

中国东部城市化与地面非均匀增暖

吴凯, 杨修群*

南京大学大气科学学院, 气候与全球变化研究院, 南京 210093

* 联系人, E-mail: xqyang@nju.edu.cn

2012-07-01 收稿, 2012-09-12 接受

国家重点基础研究发展计划(2010CB428504)资助

摘要 利用 1979~2008 年中国东部 312 个站点均一化调整后的地面气温观测资料及 DMSP/OLS 夜间灯光数据, 运用滑动空间距平方法, 对冬夏地面气温变化趋势在不同空间尺度下的非均匀性进行检测, 并分析了城市化对地面增暖的影响. 结果表明, 中国东部夏季和冬季的增暖高值中心分别集中在长三角和京津冀地区, 其中长三角地区夏季的增暖主要是由夏季最高气温的增加所导致, 城市增温率为 0.132~0.250 /10 a, 增温贡献率为 36%~68%; 京津冀地区冬季的增暖主要是由冬季最低气温的增加所导致, 城市增温率为 0.102~0.214 /10 a, 增温贡献率为 12%~24%. 城市群增暖的时空差异可能与区域气候背景及人为热排放的变化有关.

关键词

非均匀地面增温
城市化
地面气温
最高气温
最低气温
中国东部

近 50 年来地面的增暖, 可能与气候的自然变化和人类活动的共同影响有关, 其中人类活动对气候的影响主要指 CO₂ 等温室气体和气溶胶等颗粒物的排放, 以及土地利用对地表覆盖性质的改变^[1]. 相对于温室气体而言, 土地利用变化对气候的影响还没有得到足够的重视. 城市化是土地利用变化中最为显著的过程^[2], 它不仅会改变地表植被的分布, 同时对区域气候变化和未来的气候预估也会产生影响^[3]. 此外, 大范围的城市化进程还会引起地表能量和水分平衡的变化^[4], 进而对极端天气气候事件的发生产生作用. 由于温室气体及城市化都会导致地面气温的升高, 因此难以独立的区分二者对区域增暖的贡献^[5].

为了检测城市化的气候效应, 人们提出了一系列方法. 最传统和直接的方法即是城乡对比法(urban minus rural, UMR). 该方法的关键在于如何对站点进行客观分类. 通常而言, 可以运用人口资料^[6~17]或卫星遥感数据(如夜间灯光图像、土地覆盖资料等)^[18~23], 并结合站点的地理位置, 对其进行分类. 此外, 还可

以利用经验正交函数分解(empirical orthogonal function, EOF)^[24,25]、主成分分析(principal component analysis, PCA)^[26,27]和台站历史沿革资料^[28]遴选参考站或乡村站, 通过比较城市站与参考站(乡村站)的差异, 进而评估城市发展对气温变化的影响.

尽管城乡对比能够直观地反映城市化的气候效应, 但是此方法依赖于站点的分类方式. 分类标准的不同及样本个数的差异会对研究结果产生一定的影响^[5]. 因此, Kalnay 等人^[5]提出了一种新方法评估城市化对区域增温的作用. 该方法利用 NCEP/NCAR 再分析资料在同化过程中没有用到地面观测信息的特点, 通过比较观测资料和再分析资料的差异(observation minus reanalysis, OMR), 进而反映城市化和土地利用变化对地面气温的影响. 尽管 OMR 值与下垫面分布有较好的对应^[22,29~36], 但能否将两套资料的差异归结为下垫面的作用, 对此仍然存在一些争议^[37,38].

改革开放以来, 我国城市化进程开始加快, 东部地区获得了长足发展. 该区域城市密度大, 彼此在社

引用格式: 吴凯, 杨修群. 中国东部城市化与地面非均匀增暖. 科学通报, 2013, 58: 642-652

英文版见: Wu K, Yang X Q. Urbanization and heterogeneous surface warming in eastern China. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5627-8

会、经济和文化方面具有密切联系,已形成若干各具特色的城市群(如京津冀、长三角和珠三角等)。近年来,城市化对中国东部地面气温增暖的影响也引起了学者的广泛关注,虽然取得了不少成果,但也存在着一些争论。一些研究认为,城市内部的热岛效应对区域尺度的增暖并没有太大影响^[7,13,26,27]。然而,大多数研究表明,城市化引起的气候效应不仅对局地的短期升温产生作用,同时会影响区域的长期增暖^[6,9,12,14-17,20-24,28-30,35,36]。运用 OMR 方法,Zhou 等人^[29]和 Zhang 等人^[30]的研究表明,中国东部的地面气温增暖明显受到城市化的作用,且最低温度的增幅要大于最高温度,进而使得气温日较差减小。利用夜光资料对站点进行分类,Du 等人^[20]研究发现,长三角地区由城市化导致的区域增温率为 0.069 /10 a,且热岛效应在夏季比冬季显著。运用数值模拟方法,张璐等人^[39]发现长三角地区的热岛效应存在明显的日变化特征,并且对城市边界层的结构和发展也会产生影响。Ren 等人^[15]选取了华北地区 282 个站点进行分析,发现由城市化导致的区域平均增温率为 0.11 /10 a,增温贡献率达到 37.9%,且冬季增温比夏季显著。同时,丁一汇等人^[40]和 Ren 等人^[14,15]认为,城市化效应是造成气候变化分析中资料不确定性的主要原因。此外,Yang 等人^[22]研究表明,长三角地区的特大型城市对区域增暖的贡献与温室效应相当,应当得到关注和重视。

关于城市化对中国地面气温变化的影响已经有了许多研究成果(见表 1),但由于分析时段、区域和方法的不同,使得已有成果之间还存在着一定的差异。与此同时,在对站点观测资料进行分析时,时间序列的均一性也是一个非常重要的问题,均一化调整后的资料能够更加客观地反映气候变化特征^[41-44]。此外,对于城市增温效应的季节变化和日变化,目前还没有得出一致的结论。当前的问题在于,中国东部三大城市群究竟在多大程度上影响了地面气温的增暖,城市群对平均气温的影响是否存在季节性差异,以及城市群对最高、最低气温的影响情况。因此,检测和评估中国东部城市化的增温效应,对认识城市发展与极端气候变化的关系具有十分重要的意义。

