

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

王芳, 葛全胜*

中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

* 联系人, E-mail: cncigbp@igsrr.ac.cn, geqs@igsrr.ac.cn

2011-12-09 收稿, 2012-01-11 接受

国家自然科学基金(41101083)资助

摘要 1980~2009 年是中国城市化发展的显著时期, 也是气温上升剧烈的时期. 本文基于卫星观测的城市土地利用数据, 分析了 1980~2009 年中国城市化对地表观测气温的影响. 城市用地指标采用 1980~2005 年的城市用地扩张量(ΔU), 根据该指标将全国气象站点分为 3 类: (C1) 站点周围城市化剧烈; (C2) 站点周围城市化较明显; (C3) 站点周围城市化微弱. 结果表明 C1 类城市以中国的直辖市和省会城市为主, C2 类城市以地级市为主, C3 类城市以县城为主. 鉴于 C3 类城市的 ΔU 很小, 因此认为其温度可能受城市用地变化的影响不显著. 如果三类城市受全球变暖的影响类似, 则 C1 类或 C2 类城市的增温减去 C3 类城市的增温就可能在较大程度上去除全球变暖的影响, 而突出城市化对局地温度的贡献. 结果表明, C1 类城市化对局地温度的影响为 $0.258^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 占总增温幅度的 41%; C2 类对局地温度的影响为 $0.099^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 占总增温幅度的 21%. 在全国尺度上, 城市用地变化的影响为 $0.27^{\circ}\text{C}/30\text{ a}$ 或 $0.09^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 占总增温幅度的 20%, 且冬季高于夏季. 由于 C3 类城市可能并非完全不受城市化影响, 因此, 这里计算得到的可能是城市化影响的最低值, 实际影响可能略高于该值. 此外, 土地利用变化只是研究城市热岛效应的一个途径, 但是这个指标比人口数量、夜晚光亮度等指标更直接地反映了地理环境的变化.

关键词

城市化
土地利用变化
热岛效应

城市热岛效应是影响气候变化的一个重要因素, 它是目前气候变化研究关注的重点问题之一. 研究城市热岛效应有两个目的: 一是评估热岛效应对地表观测气温的影响, 特别是对近百年气温升高的贡献; 二是有助于判断除热岛效应外的温室效应对地表增温的贡献. 自 20 世纪以来, 全球大部分陆地区域发生了明显城市化, 影响到能量收支, 导致城市地表气温不断升高, 而在此期间气象站点的观测记录必然受到城市化的影响. 城市用地扩张是城市化的典型特征, 它直接反映了城市地表环境的变化, 因此, 开展城市用地扩张与气温变化关系的研究, 将有利于重新认识和评估城市热岛效应.

目前, 针对城市热岛效应对气候变化的影响已开展了大量研究. 文献[1~4]利用城市和乡村温度对比方法分析了热岛效应的影响(方法 1), 该方法适于评估个别城市热岛对局地温度的影响. 文献[5~14]利用城市发展指标计算热岛影响(方法 2), 如人口数量、夜晚光亮度、植被指数等, 该方法优点是指标的空间覆盖面广, 缺点是其时间覆盖度有限^[15]. 文献[16]利用海陆温度变化差异分析了城市热岛效应(方法 3), 但是这种差异可能并不完全归因于热岛效应^[17~19]. 文献[20~22]利用大气再分析法分析热岛效应的影响(方法 4), 该方法可能存在数据源非均一化、模式不确定性等问题^[16,23~26]. 文献[27,28]通过分析

有风和无风夜晚时温度差异来评估热岛效应(方法5). 关于中国的热岛效应影响, 也开展了许多研究(表1), 如文献[29~36]采用方法2的人口指标评估了中国或区域的热岛效应, 但它们对于参考站的人口标准界定有较大差异. 文献[37,38]采用方法2的夜光指标分析了中国东部的热岛效应. 文献[16]利用方法3分析了中国东部的热岛效应. 文献[20,37,39,40]使用方法4评估了中国东部的热岛效应, 但是该方法因受海拔高度的限制, 不适于中国较大尺度的热岛效应评估. 以上不同研究的结果之间存在较大差异, 关于热岛效应对增温的贡献大小仍存在较大争议.

本文将采用与以上研究不同的方法评估中国1980年以来的城市化影响, 鉴于城市土地利用扩张是城市化的典型特征之一, 因此本文引入城市用地指标作为城市化指标, 该指标比人口、夜光等指标更直接地反映了城市地理环境的变化. 为了评估站点周围城市化对其温度的影响, 城市用地信息采集自站点周围. 城市用地数据来自卫星观测, 且分辨率较高. 为了与温度变量保持一致, 城市用地指标也采用多年变量.

