

珠三角城市化对气温时空差异性影响

吴子璇^{1,2,3}, 张 强^{1,2,3}, 宋长青^{1,2,3}, 张 芬⁴, 朱秀迪^{1,2,3}, 孙 鹏⁵,
范科科^{1,2,3}, 余慧倩^{1,2,3}, 申泽西^{1,2,3}

(1. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学
地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学地理科学学部 减灾与应急
管理研究院, 北京 100875; 4. 兰州大学资源环境学院 西部环境教育部重点实验室,
兰州 730000; 5. 安徽师范大学地理科学与旅游学院, 芜湖 241002)

摘要: 利用1967-2015年珠江三角洲21个气象站逐日气温资料, 根据人口数量、人口密度和夜间灯光数据等数据集划分城市和郊区站点类型, 在此基础上, 对比不同时空尺度城市站和郊区站气温变化, 分析了城市化对气温影响的时空差异性。结果表明: ① 1967-2015年, 珠三角地区年平均气温、平均最高气温和最低气温均显著升高, 平均最低气温的增温速率最高, 分别是平均气温的1.05~1.16倍和平均最高气温的0.95~1.32倍。其中, 年平均气温变化速率的季节差异普遍表现为秋冬季节增温最强, 增温速率均高于0.3 °C/10a, 春夏季节增温较弱, 增温速率最低为0.16 °C/10a。② 利用城市和海表温度对比研究城市化效应, 受城市化影响, 珠三角年平均气温的增温趋势是0.096 °C/10a。③ 利用城市和郊区对比研究城市化效应, 1967-2015年城市化对城区的气温升高具有显著贡献, 而且城市化对平均最高气温及最低气温增温的贡献率最大。其中, 城市化对年平均气温变化的贡献率的季节差异表现为夏冬季节较强, 贡献率高于11.8%, 春秋季节较弱, 贡献率最低仅为4.46%。④ 站点划分方法, 城市化发展不同阶段及研究时间尺度的选择均导致城市化增温效应的研究结果具有较大不确定性。不同站点分类方法多指示城市化对最低气温升高的贡献率最强, 最高可达到38.6%。

关键词: 城市化; 气温; 站点划分方法; 珠三角

DOI: 10.11821/dlxb201911011

1 引言

全球超过一半人口居住在城市, 预计在2050年, 居住在城市的人口将达到70%^[1]。随着人口快速增长, 城市化进程不断加快, 城区不透水地面增加, 导致城区下垫面水热特性及大气成份发生变化, 引起区域气候变化^[2], 进而引发一系列生态和环境问题^[3]。关于城市化气候效应, 大多认为在城市化进程中, 城市化导致城区地表温度上升^[4-5]。Jones

收稿日期: 2018-06-19; 修订日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771536, 41601023); 国家自然科学基金委创新群体项目(41621061); 国家杰出青年科学基金项目(51425903) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41771536, No.41601023; Creative Research Groups of National Natural Science Foundation of China, No.41621061; National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China, No.51425903]

作者简介: 吴子璇(1996-), 女, 陕西西安人, 硕士生, 主要从事城市水文学与遥感水文等领域研究。

E-mail: wuzx1026@163.com

通讯作者: 张强(1974-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水循环及资源与生态效应研究、旱涝灾害机理、流域地表水文过程及其对气候变化的响应机制与机理等领域的研究工作。

E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

等^[6]以中国东部海温为背景值,研究发现1951-2004年中国东部城市化区增温幅度为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。Ren等^[7]研究发现中国北方地区大城市站年均地表温度变化受城市化影响最大,而农村站年均地表温度变化受城市化影响最小。Wang等^[8]发现温度梯度从城区向其周边农村地区逐渐减少。Tao等^[9]研究认为,城市化对中国北部地区地表年均温度及春、夏和秋季地表平均温度影响显著。然而,关于城市化对气候变暖的贡献尚存争议,城市化对气温变化的影响由于研究区的空间尺度不同而有所差异^[10-11]。Zhao等^[12]估计1951-2010年不同时期中国东部地区城市化对气温变化贡献率低于10%-40%。同时,大多研究认为,在半球乃至全球尺度下,城市化对气温变化影响较小,可能不超过总增温的10%^[13]。关于城市化及乡村站点的确定问题, Park等^[14]通过对比两个时间段内城市化对韩国气温的影响,研究发现站点位置、研究时段和研究方法等会影响城市化对变暖趋势的评估。而目前更多通过定义乡村站、城市站对比城乡温差以研究城市化对气温的影响^[15]。因此,当前城市热岛效应研究由于研究区域尺度差异、研究时间范围差异和站点选取差异等,还有诸多问题需要深入探讨,以进一步量化城市化对城区气温变化的影响。