1 资料来源及均一性调整

我国的站点观测资料主要分为 3 类,包括 160 个国家基准气候站每小时 1 次的观测、600 个国家基本

气象站每日 4 次的观测和 1800 个一般气象站每日 1 次的观测。通常将国家基准气候站和国家基本气象站统称为国家级气象站,共有 760 个站点。吴增祥^[45]的统计表明,中国 70%~80% 的国家级气象站在建国后曾进行过迁移。因而在分析站点观测资料时,有必要对数据的均一性进行合理的订正^[45-47]。

对资料进行均一性调整,目前也有不少方法^[41-43]。Li 等人^[41]采用二相回归均一性检验方法对我国站点观测资料进行订正,于 2006 年发布了第一版中国均一化历史气温数据集。此后, Li 等人^[43]应用多元分析方法(multiple analysis of series for homogenization, MASH)对我国 549 个台站的温度序列进行了调整。MASH 方法具有严格的数学基础,并且在国际上已得到普遍认可。与之前基于元数据记录的订正结果^[41]相比,其主要的变点基本一致,但 MASH 方法能够检测出某些台站由人工到自动观测系统变更所产生的偏差^[48]。

本文选用经过 MASH 方法订正后的国家级气象站地面气温观测资料^[43]和美国军事气象卫星计划/线性扫描业务系统(Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System, DMSP/OLS)观测的夜间灯光数据。卫星夜光资料来源于美国地球物理数据中心(<http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/downloadV4composites.html>),空间分辨率为 1 km。该资料能探测到城市地区的低强度灯光,并将其与黑暗的乡村背景区分开来。因此,DMSP/OLS 夜光图像不仅可作为城市化的表征,还可成为人类活动监测研究的良好数据源^[49,50]。Zhou 等人^[29]和 Hu 等人^[35]的研究表明,中国东部的城市化进程主要发生在 1979 年之后,因而本文将分析时段选为 1979~2008 年,分析区域定为中国东部(15°~54°N, 110°~136°E)。

2 研究方法

2.1 时间序列与变化趋势

首先,从 549 个气象站中选取位于中国东部并且在分析时段内具有连续观测值的台站,共计 312 个站点。然后,以上一年的 12 月和本年 1, 2 月为冬季、3~5 月为春季、6~8 月为夏季、9~11 月为秋季,分别计算各台站 1979~2008 年不同季节的平均气温和最高、最低气温的变化序列。最后,利用最小二乘法,求取各个季节的温度变化趋势。对于变化趋势的显著性

表 1 中国地区城市增温效应的研究成果汇总

作者	研究区域 (站点数量)	研究时段	研究方法 (分类标准)	城市化增温率 (/10 a)	城市化增温的 季节变化	城市化增温的 空间变化	城市化对最高、 最低气温的影响
Wang 等人 ^[6]	全国(84)	1954~1983	UMR(人口资料)	0.08	北方: 冬季>夏季 其他: 夏季>冬季	华北>江淮>东北>东南	
Jones 等人 ^[7]	东部(84)	1954~1983	UMR(人口资料)	0.05			
赵宗慈 ^[8]	全国(160)	1951~1989	UMR(人口资料)	0.02~0.06	冬季>春季>秋季>夏季		
Portman ^[9]	华北(41)	1954~1983	UMR(人口资料)	0.06	春季>冬季>夏季>秋季		
Li 等人 ^[26]	全国(390)	1954~2001	PCA(人口资料)	<0.012		江淮>华南>西北	
Zhou 等人 ^[29]	东南(194)	1979~1998	OMR	0.05			最低气温>最高气温
Zhang 等人 ^[30]	东部(431)	1960~1999	OMR	0.12		东北>华南	最低气温>最高气温
周雅清和任国玉 ^[12]	华北(282)	1961~2000	UMR(人口资料)	0.11	冬季>春、秋季>夏季		
初子莹和任国玉 ^[24]	北京(20)	1961~2000	EOF	0.16	秋季>春季>冬季>夏季		
Du 等人 ^[20]	长三角(99)	1961~2005	UMR(夜光强度)	0.069	夏季>秋季>春季>冬季		最高气温>最低气温
He 等人 ^[21]	全国(673)	1991~2000	UMR(土地覆盖)	0.11	冬季>秋季>春季>夏季	东北>华南>江淮	
方锋等人 ^[13]	西北(92)	1961~2000	UMR(人口资料)	0.01~0.07			
Ren 等人 ^[15]	华北(282)	1961~2000	UMR(人口资料)	0.11	冬季>夏季		
Hua 等人 ^[16]	全国(382)	1961~2000	UMR(人口资料)	0.03~0.05	冬季>夏季	华北>江淮>华南	最低气温>最高气温
唐国利等人 ^[17]	西南(322)	1961~2004	UMR(人口资料)	0.05~0.09	秋季>春、冬季>夏季		暖夜增多, 冷夜减少
Hu 等人 ^[35]	东部(322)	1979~2008	OMR				最低气温>最高气温
Li 等人 ^[27]	东北(187)	1954~2005	PCA(人口资料)	0.027	春季>冬季>秋季>夏季		最低气温>最高气温
张爱英等人 ^[28]	全国(752)	1961~2004	UMR(台站信息)	0.076	冬季>春季>夏季>秋季	江淮>东北>华南	
Yang 等人 ^[22]	长三角(463)	1981~2007	OMR(人口资料) UMR(夜光强度)	0.17~0.40 0.08~0.29	OMR: 冬季>夏季 UMR: 夏季>冬季		
孙敏等人 ^[36]	长三角(130)	1979~2003	OMR	0.0957	夏季>冬季		最低气温>最高气温
王芳和葛全胜 ^[23]	全国(160)	1980~2009	UMR(土地覆盖)	0.099~0.258	冬季>夏季		

检验, 采用相关系数的 t 检验方法.