1 数据

(i) 气温数据. 来自中国气象局, 采用“中国地面气候资料月值数据集”, 温度采用月均温. 站点选取中国国家气候中心对外发布的160个国家基准气候站, 因为160站与其他站点相比具有一些优势, 如能代表本气候区的气候特征、站点观测时间长、时间连续性好等, 且该序列是几十年来在中国气候预测及分析中一直沿用的序列^[41~50]. 资料时段选取1980~2009年, 这是参照国际气候变率研究的惯例(最低30年尺度), 同时这30年可能是研究城市化效应的最佳时段, 因为首先, 这段时间中国的工业迅速发展, 国内生产总值(GDP)从1980年的 2×10^{11} 美元上升到2009年的 4.3×10^{12} 美元(数据来自中国统计局网站). 在这种形势下, 城市化十分激烈. 如果城市热岛对中国气候产生影响的话, 这应该是影响最显著的时期. 其次, 观测气温表明, 这30年也是中国有观测记录的100年以来升温最强烈的时期, 究竟该变暖中有多少是因城市化导致则是非常重要的问题.

表1 中国城市热岛效应研究的相关文献

时段	研究区域	城市化影响(°C/10 a)	分析方法	参考文献
1954~1983	全国	0.08	人口指标, 参考站界定标准 Pop ₁₉₈₅ <14.7万	Wang 等人 ^[29]
1954~1983	东部	<0.05	人口指标, 参考站界定标准 Pop ₁₉₈₄ <10万	Jones 等人 ^[30]
1954~1983	北方	0.09, 大城市 0.05, 小城市	人口指标, 参考站界定标准 Pop ₁₉₈₂ <0.1万/km ²	Portman ^[31]
1951~2001	全国	<0.01	人口指标, 参考站界定标准 Pop<5万, 或 Pop=5~50万且位于郊区或乡村	Li 等人 ^[32]
1954~2005	东北部	0.027	同上	Li 等人 ^[33]
1961~2000	全国	0.05, 大城市 0.030, 中小城市	人口指标, 参考站界定标准 Pop ₂₀₀₀ <10万	Hua 等人 ^[34]
1961~2000	北方	0.11	人口指标, 参考站界定标准 Pop ₂₀₀₂ ≤5万	Ren 等人 ^[35]
1961~2004	西南	0.086, 大中城市 0.016, 小城市 0.052, 区域	人口指标, 参考站界定标准 Pop ₂₀₀₂ <3~4万	唐国利等人 ^[36]
1961~2005	长江流域	0.069	夜光指标	Du 等人 ^[38]
1981~2007	东部	0.398 ₁ , 0.285 ₂ , 特大城市 0.26 ₁ , 0.207 ₂ , 大城市 0.214 ₁ , 0.135 ₂ , 中等城市 0.167 ₁ , 0.077 ₂ , 小城市	1, 大气再分析方法; 2, 夜光和人口指标	Yang 等人 ^[37]
1981~2004	东部	0.1	海陆对比方法	Jones 等人 ^[16]
1979~1998	东南部	0.05	大气再分析方法	Zhou 等人 ^[20]
1960~1999	110°E 以东	0.12	大气再分析方法	Zhang 等人 ^[39]
1960~1999	中国	0.14	大气再分析方法	杨续超等人 ^[40]

图 1 给出 1880 年以来中国的平均温度曲线^[51], 它是将中国划分为 10 个区, 涵盖中国大部分的领土(包括新疆、西藏、台湾的所有陆地面积), 是覆盖面最完整的序列. 图 1 中 1980 年处用虚线标出, 因为这之后的 30 年温度虽然有 5~7 a 的上下摆动, 但是其上升趋势是 1880 年以来最明显的.

经统计, 温度缺测值(所有站点)占总记录的 1.4%, 其中, 对于存在连续 5 年以上缺测的站点($n = 11$), 则被剔除; 对于个别年份缺失记录(占有记录的 0.4%), 则采用线性内插法补值. 由于中国地域东西约跨 60 个经度、南北约跨 40 个纬度, 地形条件较复杂, 为剔除局部小气候影响, 本文先对各台站资料进行距平化处理, 气温标准值取 1971~2000 年的平均.

(ii) 土地利用数据. 来自卫星(MSS/TM/ETM)观测, 分辨率 20 m, 遥感影像经人工判读, 最终数据来自中国科学院的“中国地球系统科学数据共享平台”, 最终分辨率 100 m, 采用“全国 1:10 万土地利用数据库”, 数据更新频率为每 5 年, 资料时段选取 1980~2005 年. 城市用地类型包括大、中、小城市及县镇以上建成区用地, 以及其他建设用地(厂矿、大型工业区、油田、盐场、采石场等用地以及交通道路、机场及特殊用地). 图 2(a)显示的 1980 年以来中国城市用地变化状况, 属于遥感影像解译图, 基本单位是像元, 每个像元大小为 100 m × 100 m, 若像元密度越大, 则表示城市用地增加越多. 由图可见, 中国城市用地总体上存在显著的增加趋势, 且东部沿海区域最为明显.