珠江三角洲(珠三角)是改革开放前沿阵地,经济社会快速发展,人口快速增加,是中国城市化进程最快的地区之一^[16]。城市群人口密集,对气候灾害的敏感性和脆弱性异常突出,且城市化对区域气候变化的影响是城市化灾害效应的理论关键。因此关于珠三角城市化对气温影响的相关研究还需要更加深入。基于此,本文根据人口数量数据、人口密度数据和夜间灯光数据DMSP/OLS等划分城市、郊区站点,并对珠三角地区1967-2015年平均气温、平均最高与最低气温的年、季的变化趋势等开展系统研究,探讨城市化对气温变化的影响。

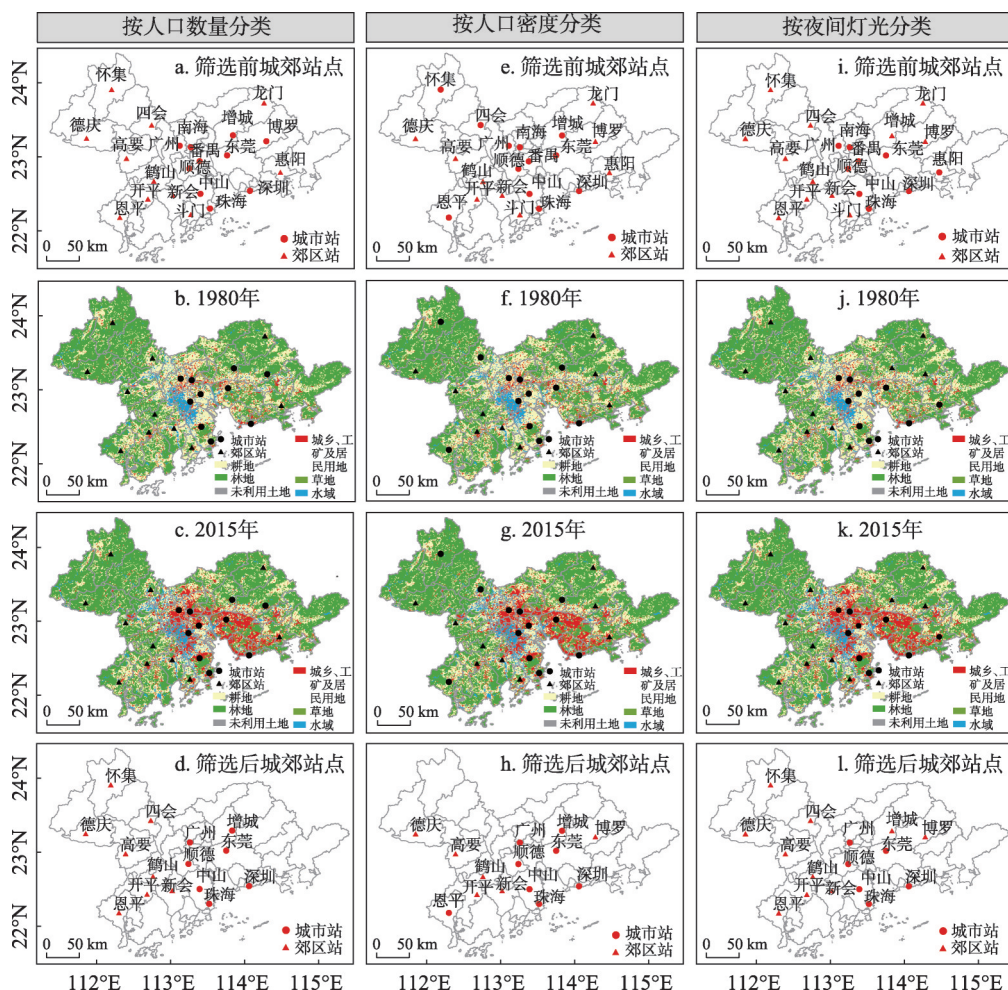
2 数据与方法

2.1 数据

珠三角地处亚热带季风气候区,为中国重要经济中心,也是中国城市化发展最快的地区之一。研究数据包括:①珠三角地区气象站逐日气温资料,包括日平均气温,平均最高气温和平均最低气温,共获得27个气象站的资料数据。气温资料在用于本研究前经过质量检查,对于存在迁站或迁站距离较远及海拔较高的站点进行了剔除,同时选取无缺测资料的站点。在考虑站点资料连续性、站点海拔及气象站迁站等因素的基础上,选出21个气象站气温资料作为本文的研究数据,用来研究珠三角地区平均气温、平均最高气温和平均最低气温的增温情况。21个站点空间分布如图1a所示。②2015年人口数量资料,选用来自广东省统计年鉴中2015年常住人口数据。③2015年人口密度资料,选用来自国家基础地理信息中心,空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的人口密度栅格数据;④2013年夜间灯光(DMSP/OLS)资料,选用美国国家地球物理数据中心基于低光数据的稳定灯光数据产品,空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 。⑤南海海表温度资料,选用来自Met Office Centre的HadSST1全球海洋表面温度数据集(<http://metoffice.gov.uk/>),空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。⑥1980年和2015年珠三角土地利用/土地覆被变化(LUCC)资料,空间分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$,数据来源于中国科学院资源环境数据云平台(www.resdc.cn),此数据用于筛选始终是城市站的站点,并保证所选取的郊区站点未发生明显的城市化。⑦1967-2015年中国城市化率历年统计数据,来源于国家统计局。

2.2 研究方法

以1967-2015年为研究时段,计算21个站点年、季节平均气温、平均最高、最低气



注: a~d 分别是根据人口数量划分的原始城郊站点分布,再根据 1980 年和 2015 年土地利用数据进行站点筛选,确定最终的城郊站点类型;e~h、i~l 分别是根据人口密度和夜间灯光划分的城郊站点分布。