2.2 空间滤波和滑动空间距平

本文尝试利用空间滤波的方法分离不同尺度的气候强迫对温度变化的影响, 即以每个站点为中心, 选取合适大小的滤波窗区, 将该站的温度变化趋势减去窗区内所有站点的平均, 得到其空间距平. 显然, 滤波窗区是随站点滑动的, 因而空间滤波的实质就是滑动的空间距平(moving spatial anomaly, MSA). 通过调整窗区的范围, 可得到不同尺度下温度变化的空间非均匀性, 进而反映出气温变化趋势在区域内部的差异特征.

结合夜间灯光图像和站点空间分布(图1), 本文分别选取了 $8^\circ \times 8^\circ$, $12^\circ \times 12^\circ$ 和 $16^\circ \times 16^\circ$ 三个窗区进行滤波处理. 假定滑动窗区及其以上尺度的气候变化是由大尺度气候强迫造成的, 那么经过滤波处理后的空间非均匀分布则可以归结为局地气候强迫(如城市化和土

地利用变化、人为热排放等)对区域气温变化的作用.

2.3 站点分类及城市增温的定义

利用 2008 年的 DMSP/OLS 卫星夜光数据, 参考相关的研究成果^[51-53]及站点的地理位置, 将夜光值不小于 55 的台站定义为城市站, 将小于该阈值的台站定义为非城市站. 图 1 反映了中国东部的夜间灯光图像和站点分类状况.

在对站点进行分类后, 根据三大城市群的地理位置对中国东部进行了分区(图 1). 为了定量分析城市群对区域气温变化的影响, 定义 U_n 为城市增温率, $U_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$, 其中 a_i 为城市站温度变化趋势的空间距平, n 为区域内城市站点的数量. 同时定义 R_m 为区域增温率, $R_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_i$, 其中 b_i 为各个站点的温度变化趋势, m 为区域内所有站点(包括城市站和乡村站)的数量. 最后, 将 $U_r = \frac{U_n}{R_m} \times 100\%$ 定义为城市增温贡献率. 通过对中国东部三大城市群的 U_n , U_r 进行统计分析, 可以大致地评估城市化对区域气温增暖的影响.

3 结果分析

3.1 温度变化趋势的时空特征

图 2 反映了中国东部近 30 年地面气温变化的空间分布. 结果表明, 东部地区在各个季节都呈现明显的增暖信号, 年平均增温率为 $0.5 / 10 \text{ a}$. 与 Ding 等人^[54]的分析结果相比, 本文的增温趋势较强, 这主要是因为东部地区近 30 年的增暖加剧所导致. 此外, 这种大范围的增暖也存在一定的时空变化, 其中春季(图 2(a))和秋季(图 2(c))的增暖在空间分布上较为均匀, 而夏季(图 2(b))和冬季(图 2(d))的增暖呈现一定的空间非均匀性. 总体而言, 整个区域的增暖在春、秋季较强, 冬、夏季较弱(表 2). 分别计算城市站和非城市站的增温趋势, 并比较二者的差别(表 2), 结果发现, 东部地区的热岛效应存在明显的季节变化, 且冬、春季高于秋、夏季, 年平均增温率为 $0.057 / 10 \text{ a}$, 增温贡献率为 11.4%.