2 土地利用指数的选择

在热岛效应分析中常用的城市化指标包括人口数量、夜晚光亮度 and 植被指数, 其中可以用于划分城市和乡村界限的指标是人口数量和夜晚光亮度,

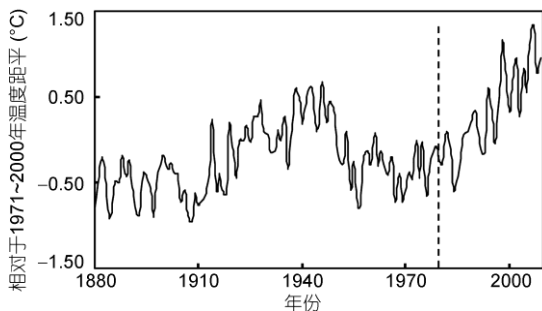


图 1 1880~2009 年中国年平均气温变化

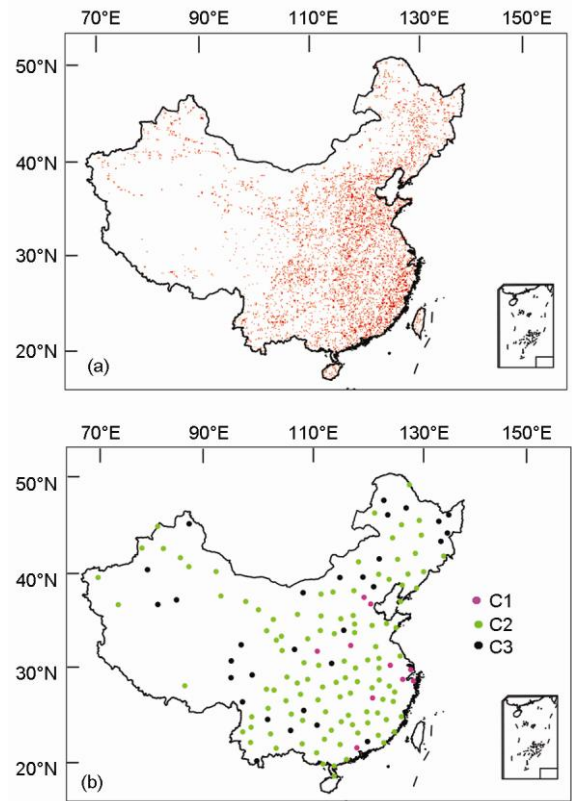


图 2 中国城市土地利用变化(a)和站点分布图(b)

(a) 卫星观测的 1980~2005 年城市用地增加状况, 基本单位是红色像元, 每个像元大小为 100 m × 100 m, 若像元密度越大, 则表示城市用地增加越多. (b) C1, 站点周围城市化剧烈; C2, 站点周围城市化较明显; C3, 站点周围城市化微弱

这两个指标都是间接反映城市环境变化. 本文选择了城市用地指标作为城市化指标, 且该指标数据的空间分辨率高和覆盖面广. 因站点温度仅能代表其周围一定范围, 为了更好地反映站点周围环境对其温度的影响, 本文的用地信息采集自站点方圆一定距离, 而非整个城市的用地信息. 本文将分析站点周围多种距离用地变化的影响, 基于用地变化与温度变化的最佳相关关系确定站点周围的研究范围.

关于站点周围距离的选取, 本文以每个站点为中心, 其方圆 50 km 内选择每隔半径 5 km 计算一次城市用地变化(ΔU)与温度变化(ΔT)的相关性(1, 5, 10, ..., 50 km)(图 3), 结果显示二者相关度最高的区域位于半径 10~20 km 之间, 在该范围两侧相关性逐渐减弱. 在 10~20 km 区间内, 再以半径 1 km 为间隔(10, 11, 12, ..., 20 km), 确定二者相关度最高的区域. 由图可知, 二者相关度在半径 16 km 处达到峰值, 满

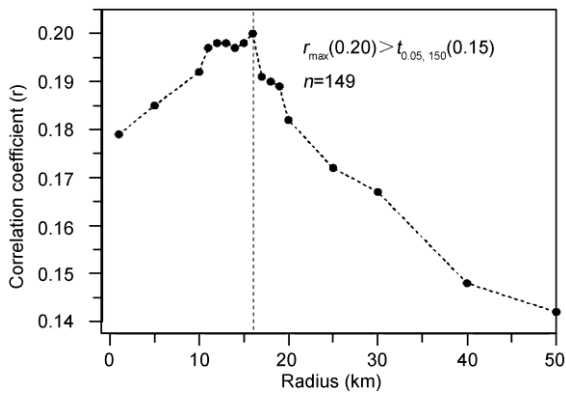


图3 站点周围不同距离的城市用地变化与温度变化的相关性

足 95% 的显著性水平 ($r(0.20) > t_{0.05, 150}(0.15)$). 因此, 本文选择站点周围 16 km 内 ΔU 数据分析其对气温变化的影响.