图 1 研究区城市和郊区站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of urban and suburban stations (a-d are the distribution of original urban and suburban stations selected based on population quantity data, and then these stations were conducted according to LUCC data in 1980 and 2015 to determine the final urban and suburban stations; e-h and i-l are the distribution of urban and suburban stations selected based on population density data and DMSP/OLS data, respectively)

温, 利用线性回归和Mann-Kendall趋势检验^[17-18], 计算年、季节气温线性变化趋势, 并进行显著性水平为 5% 的显著性检验。Yue 等^[19]对比研究了 Mann-Kendall 趋势检验准确性, 认为其与 Bootstrap 和 t 检验等相近。

为分析城乡站点分类方法差异对城市化增温效应的研究, 根据人口数量、人口密度和夜间灯光 DMSP/OLS 等 3 种数据, 对气象站点进行分类: ① 珠三角人口众多, 城市化发展迅速, 很难找到真正意义上的农村站。参照江志红等^[20]按人口总量划分城乡站点的方法, 将人口数量为 1×10^6 及以上的气象站点列为城市站, 其他为郊区站; ② 参考 Kishtawal 等^[21]的方法, 根据珠三角 2015 年人口密度进行阈值分析。区域内 70% 的人口密度值小于 4000 人/km^2 , 划分为郊区站; 99% 的人口密度值超过 7000 人/km^2 , 划分为城市站; ③ 参考 Yang 等^[22]的方法, 参照《中国城市统计年鉴》中的珠三角建成区面积和灯光

面积比值,确定城市气象站阈值,以气象站点为中心建立7 km缓冲区,当各站点缓冲区的灯光平均值大于城市气象站阈值划分为城市站,反之划分为郊区站。依据上述方法以人口数量、人口密度和夜间灯光数据划分的站点类型结果分别如图1a、1e、1i所示。从结果来看,人口数量和人口密度分类结果比较一致,站点数量和站点分布较为相似。夜间灯光数据分类结果相差较大,城市站数量减少,多为珠三角典型城市,夜间灯光资料所认可的郊区站多于人口数量和人口密度,可能是由于珠三角地区以广州、深圳、东莞等为代表的地区城市化程度过高,导致地区整体灯光阈值偏高。而某些站点城市化程度相较偏低,其灯光值达不到灯光阈值而被划分为郊区站。但珠三角地区城市化进程迅速,为排除在珠三角城市化的动态过程中郊区站点转化为城市站,并确保城市站点在本研究时间范围内一直是城市站,在根据人口数量、人口密度和夜间灯光数据将所有气象站点进行分类的基础上,分别利用1980年和2015年珠江三角洲土地利用/土地覆被变化(LUCC)数据,结合广东省基层气象台站简史中气象站点所处的地理位置,对比3种分类结果所有站点的下垫面情况,对站点分类结果进行筛选,以保证在本研究范围内郊区站没有发生明显的城市化,城市和郊区站点划分的最终结果分别如图1d、1h、1l所示。在利用LUCC数据和气象站点位置进行筛选后的站点中,城市站集中在城市建设用地下垫面,郊区站相对集中在耕地、草地等自然地地表下垫面周边,以保证所选取及划分的站点受到城市化进程的影响降到最低,使得分类结果能代表在城市化演变过程中城市和郊区气温变化情况。