3.2 不同尺度下温度变化趋势的空间非均匀性

由于夏季和冬季的温度变化存在明显的空间非

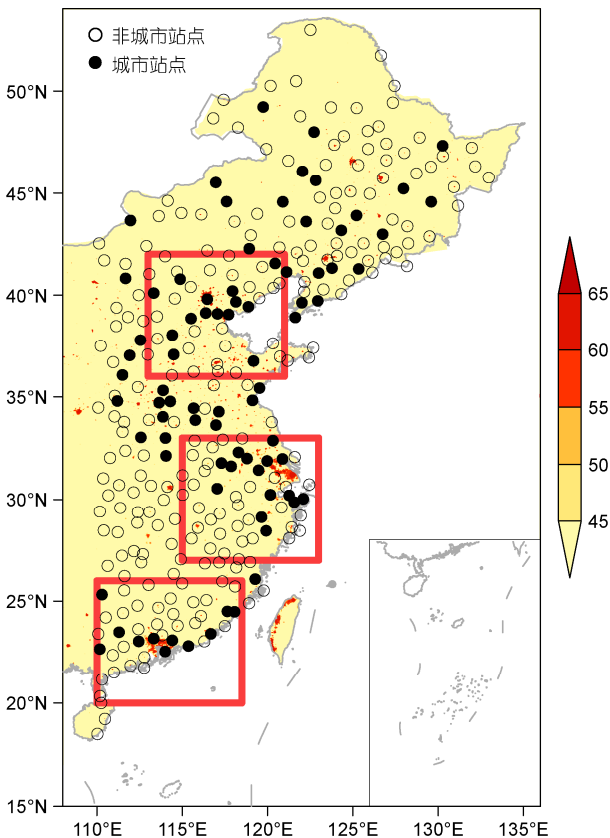


图 1 2008 年夜间灯光图像(阴影区)及站点分布
红线框区表示 3 个代表性区域, 分别包括京津冀、长三角和珠三角 3 个城市群

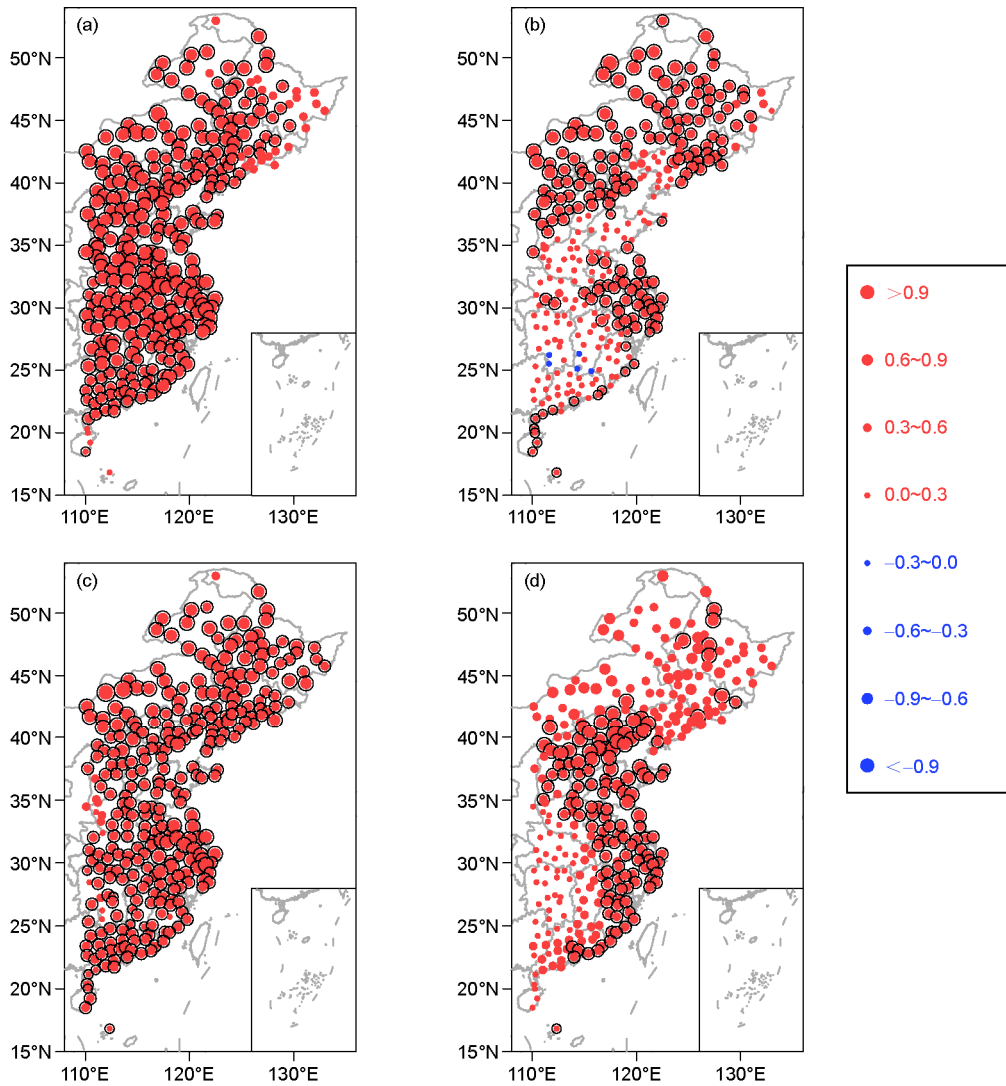


图2 1979~2008年季节平均地面气温变化趋势的空间分布(单位: $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)
 (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季. 实心圆圈表示数值大小, 空心圆圈表示通过95%信度检验的站点

表2 1979~2008年温度变化趋势的区域平均值(单位: $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^{a)}

	年平均	春季	夏季	秋季	冬季
全部站点	0.500	0.644	0.324	0.519	0.492
城市站	0.542	0.696	0.355	0.551	0.547
非城市站	0.485	0.625	0.313	0.508	0.472
城市化效应	0.057**	0.071**	0.042	0.043*	0.075**

a) *表示通过了0.05显著性水平检验,**表示通过了0.01显著性水平检验

均匀特征,因而主要对这两个季节的增温趋势进行空间滤波分析(图3). 总体而言,尽管滤波后的数值会随着窗区范围的增大而增大,但整体的空间型基本保持一致. 在夏季(图3(a)),增温主要集中在长三

角和内蒙古中东部地区;在冬季(图3(b)),增温主要集中在京津冀地区. 内蒙古中东部的增暖可能与近些年的土地荒漠化有关^[35],而长三角和京津冀的增暖可能由这些地区持续的城市化进程所导致. 不同

