围的气温增暖贡献并不显著,这一结论在文献[5,23]中得到了印证。同时,在 Li 等^[34]的最新研究中得出,1988 年前后的气候序列突变是造成东北部区域气温明显增暖的主要原因,而非城市热岛效应。

参考文献

- [1] Jones P D, Raper S C B, Bradley R S, et al. Northern Hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984[J]. *J Appl Met*, 1986a, 25(2):161-179.
- [2] Jones P D, Raper S C B, Wigley T M L. Southern Hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984[J]. *J Appl Met*, 1986b, 25(9):1213-1230.
- [3] Hansen J R, Lebedeff S. Global trends of measured surface temperature[J]. *J Geo Res*, 1987, 92(13): 13345-13372.
- [4] Vinnikov K Y, Groisman P Y, Lugina K M. Empirical data on contemporary global climate changes (Temperature and Precipitation)[J]. *J Climate*, 1990, 3(6): 662-677.
- [5] Baede A P M, Ahlonsou E, Ding Y, et al. The Climate System: An Overview[R]. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, UK. University of Cambridge, 2001, 10-11, 94, 106.
- [6] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(4):701-716.
- [7] Carlson T N, Traci A S. The impact of land use/land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective[J]. *Global Plan*, 2000, 25(1):49-65.
- [8] 程胜龙. 城市化对兰州气温变化影响的定量分析[J]. *气象*, 2005, 31(6):29-34.

- [9] 郭家林, 王永波. 近 40 年哈尔滨的气温变化与城市化影响[J]. *气象*, 2005, 31(8):74-76.
- [10] 刘宁微, 马雁军. 城市化发展对气象要素的影响[J]. *气象*, 2006, 32(8):28-34.
- [11] 江晓燕, 刘伟东. 从不同的陆面资料看城市化对北京强降水的影响[J]. *气象学报*, 2006, 64(4):527-536.
- [12] 王维国, 王秀荣. 2007 年城市极端天气事件及其危害分析[J]. *气象*, 2008, 34(4):16-21.
- [13] 胡文志, 梁延刚, 雷惠雯, 等. 香港城市与郊区气候差异分析[J]. *气象*, 2009, 35(2):71-79.
- [14] Oke T R. 2004. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites[R]. IOM Report No. 81. WMO/TD 1250. Geneva: World Meteorological Organization, 1-47.
- [15] Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land[J]. *Nature*, 1990, 347(653):169-172.
- [16] Jones P D, Lister D H, Li Q X. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China[J]. *J Geo Res*, 2008, 113, (d16):D16122-1-D16122-12.
- [17] Parker D E. Large-scale warming is not urban[J]. *Nature*, 2004, 432(7015):290.
- [18] Parker D E. A demonstration that large-scale warming is not urban[J]. *J Climate*, 2006, 19(12):2882-2895.
- [19] Li Q X, Zhang H Z, Liu X N, et al. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China[J]. *Theor Appl Climatol*, 2004, 79(3-4):165-174.
- [20] Peterson T C, Gallo K P, Lawrimore J, et al. Global rural temperature trends[J]. *Geophys R L*, 1999, 26(3):329-332.
- [21] Peterson T C. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found[J]. *J Climate*, 2003, 16(18):2941-2959.
- [22] Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe[J]. *Science*, 1997, 277(5324):364-367.
- [23] Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change[R]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: University of Cambridge, 2007, 237, 243-245.
- [24] 赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响[J]. *气象*, 1991, 17(4):14-16.
- [25] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. *Nature*, 2003, 423(6939):528-531.
- [26] 周雅清, 任国玉. 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*, 2005, 10(4):743-753.
- [27] He J F, Liu J Y, Zhuang D F, et al. Assessing the effect of land use/land cover change on the change of urban heat island intensity[J]. *Theor Appl Climatol*, 2007, 90(3-4):217-226.
- [28] Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. Urbanization effects on

observed surface air temperature trends in North China[J]. J Climate, 2008, 21(6):1333-1348.

[29] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2):238-244.

[30] Zhai P M, Chao Q C, Zou X K. Progress in China's climate change study in the 20th century[J]. J Geograph Sci, 2004, 14(1):3-11.

[31] 张国平, 刘纪远, 张增祥. 基于遥感和 GIS 的中国 20 世纪 90 年代毁林开荒状况分析[J]. 地理研究, 2003, 22(2):221-226.

[32] 王涛, 吴薇, 薛娴, 等. 中国北方沙漠化土地时空演变分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3):230-235.

[33] Liu J Y, et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000 [J]. Science in China (Series D), 2003, 46(4):373-384.

[34] Li Q X, Li W, Si P, et al. Assessment of surface air warming in Northeast China, with emphasis on the impacts of urbanization[J]. Theor Appl Climatol, 2010, 99(3-4):469-478.

[35] 施能, 王建新. 稳健回归的反复加权最小二乘迭代解法及其应用[J]. 应用气象学报, 1992, 3(3):353-358.

[36] 司鹏, 李庆祥, 李伟, 等. 城市化对深圳气温变化的贡献[J]. 大气科学学报(原南京气象学院学报), 2010, 33(1):110-116.

[37] William S C. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots[J]. J Am Stat A, 1979, 74(368):829-836.

[38] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4):791-798.

[39] Gallo K P, Easterling D R, Peterson T C. The influence of land use/land cover on climatological values of the diurnal temperature range[J]. J Climate, 1996, 9(11):2941-2944. 39.

[40] Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo [J]. Atmos Envir, 1999, 33(24-25):3897-3909.

[41] Kim Y H, Baik J J. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul[J]. AMS, 2005, 44(5):591-605.

[42] 司鹏, 李庆祥, 轩春怡, 等. 城市化对北京气温变化的贡献分析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4):138-144.