城市化影响贡献率(UE)是城市化对附近城市气温趋势变化的贡献率,通过对比城市和郊区站气温变化趋势,利用UMR(Urban Minus Rural)方法评估^[9, 14, 23]:

$$UE = \frac{\Delta Tu - \Delta Tr}{|\Delta Tu|} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔTu 和 ΔTr 分别为城市和郊区站温度线性趋势。由于 ΔTu 可能为正值,而UE的正负取决于 $(\Delta Tu - \Delta Tr)$ 的符号,因此除数选择了 ΔTu 的绝对值。当 $\Delta Tu > \Delta Tr$ 时, $UE > 0$,表示城市化加剧气温上升;当 $\Delta Tu = \Delta Tr$ 时, $UE = 0$,表示城市对气温变化无影响;当 $\Delta Tu < \Delta Tr$ 时, $UE < 0$,表示城市化导致气温降低。此外,当 $\Delta Tu > 0$, $\Delta Tr < 0$ 时,或当 $\Delta Tu < 0$, $\Delta Tr < 2\Delta Tu$ 时, $UE > 100\%$,此情况视同为 $UE = 100\%$,此情况说明存在未知的当地人为或自然因素影响城市或郊区站的气温。当 $\Delta Tu > 0$, $\Delta Tr > 2\Delta Tu$ 时或 $\Delta Tu < 0$, $\Delta Tr > 0$ 时, $UE < -100\%$,此情况视同为 $UE = -100\%$ 。

3 研究结果

3.1 珠三角城市化进程及区域气温变化

基于1995年和2015年珠三角地区两期分辨率为500 m×500 m的SPOT卫星遥感影像所反演的土地利用数据,采用城市建设用地占比衡量城市化进程(图2)。1995-2015年间珠三角地区城市化进展迅速(图2),1995年城市建设用地占比为4.2%,直到2015年城市建设用地增长到11.4%,远超Wang等^[10]提出的全中国城市用地面积为0.7%。大规模的城市化改变了城市下垫面水热属性,进而导致地表粗糙度增加,使近地面温度升高、湿度降低,形成城市热岛效应。

从图3可看出,在空间上,1967-2015年珠三角地区年均气温均呈上升趋势($P < 0.05$),珠三角整体年均气温增幅0.297 °C/10a,且气温增温显著的区域集中于顺德、南海、深圳、番禺、鹤山及中山地区,增温速率均达0.355 °C/10a。其中,顺德站增温速率

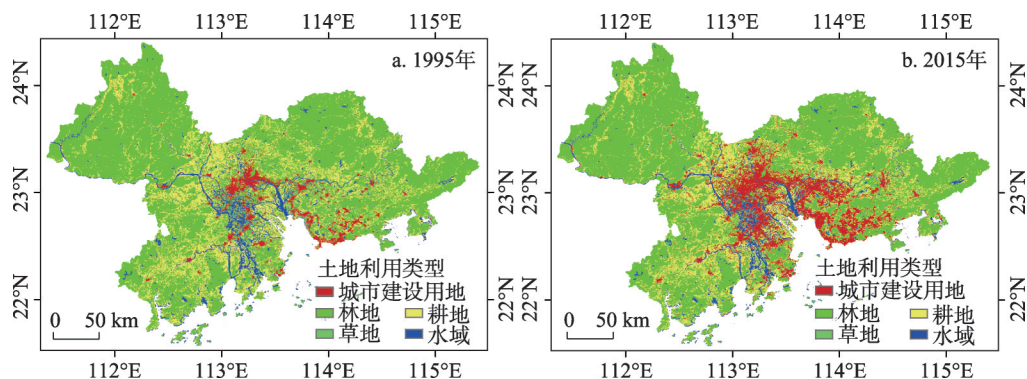


图2 1995年和2015年珠三角地区土地利用类型分布

Fig. 2 Spatial pattern of land use and land changes over the Pearl River Delta in 1995 and 2015