分析显示, 95% 的站点其周围区域存在明显的城市用地扩张状况, 因此难以从全国站点中选择一定数量的无城市化影响的参考站. 为了能计算城市站的热岛效应影响, 我们只能选择周围区域城市用地扩张微弱的站点作为参考站. 本文选择 $\Delta U < 100$ ha 的站点作为参考站(C3), 因为这些站点的 ΔU 值相对于全国其他站点的 ΔU 值较小, C3 站点数量约占总站点数量的 1/5, 可以作为其他站点的参考站. 将 $\Delta U > 10000$ ha 的站点作为城市化剧烈的站点(C1), 将介于 C1 和 C3 之间 ($\Delta U = 100 \sim 10000$ ha) 的站点作为城市化较明显的站点(C2). 对站点分类的主要目的是根据城市用地变化的强烈程度来判断不同程度的用地变化对温度变化的影响是否一致. 各类站点的地理分布见图 2(b), 其中 C1 类站点 10 个, 主要位于我国东部地区; C2 类站点 110 个, 在全国分布较均匀; C3 类站点 29 个. 分析显示, C1 类站点所位于的城市都是我国城市化发展迅速的特大城市, 以直辖市和省会城市为主 (90%); C2 类站点所位于的城市以地级市为主 (65%); C3 类站点所位于的城市以县城为主 (76%). 采用单因素方差分析法和最小显著差法 (LSD) 对 3 类, 站点的温度变化差异进行显著性检验 (表 2) $F=7.503, P=$

0.001, 因此各类站点之间的温度变化差异是显著的.

在分析城市化影响时, 假设大尺度全球变暖对中国各类城市气候的影响基本相同 (剔除城市化效应外). 鉴于 C3 类站点的 ΔU 较小, 我们假定 C3 站点的温度受城市化影响可忽略不计, 则以它们为基准, 其他城市站点对于 C3 的相对变暖幅度可大体代表城市化的影响. 在这里需要解释一下, 现实中 C3 类站点的温度可能仍会受城市化影响, 因此, 本文得到的 C1 和 C2 的影响值偏低, 而真正的影响可能等于或略高于该值.

3 结果

3.1 未剔除城市化影响的温度趋势

图 4(a) 表示全国 3 类站点在 1980~2009 年年均温的变化情况. 由图可知, 尽管各类站点的温度变化存在 5~7 a 的波动, 但是总体保持上升趋势. 表 2 给出了各类站点的平均增温速率, 经过单因素方差分析法表明它们之间存在显著差异 ($F=7.503, P=0.001$). 各类站点的平均增温速率与其 ΔU 正相关, 即 $C1 > C2 > C3$, 也就是直辖市和省会城市 $>$ 其他地级市 $>$ 县城, 增温速率分别为: C1, $0.629^\circ\text{C}/10$ a; C2, $0.470^\circ\text{C}/10$ a; C3, $0.371^\circ\text{C}/10$ a; 且在 99% 的置信水平上均显著 (C1, $t = 9.77 (P = 0.000)$; C2, $t = 7.712 (P = 0.000)$; C3, $t = 6.163 (P = 0.000)$).

在季节尺度上 (表 3 和图 4(b)~(e)), 3 类站点的增温趋势经过 t 检验均达到 95% 的置信水平. 在每个季节, 3 类站点的增温幅度均表现为 $C1 > C2 > C3$. 经过单因素方差分析法显示 3 类站点之间增温差异的显著性水平在春季和冬季高于夏季和秋季 (春季: $F=7.975, P=0.001$; 冬季: $F=3.228, P=0.043$; 夏季: $F=2.655, P=0.074$; 秋季: $F=2.166, P=0.118$).