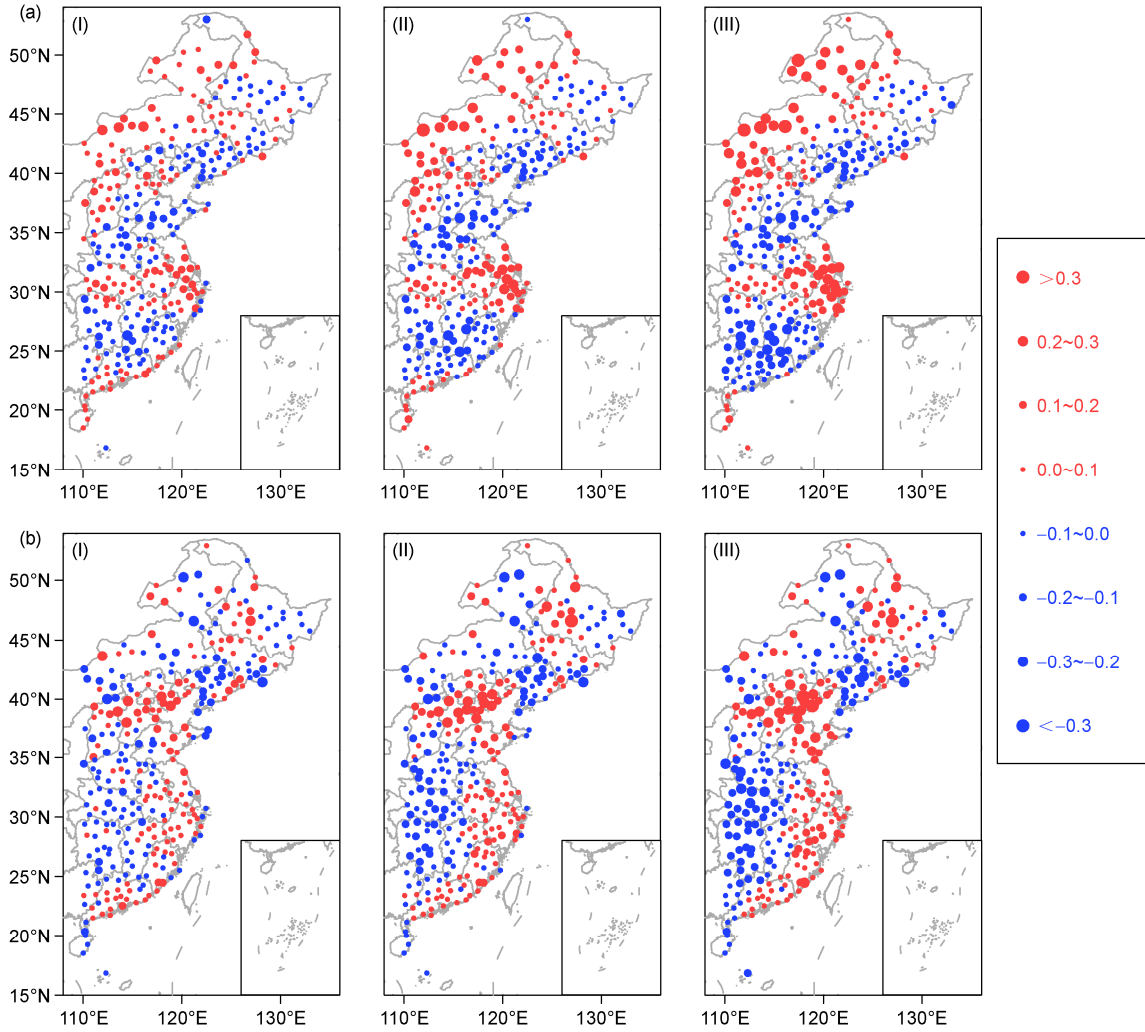


图3 季节平均气温变化趋势相对于不同尺度窗区的滑动空间距平分布(单位: $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)
 (a) 夏季; (b) 冬季. (I)~(III)分别表示相对于 $8^{\circ}\times 8^{\circ}$, $12^{\circ}\times 12^{\circ}$ 和 $16^{\circ}\times 16^{\circ}$ 窗区的滑动空间距平

城市群增暖效应的季节差异与 Du 等人^[20]和 Ren 等人^[15]的研究结果有较好的一致性.

图4和5反映了最高、最低气温变化趋势在不同季节的空间非均匀分布. 可见, 长三角地区夏季的增暖主要是由夏季最高气温的增加所导致(图4(a)), 而京津冀地区冬季的增暖主要归因于冬季最低气温的增加(图5(b)). 城市化增温的时空差异可能与人为热排放的变化有关^[55]. 研究表明, 长三角地区的人为热主要来源于夏季的空调制冷, 并且在白天强于夜间, 进而引起夏季最高气温的上升^[56,57]. 相反, 京津冀地区的人为热主要来源于冬季的统一供暖, 供暖效应在夜间强于白天, 从而使得冬季最低气温升高^[58-60]. 此外, 华北东部及东南沿海的冬季最高气

温也有明显的增暖(图4(b)), 其原因有待进一步分析.

3.3 城市增温率和增温贡献率

分别统计了三大城市群相对于不同尺度窗口的城市增温率, 表3列出了各城市群在不同季节中城市增温率的最大值及其所对应的季节. 可见, 随着窗区范围的增大, 城市增温率的最大值也相应增大, 但其所对应的季节基本保持一致. 具体而言, 京津冀地区的城市增温主要对冬季最低气温产生影响, 增温率约为 $0.102\sim 0.214\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 长三角地区的城市化主要影响夏季最高气温的增暖, 增温率约为 $0.132\sim 0.250\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 珠三角地区的城市化主要对冬季最高气温的增暖产生影响, 增温率约为 $0.076\sim 0.125\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$. 城市群的增