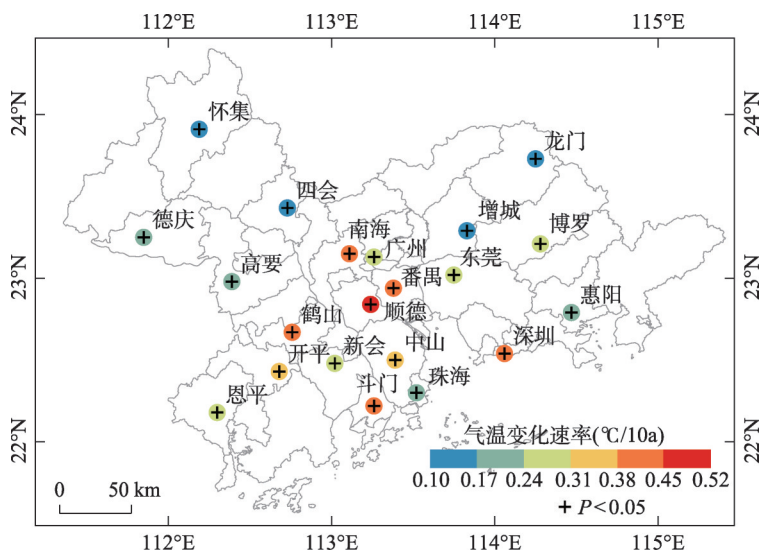


图3 1967-2015年珠三角地区年平均气温变化趋势的空间分布

($P < 0.05$ 表示变化趋势通过0.05显著性检验)

Fig. 3 Spatial distribution of trends in annual average temperature within the Pearl River Delta from 1967 to 2015

($P < 0.05$ indicates that the trends are statistically significant at the 0.05 confidence level)

最高 ($0.489\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 其次是南海站 ($0.432\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。而四会、龙门、增城、怀集地区增温最弱, 龙门站的增温速率最低, 为 $0.124\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。增温强弱地区分别对应城市化发展快的区域和郊区, 说明城市化对气温的显著影响。珠三角中部区域平均气温升高速率高于其周边地区, 存在显著的区域差异。通过与珠三角土地利用数据 (图2) 对比, 珠三角中部对比其周边地区城市建设用地集中, 说明城市化进程的气温增温速率存在显著影响。此外, 南部沿海地区站点升温速率略高于北部地区及内陆站点升温速率, 其中斗门站增温速率达到 $0.375\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

1967-2015年期间, 珠三角地区年均最高气温均呈升温趋势 ($P < 0.05$)。如图4a所示, 珠三角地区整体增温速率为 $0.284\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。相比于年平均气温, 年平均最高气温增温幅度略低, 增温最强区域在顺德、番禺、南海、鹤山、斗门、中山一带, 其中顺德增温速率最高 ($0.479\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。增温最小区域在怀集、龙门、高要、广州、深圳等站点, 主

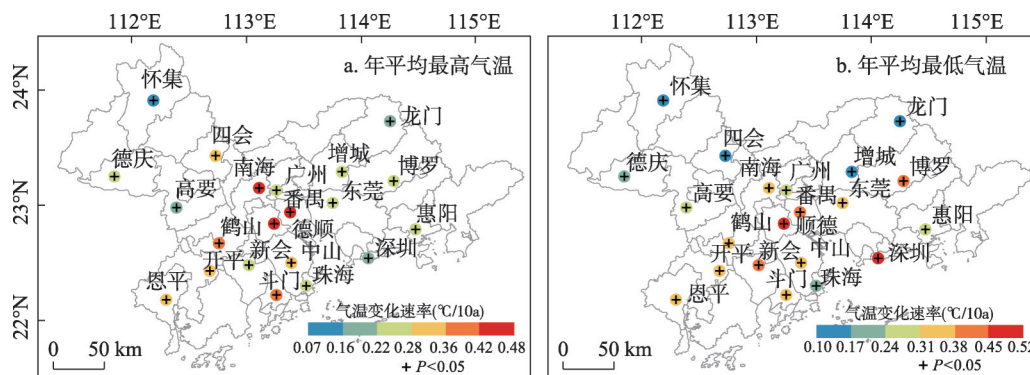


图4 1967-2015年珠三角地区年平均最高气温、年平均最低气温变化趋势空间分布
($P < 0.05$ 表示变化趋势通过0.05显著性检验)