3.2 城市化对气候变暖的影响

根据前面所述的热岛效应计算方法, 计算了局地 and 全国尺度的热岛效应影响 (表 4). 在局地尺度上, 计算的 C1 类城市用地变化的影响对局地年均温的贡

表 2 对 3 类站点的年均温变化的统计分析^{a)}

类别	站点数量	年均温增幅 ($^\circ\text{C}/10$ a)	自由度	均方差 ($^\circ\text{C}/10$ a)	F	P
C1 ($\Delta U > 10000$ ha)	10	0.629**	组间 2	0.251	7.503	0.001
C2 ($\Delta U = 100 \sim 10000$ ha)	110	0.470**	组内 146	0.033		
C3 ($\Delta U < 100$ ha)	29	0.371**	合计 148			

a) ** 表示经过 t 检验达到 99% 显著性水平

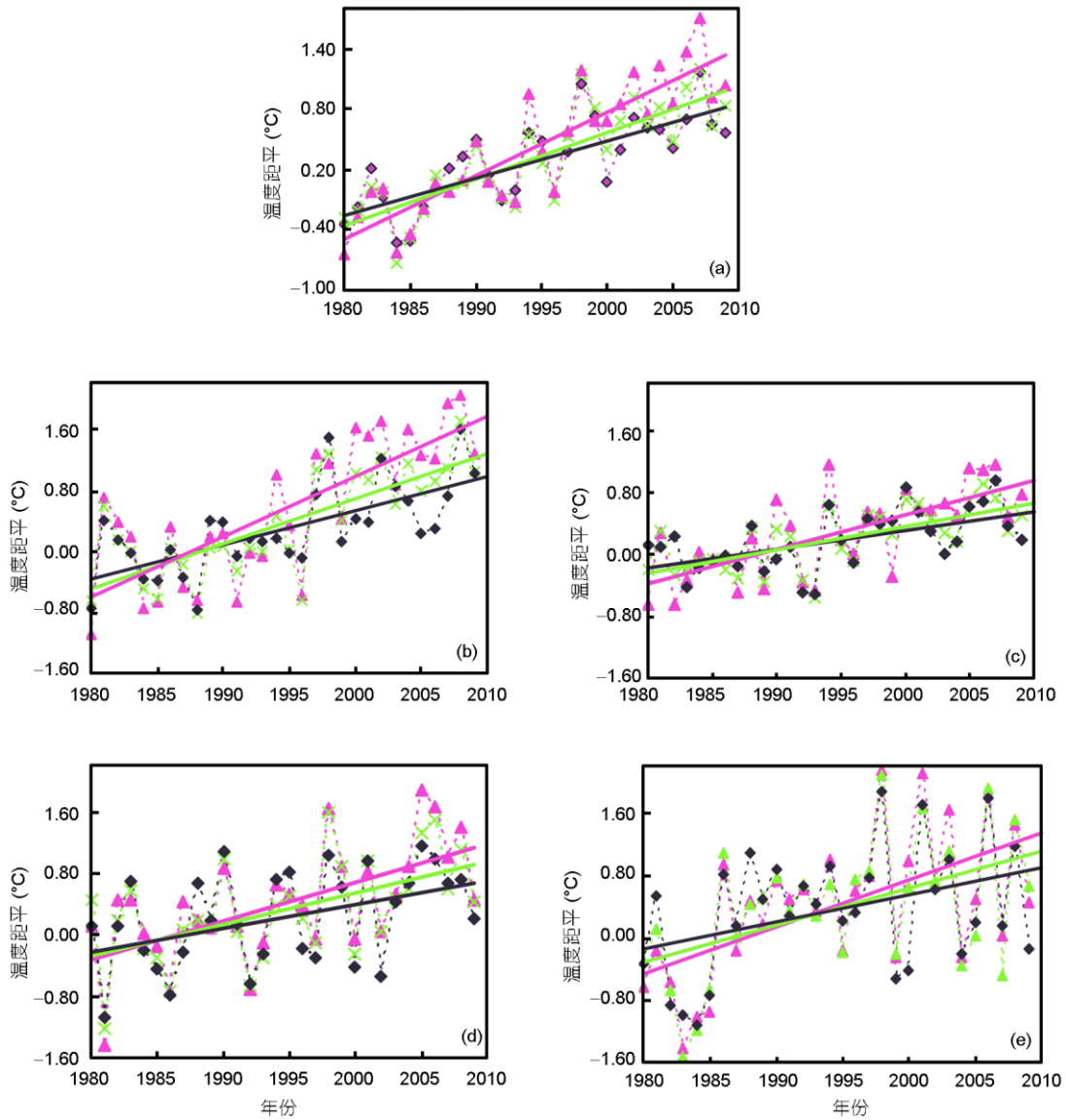


图4 1980~2009年中国城市化扩张与温度变化

(a) 年, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 秋季, (e) 冬季. 红色代表 C1 类, 绿色代表 C2 类, 黑色代表 C3 类. 3 条线分别代表各类站点温度变化的线性拟合趋势

表3 站点季节温度变化趋势(°C/10 a)^{a)}

站点	春季	夏季	秋季	冬季
C1	0.794**	0.440**	0.498**	0.596**
C2	0.591**	0.295**	0.405**	0.477**
C3	0.449**	0.239**	0.307*	0.346**

a) ** 表示经过 *t* 检验达到 99% 显著性水平, * 表示达到 95% 显著性水平

献平均为 0.258°C/10 a, 约占其增温幅度的 41%; C2 类城市用地变化的影响对局地年均温的贡献平均为 0.099°C/10 a, 约占其增温幅度的 21%. 在季节变化

上, 春季和冬季的城市化影响高于夏秋季.