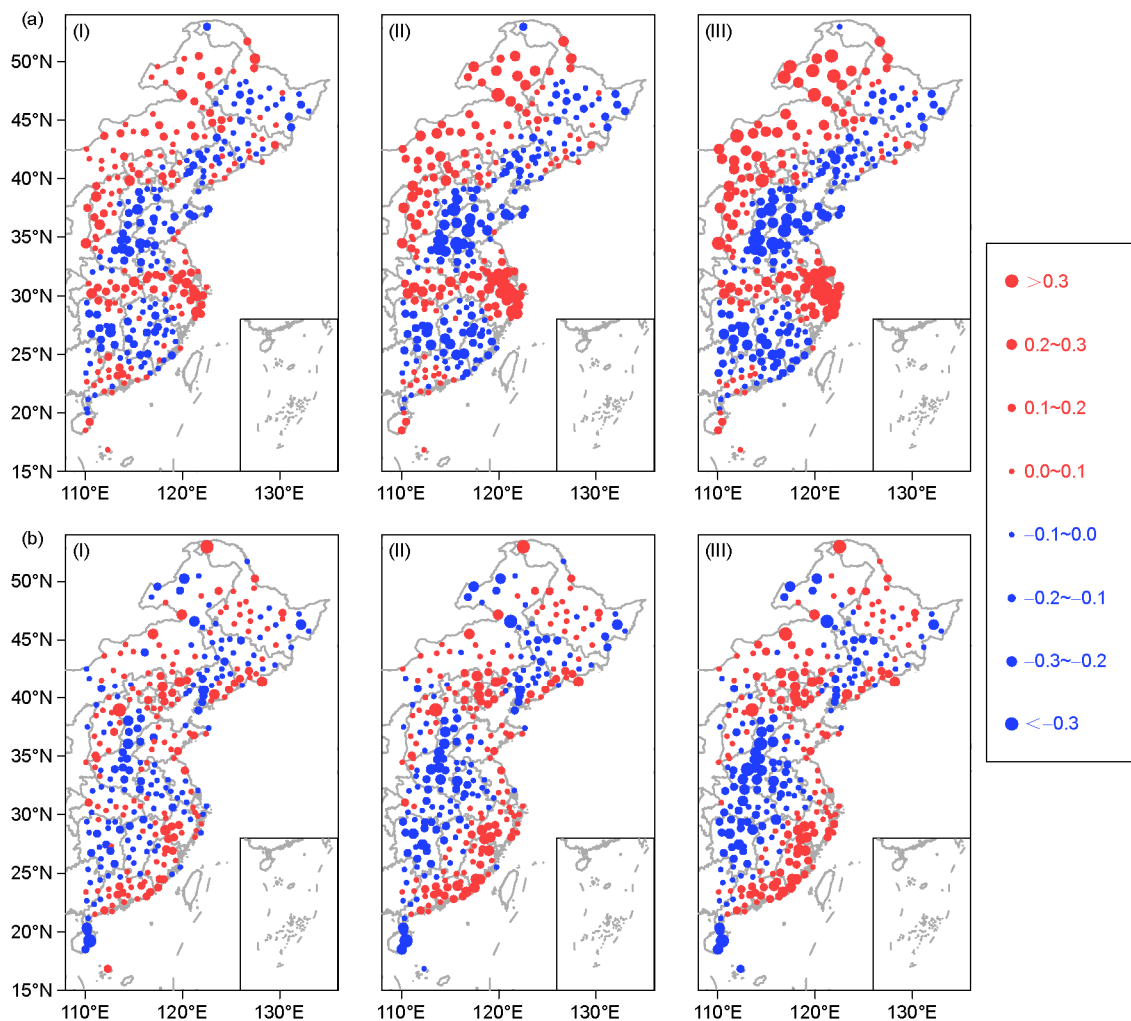


图4 同图3, 但为季节平均的最高气温

温效应由强到弱依次为长三角地区、京津冀地区和珠三角地区。

表4反映了城市群对区域增温的贡献率。京津冀城市群对华北冬季最低气温的增暖贡献率为12%~24%；长三角城市群对华东夏季最高气温的增温贡献率为36%~68%；珠三角城市群对华南冬季最高气温的增暖贡献率为20%~32%。城市群对区域增温的贡献率由强到弱依次为长三角地区、珠三角地区和京津冀地区。由此看来，中国东部的城市化进程确实能够对区域气候的变化产生显著影响，尤其是在高速发展的长三角地区，这与Yang等人^[22]的分析结果也有较好的对应。

4 结论与讨论

对1979~2008年中国东部地面气温变化趋势的

空间非均匀性及其与城市化的可能联系进行了分析，得到以下结论：

(1) 中国东部近30年的地面气温存在着明显的增暖信号，年平均增温率为0.5 /10 a。与此同时，增暖信号还存在着季节性差异，具体表现为春季最强，秋季和冬季次之，夏季最弱。在夏季和冬季，东部地区的增暖呈现明显的空间非均匀特征。

(2) 相对于整个东部而言，由城市化引起的年平均气温增温率为0.057 /10 a，增温贡献率为11.4%。此外，城市化效应存在着明显的季节变化，其中冬、春季较强，秋、夏季较弱。

(3) 利用空间滤波方法对温度变化趋势进行分析，发现夏季的增暖中心主要集中在内蒙古中东部和长三角地区，冬季的增暖中心主要位于京津冀地区。其中长三角地区夏季的增温主要是由夏季最高