Fig. 4 Spatial distribution of trends in annual average maximum (a) and annual average minimum (b) temperature in the Pearl River Delta during 1967-2015

($P < 0.05$ indicates that the trends are statistically significant at the 0.05 confidence level)

要集中在珠三角东南部和西北部地区。对比年平均最高气温的空间变化趋势和珠三角地区土地利用分类图,城市化发展对年平均最高气温影响不显著。如图4b所示,1967-2015年珠三角地区年均最低气温呈显著上升趋势($P < 0.05$),整体增温速率为 $0.328\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,高于珠三角年气温和最高气温增温速率,而且增温强度及增温速率大的区域范围扩大。年均最低气温增温最强的地区是深圳、番禺、顺德,其中深圳增温速率最大,达到 $0.602\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。增温最弱区域集中在珠三角的东北、西北和沿海的珠海地区,龙门增温速率最弱,为 $0.129\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

3.2 城市化效应:城市与海温对比

在研究沿海地区城市化对气温的影响中,可以通过比较陆地气温和邻近海域的海洋表面温度(SST)的关系研究城市化对气温的影响^[6, 24]。珠三角毗邻南海,本文利用HadISST1全球海表温度数据集,提取出1967-2015年南海($4^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\text{E}\sim 119^{\circ}\text{E}$)范围内区域逐月算术平均海表温度,作为珠三角背景温度参考,将珠三角地区平均气温和南海全年和季节海表温度变化趋势进行对比($P < 0.05$) (图5)。南海海表温度始终高于珠三角区域平均气温,且总体不断升高,增温速率为 $0.193\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。海表温度自2000年后增温减速,而城市相关变暖趋势是 $0.096\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,也有增温减速趋势。海表温度主要是由表面局部能量平衡所决定的,并存在显著的季节变化^[25]。春季海表温度不断升高,增温速率为 $0.181\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,春季珠三角地区平均气温波动较大,但整体上升,增温速率达到 $0.213\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;夏季珠三角地区平均气温高于海表温度,二者变化相似,增温速率分别是 $0.207\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.143\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,夏季珠三角城区增温速率为 $0.064\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。秋季珠三角平均气温和海表温度增温速率分别是 $0.393\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.189\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。冬季海表温度几乎无明显波动变化,呈平稳升高($0.234\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。珠三角平均气温较其他季节波动不大,增温速率为 $0.391\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。总体来看,珠三角平均气温在秋季增温最强,春季增温最弱。海表温度在冬季增温最强,夏季增温最弱。

已有学者利用海洋表面温度作为农村站点气温的代替探究城市化的增温效应。Jones等^[6]以中国东海海洋表面温度为背景,研究1951-2004年中国东部城市化区增暖幅度为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,城市化效应的贡献率为18%~40%。Park等^[14]为探讨城市化对韩国增温的影