在全国尺度上, 计算得到 1980~2009 年全国城市用地变化对年均温的影响约为 0.09°C/10 a, 约占全国增温幅度(0.46°C/10 a)的 20%. 在季节变化上, 冬春季高于夏秋季, 其中冬季的热岛贡献最高(25%), 夏季的热岛贡献最低(20%).

在剔除城市化影响后全国剩余年均温升高幅度为 1.11°C/30 a 或 0.37°C/10 a(1980~2009 年), 仍高于同期全球增温趋势(0.18°C/10 a^[26]). 在季节尺度上, 在剔除城市化影响后全国春季增温幅度从 0.577°C/10 a

表4 城市用地扩张对温度趋势的影响

站点	年	春季	夏季	秋季	冬季	
全国	城市化影响(°C/10 a)	0.090	0.128	0.058	0.085	0.112
	贡献 (%)	19.5	22.2	19.5	21.7	24.5
C1	城市化影响(°C/10 a)	0.258	0.345	0.201	0.191	0.25
	贡献 (%)	41.0	43.5	45.7	38.4	41.9
C2	城市化影响(°C/10 a)	0.099	0.142	0.056	0.098	0.131
	贡献 (%)	21.1	24.0	19.0	24.2	27.5

到0.448°C/10 a, 冬季增温幅度从0.458~0.346°C/10 a, 秋季增温幅度从0.392~0.307°C/10 a, 夏季增温幅度从0.297~0.239°C/10 a, 春季和冬季的剩余增温幅度仍明显高于秋季和夏季。

4 讨论

在确定参考站时,理想的参考站应是站点周围无城市化扩张的站点,但是在中国绝大部分站点周围区域都有明显的城市化扩张,因此难以为每个城市站找到最理想的参考站,而为了计算中国的热岛效应影响,只能选择城市化微弱的站点(C3)作为参考站,由于C3类城市并非完全不受城市化的影响,因此,本文计算得到的局地在全国尺度的城市化影响值可能是最低值,实际影响可能略高于该值。

在分析热岛对增温的贡献时,地理因素不会产生重要影响。如,海拔高度与温度变化没有显著相关性(图5(b));纬度与温度变化虽呈一定正相关(图5(a))(可能是高纬地区冬季取暖的影响,也可能是温室效应的影响),但是通过分析发现纬度对温度变化的影响显著低于热岛的影响,因为全国C1和C2类城市的增温虽高而纬度却低(C1类: $\Delta T=0.629^\circ\text{C}/10\text{ a}$, $\text{Lat.}=32.3^\circ$, $\sigma=4.9^\circ$; C2类: $\Delta T=0.470^\circ\text{C}/10\text{ a}$, $\text{Lat.}=$

33.5° , $\sigma=7.4^\circ$), C3类城市的增温虽低而纬度却高($\Delta T=0.371^\circ\text{C}/10\text{ a}$, $\text{Lat.}=37.4^\circ$, $\sigma=8.6^\circ$),说明纬度对 ΔT 的影响显著低于热岛影响,也就是说3类站点在全国的地理分布因素不会对其各自的热岛效应评估产生重要影响。

与其他研究相比(表1和4),关于不同规模城市的热岛效应贡献, Hua等人^[34]计算的1961~2000年我国大城市和中小城市的热岛影响值略低于本文的估计值,这是由于Hua等人的研究时期包含了1961~1980年,而这20年的城市化影响远低于后20年(1981~2000年)的值。Yang等人^[37]用夜光和人口指标计算的各类城市的热岛影响值与本文C1和C2的结果接近。关于热岛效应对全国温度趋势的贡献, Jones等人^[16]认为1981~2004年中国东部的城市化影响为 $0.1^\circ\text{C}/10\text{ a}$,与本文结果接近。Wang等人^[29]认为中国1954~1983年城市化影响为 $0.08^\circ\text{C}/10\text{ a}$,略低于本文1980~2009年的估计值。Li等人^[33]认为1951~2001年中国城市化影响低于 $0.01^\circ\text{C}/10\text{ a}$,显著小于其他研究结果,这是由于Li等在计算城市化影响时选择的参考站不同于其他研究, Li等人研究选择非城市站作为基准(参考站),非城市站包括郊区站和农村站,而其他研究未将郊区站列入参考站,因此Li