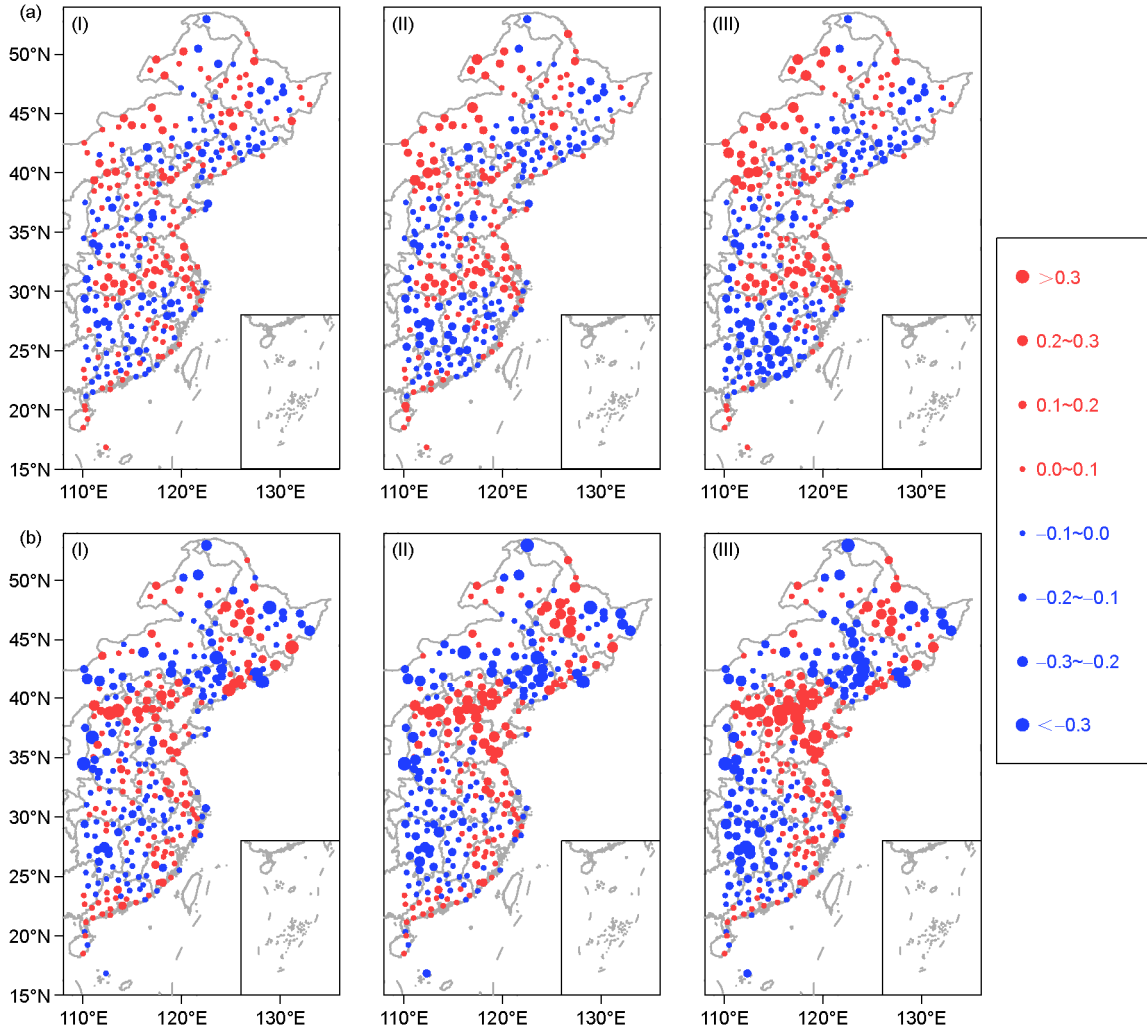


图 5 同图 3, 但为季节平均的最低气温

表 3 各季节城市增温率的最大值(单位: /10 a)及其所对应的季节

	8°×8°	12°×12°	16°×16°
京津冀	0.102 (冬季最低气温)	0.165 (冬季最低气温)	0.214 (冬季最低气温)
长三角	0.132 (夏季最高气温)	0.220 (夏季最高气温)	0.250 (夏季最高气温)
珠三角	0.076 (冬季最高气温)	0.106 (冬季最高气温)	0.125 (冬季最高气温)

表 4 城市增温贡献率(%)及其所对应的季节

	8°×8°	12°×12°	16°×16°
京津冀	12 (冬季最低气温)	19 (冬季最低气温)	24 (冬季最低气温)
长三角	36 (夏季最高气温)	60 (夏季最高气温)	68 (夏季最高气温)
珠三角	20 (冬季最高气温)	28 (冬季最高气温)	32 (冬季最高气温)

气温的增加所导致, 而京津冀地区冬季的增温主要是由冬季最低气温的增加所贡献。

(4) 京津冀地区的城市发展主要影响冬季最低

气温的增暖, 增温率为 0.102~0.214 /10 a; 长三角地区的城市发展主要对夏季最高气温的增暖产生作用, 增温率为 0.132~0.250 /10 a; 珠三角地区的城

城市化进程主要影响冬季最高气温的增暖,增温率为 0.076~0.125 /10 a.

(5) 通过分析城市群的增温贡献率,发现京津冀城市群对华北冬季最低气温的增温贡献率为 12%~24%;长三角城市群对华东夏季最高气温的增温贡献率约为 36%~68%;珠三角城市群对华南冬季最高气温的增温贡献率为 20%~32%.

选用经过均一化订正的地面气温观测资料,在验证该资料能够有效的检测站点迁移等非均一性因素后(图略),再利用其对中国东部的温度变化进行分析. 尽管对均一性调整的方法还存在一些争议,但经过订正后的观测资料能够更加客观地反映温度变化的特征. 此外, Peterson^[19]认为,地面气温变化中由城市化引起的增温主要是因为资料的非均一性所导致,本文的研究证实了均一化调整后的资料中仍然存在着显著的城市增暖信号.

虽然滤波处理能够反映不同尺度下温度变化的

空间非均匀性,但能否将这种空间上的非均匀分布完全归因于土地利用的变化,对此还有待进一步讨论. 与此同时,窗口范围的变化也会对滤波结果产生影响,选择何种尺度的窗口才能更加客观地描述城市化和土地利用变化的作用,还需要进行深入的研究. 本文分别选取了 3 个窗区进行滤波分析,尽管其结果在数值上有一定的差异,但其空间分布基本保持一致,这也说明了空间滤波方法能够在一定程度上反映城市化和土地利用变化对区域气温增暖的作用.

尽管城市化效应对整个东部的增温没有显著贡献,但其对区域尺度的增暖还是有很大影响. 因此,对城市进行合理的规划和建设能够有效地减缓区域气候的变化. 此外,城市群的增温效应还存在着明显的时空差异,这可能与气候背景及人为热排放的变化有关,其原因和机制有待今后进行更加深入的探索和分析.

致谢 在数据收集和文章撰写过程中,得到了中国科学院大气物理研究所严中伟研究员、李珍博士,南京大学大气科学学院汤剑平副教授、马新野博士和汪天一博士的帮助和支持,在此一并表示衷心的感谢.

参考文献

- 1 Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC AR4 Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 2 Pielke R A. Land use and climate change. *Science*, 2005, 310: 1625–1626
- 3 Jiang D B, Zhang Y, Lang X M. Vegetation feedback under future global warming. *Theor Appl Climatol*, 2011, 106: 211–227
- 4 李欣, 杨修群, 汤剑平, 等. WRF/NCAR 模拟的夏季长三角城市群区域多城市热岛和地表能量平衡. *气象科学*, 2011, 31: 441–450
- 5 Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528–531
- 6 Wang W C, Zeng Z, Karl T R. Urban heat islands in China. *Geophys Res Lett*, 1990, 17: 2377–2380
- 7 Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, 1990, 347: 169–172
- 8 赵宗慈. 近 39 年中国气温变化与城市化影响. *气象*, 1991, 17: 14–17
- 9 Portman D A. Identifying and correcting urban bias in regional time series: Surface temperature in China's northern plains. *J Clim*, 1993, 6: 2298–2308
- 10 周淑贞, 束炯. 城市气候学. 北京: 气象出版社, 1994. 244–339
- 11 Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 1997, 277: 364–367
- 12 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. *气候与环境研究*, 2005, 10: 743–753
- 13 方锋, 白虎志, 赵红岩, 等. 中国西北地区城市化效应及其在增暖中的贡献率. *高原气象*, 2007, 26: 579–585
- 14 Ren G Y, Chu Z Y, Chen Z H, et al. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L05711
- 15 Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. *J Clim*, 2008, 21: 1333–1348
- 16 Hua L J, Ma Z G, Guo W D. The impact of urbanization on air temperature across China. *Theor Appl Climatol*, 2008, 93: 179–194
- 17 唐国利, 任国玉, 周江兴. 西南地区城市热岛强度变化对地面气温序列影响. *应用气象学报*, 2008, 17: 722–730
- 18 Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. A closer look at United States and global surface temperature change. *J Geophys Res*, 2001, 106: 23947–23963