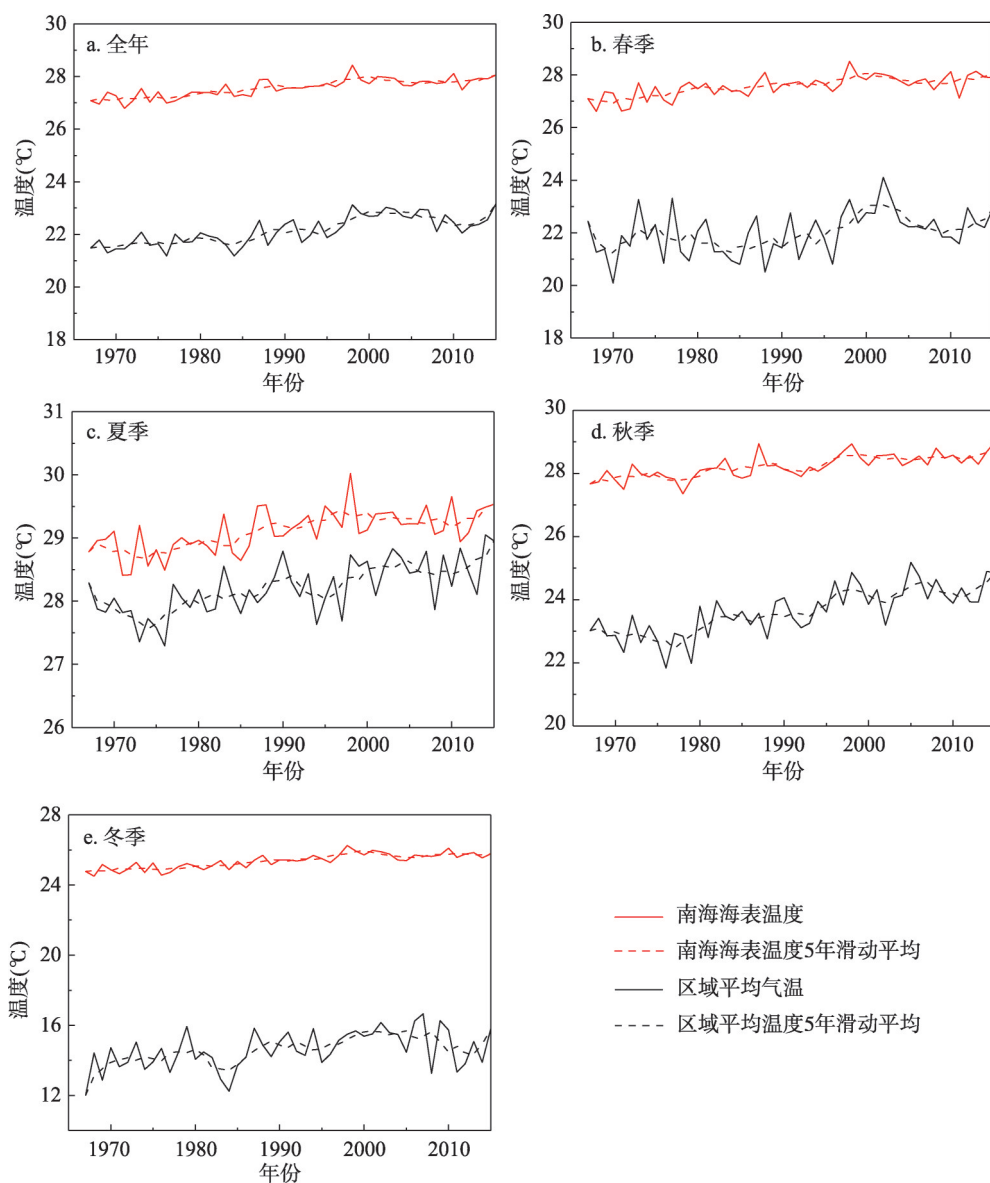


图5 1967-2015年珠三角地区气温和南海海表温度全年和季节时间变化趋势

Fig. 5 Temporal variations of annual and seasonal temperature in the Pearl River Delta (black curve) and the sea surface temperature in the South China Sea (red curve) during 1967-2015

响, 利用不受城市化影响的海洋表面温度的再分析数据和气温的站点数据进行对比, 结果表明城市化对韩国变暖的影响较弱。Oda等^[26]以东京湾海温变化为背景, 研究东京城市气温的变化情况, 并发现其变化情况随空间分布不同而存在差异。本文利用海表温度作为农村站点气温的代替, 探讨珠三角城市化增温效应及气温变化的空间分异规律。

图6是将南海温度作为农村站点气温的代替, 各站点气温受城市化影响的变化情况。结果显示, 受城市化影响, 珠三角地区年平均气温的增温趋势是 $0.096\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。在距海较近及珠三角中部地区, 如斗门、深圳、番禺、顺德等站点年平均气温的增温速率较快, 普遍在 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 以上, 这些站点的下垫面多对应建成区。而在距海较远的站点,