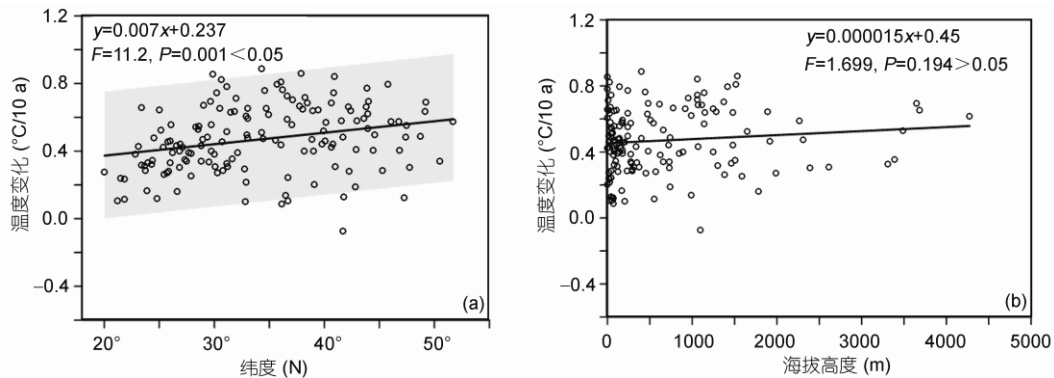


图5 1980~2009年中国各站点温度变化与纬度(a)和海拔高度(b)分布

(a)中灰色区域代表95%的置信区间

等人研究的参考站比例远高于其他研究, 由于郊区站温度也受城市化影响, 所以 Li 等人研究的参考温度偏高, 从而城市化影响值偏低. Jones 等人^[30]研究中国城市化效应的时间是 1954~1983 年, 正处于中国改革开放之前, 城市发展缓慢, 城市化影响小, 且中国气候相对较冷(与相邻时期相比), 该时期热岛效应问题不突出. 同时, 鉴于 1980 年之前缺乏土地卫星数据, 因此本文未选择该时期进行研究.

5 结论

(1) 1980 年以来中国城市土地利用变化(城市化)对全国温度变化具有一定影响. 在局地尺度上, C1 类(主要为直辖市和省会城市)城市化对其温度变化的影响最低为 $0.258^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 占总增温幅度的 41%; C2

类(主要为地级市)城市化影响最低为 $0.099^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 占总增温幅度的 21%.

(2) 在全国尺度上, 城市用地变化影响最低为 $0.09^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 对全国气温趋势的贡献约为 20%. 在季节尺度上, 春季和冬季的热岛效应影响高于秋季和夏季. 另外, 本文研究的时间尺度是 30 年(1980~2009 年), 其间中国的城市化最剧烈, 但这 30 年的城市化影响值不能换算到其他时间(如 100 年).

(3) 在剔除城市化影响后全国剩余增温幅度为 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (1980~2009 年), 仍高于同期全球增温趋势($0.18^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$).

(4) 城市土地利用变化只是研究城市热岛效应的一个途径, 但是这个指标比人口数量、夜晚光亮度等指标更直接地反映了地理环境的变化.

致谢 在数据收集和文章撰写过程中, 得到了北京大学王绍武教授、国家气象信息中心李庆祥高级工程师、中国科学院地理科学与资源研究所邓祥征研究员和徐新良副研究员的帮助, 在此一并表示衷心感谢.

参考文献

- Hinkel K M, Nelson F D. Anthropogenic heat island at Barrow, Alaska, during winter: 2001–2005. *J Geophys Res*, 2007, 112: D06118, doi: 10.1029/2006JD007837
- Ziska L H, Bunce J A, Goins E W. Characterization of an urban-rural CO_2 /temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession. *Oecologia*, 2004, 139: 454–458
- Chen L X, Zhu W Q, Zhou X J, et al. Characteristics of the heat island effect in Shanghai and its possible mechanism. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20: 991–1001
- Streutker D R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sens Environ*, 2003, 85: 282–289
- Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. Global surface temperature change. *Rev Geophys*, 2010, 48: RG4004, doi: 10.1029/2010RG000345
- Choi Y, Jung H S, Nam K Y, et al. Adjusting urban bias in the regional mean surface temperature series of South KOREA, 1968–99. *Int J Clim*, 2003, 23: 577–591
- Goodridge J D. Comments on regional simulations of greenhouse warming including natural variability. *Bull Am Meteorol Soc*, 1996, 77: 3–4
- Jones P D, Groisman P Ya, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperatures over land. *Nature*, 1990, 347: 169–172
- Balling R C, Idso S B. Historical temperature trends in the United States and the effect of urban population growth. *J Geophys Res*, 1989, 94: 3359–3363
- Karl T R, Diaz H F, Kukla G. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record. *J Clim*, 1988, 1: 1099–1123
- 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
- Peterson T C, Owen T W. Urban heat island assessment: Metadata are important. *J Clim*, 2005, 18: 2637–2646
- Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *J Geophys Res*, 2001, 106: 20069–20083
- Gallo K P, Owen T K. Satellite-based adjustments for urban heat island temperature bias. *J Appl Meteorol*, 1999, 36: 806–813
- Jones P D, Kelly P M, Goodess C M, et al. The effect of urban warming on the Northern Hemisphere temperature average. *J Clim*, 1989, 2: 285–290
- Jones P D, Lister D H, Li Q. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. *J Geophys Res*, 2008, 113: D16122, doi: 10.1029/2008JD009916