- 19 Peterson T C. Assessment of urban versus rural *in situ* surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *J Clim*, 2003, 16: 2941–2959
- 20 Du Y, Xie Z Q, Zeng Y, et al. Impact of urban expansion on regional temperature change in the Yangtze River Delta. *J Geogr Sci*, 2007, 17: 387–398
- 21 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. *Theor Appl Climatol*, 2007, 90: 217–226
- 22 Yang X C, Hou Y L, Chen B D. Observed surface warming induced by urbanization in east China. *J Geophys Res*, 2011, 116: D14113
- 23 王芳, 葛全胜. 根据卫星观测的城市用地变化估算中国 1980~2009 年城市热岛效应. *科学通报*, 2012, 57: 951–958
- 24 初子莹, 任国玉. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响. *气象学报*, 2005, 63: 534–540
- 25 Kim M K, Kim S. Quantitative estimates of warming by urbanization in South Korea over the past 55 years (1954–2008). *Atmos Environ*, 2011, 45: 5778–5783
- 26 Li Q, Zhang H, Liu X, et al. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China. *Theor Appl Climatol*, 2004, 79: 165–174
- 27 Li Q X, Li W, Si P, et al. Assessment of surface air warming in northeast China, with emphasis on the impacts of urbanization. *Theor Appl Climatol*, 2010, 99: 469–478
- 28 张爱英, 任国玉, 周江兴, 等. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差. *气象学报*, 2010, 68: 957–966
- 29 Zhou L M, Dickinson R E, Tian Y H, et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 9540–9544
- 30 Zhang J Y, Dong W J, Wu L Y, et al. Impact of land use changes on surface warming in China. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22: 343–348
- 31 Lim Y K, Cai M, Kalnay E, et al. Observational evidence of sensitivity of surface climate changes to land types and urbanization. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L2271222
- 32 Nuñez M N, Ciapessoni H H, Rolla A, et al. Impact of land use and precipitation changes on surface temperature trends in Argentina. *J Geophys Res*, 2008, 113: D06111
- 33 杨续超, 张懿铨, 刘林山, 等. 中国地表气温变化对土地利用/覆被类型的敏感性. *中国科学: 地球科学*, 2009, 36: 638–346
- 34 Fall S, Niyogi D, Gluhovsky A, et al. Impacts of land use land cover on temperature trends over the continental United States: Assessment using the North American Regional Reanalysis. *Int J Climatol*, 2010, 30: 1980–1993
- 35 Hu Y C, Dong W J, He Y. Impact of land surface forcings on mean and extreme temperature in eastern China. *J Geophys Res*, 2010, 115: D19117
- 36 孙敏, 汤剑平, 许春艳. 中国东部地区城市化及土地利用改变对区域温度的影响. *南京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47: 679–691
- 37 Trenberth K E. Climatology (communication arising): Rural land-use change and climate. *Nature*, 2004, 427: 213
- 38 Vose R S, Karl T R, Easterling D R, et al. Climate (communication arising): Impact of land-use change on climate. *Nature*, 2004, 427: 213–214
- 39 张璐, 杨修群, 汤剑平, 等. 夏季长三角城市群热岛效应及其对大气边界层结构影响的数值模拟. *气象科学*, 2011, 31: 431–440
- 40 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化. *气象*, 1994, 20: 19–26
- 41 Li Q X, Liu X N, Zhang H Z, et al. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 260–268
- 42 Li Q X, Dong W J. Detection and adjustment of undocumented discontinuities in Chinese temperature series using a composite approach. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26: 143–153
- 43 Li Z, Yan Z W. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960–2008. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2009, 2: 236–242
- 44 Li Z, Yan Z W. Application of multiple analysis of series for homogenization to Beijing daily temperature series (1960–2006). *Adv Atmos Sci*, 2010, 27: 777–787
- 45 吴增祥. 气象台站历史沿革信息及其对观测资料序列均一性影响的初步分析. *应用气象学报*, 2005, 16: 461–467
- 46 李庆祥, 刘小宁, 张洪政, 等. 定点观测气候序列的均一性研究. *气象科技*, 2003, 31: 3–10
- 47 吴利红, 康丽莉, 陈海燕, 等. 地面气象站环境变化对气温序列均一性影响. *气象科技*, 2007, 35: 152–156
- 48 曹丽娟, 严中伟. 地面气候资料均一性研究进展. *气候变化研究进展*, 2011, 7: 129–135
- 49 何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据和统计数据的中国大陆 20 世纪 90 年代城市化空间过程重建研究. *科学通报*, 2006, 51: 856–861
- 50 王鹤饶, 郑新奇, 袁涛. DMSP/OLS 数据应用研究综述. *地理科学进展*, 2012, 31: 11–19
- 51 何春阳, 李景刚, 陈晋, 等. 基于夜间灯光数据的环渤海地区城市化过程. *地理学报*, 2005, 60: 409–417
- 52 舒松, 余柏菡, 吴健平, 等. 基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用. *遥感技术与应用*, 2011, 26: 169–176

- 53 徐梦洁, 陈黎, 刘焕金, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的长江三角洲地区城市化格局与过程研究. 国土资源遥感, 2011, 3: 106-112
- 54 Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, et al. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress. Adv Atmos Sci, 2007, 24: 954-971
- 55 陈兵, 石广玉, 戴铁, 等. 中国区域人为热释放的气候强迫. 气候与环境研究, 2011, 16: 717-722
- 56 张弛, 束炯, 陈姗姗. 城市人为热排放分类研究及其对气温的影响. 长江流域资源与环境, 2011, 20: 232-238
- 57 张艳, 鲍文杰, 余琦, 等. 超大城市热岛效应的季节变化特征及其年际差异. 地球物理学报, 2012, 55: 1121-1128
- 58 华丽娟. 中国区域温度较差变化以及城市化增暖效应分析. 博士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2004. 22-43
- 59 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. 地球物理学报, 2006, 49: 69-77
- 60 张佳华, 孟倩文, 李欣. 北京城区城市热岛的多时空尺度变化. 地理科学, 2011, 31: 1349-1354