- 17 Compo G P, Sardeshmukh P D. Oceanic influences on recent continental warming. *Clim Dyn*, 2009, 32: 333–342
- 18 Dommenget D. The oceans role in continental climate variability and change. *J Clim*, 2009, 22: 4939–4952
- 19 Folland C K. Assessing bias corrections in historical sea surface temperature using a climate model. *Int J Clim*, 2005, 25: 895–911
- 20 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
- 21 Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528–531
- 22 Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis. *Bull Am Meteorol Soc*, 2000, 82: 247–267
- 23 Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, MA: Cambridge University Press, 2007. 996
- 24 Trenberth K E. Climate (communication arising): Impact of land-use change on climate. *Nature*, 2004, 427: 213
- 25 Parker D E. Urban heat island effects on estimates of observed climate change. *Clim Change*, 2010, 1: 123–133
- 26 Simmons A J, Jones P D, Bechtold C V, et al. Comparison of trends and variability in CRU, ERA-40 and NCEP/NCAR analyses of monthly-mean surface air temperature. *J Geophys Res*, 2004, 109: D24115
- 27 Parker D E. A demonstration that large-scale warming is not urban. *J Clim*, 2006, 19: 2882–2895
- 28 Parker D E. Large-scale warming is not urban. *Nature*, 2004, 432: 290
- 29 Wang W C, Zeng Z, Karl T R. Urban heat islands in China. *Geophys Res Lett*, 1990, 17: 2377–2380
- 30 Jones P D, Groisman P Ya, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperatures over land. *Nature*, 1990, 347: 169–172
- 31 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
- 32 Li Q, 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
- 33 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
- 34 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
- 35 Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. Urbanization effect on observed surface air temperature trend in North China. *J Clim*, 2008, 21: 1333–1348
- 36 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
- 37 Yang X C, Hou Y L, Chen B D. Observed surface warming induced by urbanization in east China. *J Geophys Res*, 2011, 116: D14113
- 38 Du Y, Xie Z, Zeng Y, et al. Impact of urban expansion on regional temperature change in the Yangtze River Delta. *J Geogr Sci*, 2007, 17: 387–398
- 39 Zhang J, Dong W, Wu L, et al. Impact of land use changes on surface warming in China. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22: 343–348
- 40 杨续超, 张懿锂, 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 D辑: 地球科学*, 2009, 39: 638–646
- 41 Wang S W, Gong D Y. Enhancement of the warming trend in China. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 2581–2584
- 42 Wang S W, Gong D Y, Zhu J H. Twentieth-century climatic warming in China in the context of the Holocene. *Holocene*, 2001, 11: 313–321
- 43 Sun J Q, Wang H J, Yuan W. Decadal variations of the relationship between the summer North Atlantic Oscillation and middle East Asian air temperature. *J Geophys Res*, 2008, 113: D15107, doi: 10.1029/2007JD009626
- 44 Yuan Q H, Lu A G, Zhang Z L, et al. Seasonal variation in the regional structure of warming across China in the past half century. *Clim Change*, 2005, 28: 213–219
- 45 Zhou B T, Wang H J. Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River Valley. *J Geophys Res*, 2006, 111: D16109
- 46 Li J, Yu R C, Zhou T J, et al. Why is there an early Spring cooling shift downstream of the Tibetan Plateau? *J Clim*, 2005, 18: 4660–4668
- 47 Qian W H, Quan L S, Shi S Y. Variations of the dust storm in China and its climatic control. *J Clim*, 2002, 15: 1216–1229
- 48 Huang M, Peng G B, Leslie L M, et al. Seasonal and regional temperature changes in China over the 50 year period 1951–2000. *Meteor Atmos Phys*, 2005, 89: 105–115
- 49 Liu Y X, Yan J H, Wu T W, et al. Prediction research of climate change trends over north china in the future 30 years. *Acta Meteorol Sin*, 2007, 22: 42–50
- 50 Gu X, Jiang J. A complex autoregressive model and application to monthly temperature forecasts. *Ann Geophys*, 2005, 23: 3229–3235
- 51 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 近百年中国气温序列的建立. *应用气象学报*, 1998, 9: 392–401