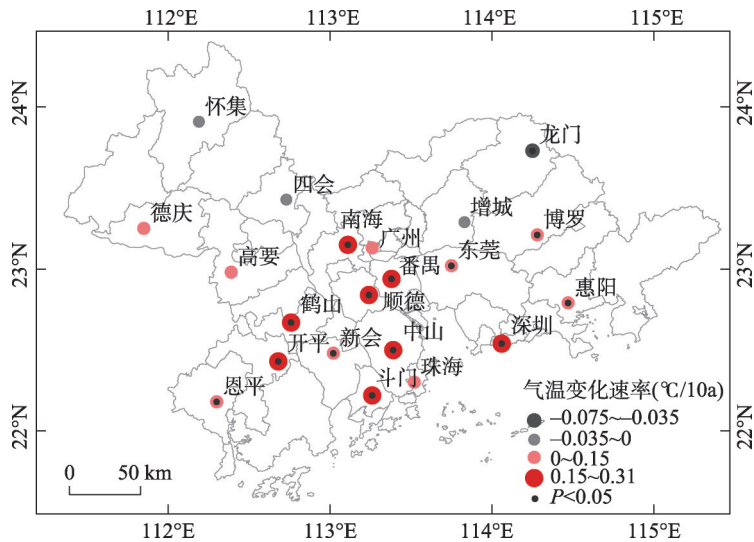


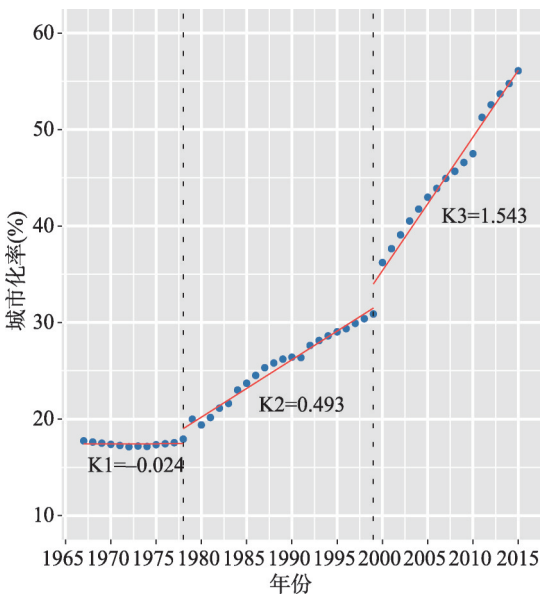
图6 海表温度对比下1967-2015年珠三角地区各站点年平均气温城市化增温速率的空间分布
($P < 0.05$ 表示气温变化速率通过0.05显著性检验)

Fig. 6 According to the comparison of SST, the spatial distribution of the annual average temperature warming rate of urbanization in the Pearl River Delta from 1967 to 2015.
($P < 0.05$ indicates that the trends are statistically significant at the 0.05 confidence level)

比如龙门、怀集站点平均气温变化速率略有降低，最低值为 $-0.075\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，这些站点区域下垫面的建成区分布比例较低，城市化影响较弱。

3.3 城市化效应:城市与郊区对比

考虑到站点划分方法对城市热岛效应研究的差异性^[16]，本文根据3类数据（人口数量、人口密度和夜间灯光）划分城市和郊区站点。此外，也有研究表明不同的时间尺度会影响城市化对气温增温的评估^[27]。在中国，1978年改革开放之后，珠三角地区倚靠经济政策和地理位置的优势，经济迅猛发展，城市化进程飞速加快，逐渐形成了以广州、深圳为核心的珠三角城市群。根据国家统计局1967-2015年城市化率数据，并通过斜率检测方法^[28]确定城市化率变化的分段点（图7）。1967-1977年，城市化率均低于20%，认为此时段是城市化发展的低速期。约在1999年前后，城市化率的增长产生显著变化，1999年后城市化率增长速度是1978-1999年城市化率增长速度的3.1倍，则认为1978-1999年和2000-2015年分别是城市化发展的中速期及高速期。



注：红线表示城市化率变化的分段拟合情况，K1和K2分别表示分段拟合的斜率，虚线表示分段的拐点位置。

图7 1967-2015年中国城市化率变化情况

Fig. 7 Urbanization rate change in China from 1967 to 2015
(The red line indicates the segmentation fitting of urbanization rate change, K1 and K2 represent the slope of piecewise fitting respectively, the dotted line indicates the position of the segment point)

因此, 本文整体分析 1967-2015 年城市化对气温影响的贡献率, 并分段讨论 1967-1977 年、1978-1999 年和 2000-2015 年不同城市化进程阶段城市化对气温影响的贡献率, 研究时间尺度差异对城市化增温效应的响应规律。

1967-2015 年以及不同城市化进程阶段 3 种分类情况下, 城市站和郊区站气温变化速率及城市化对气温影响的贡献率如图 8 所示。按人口数量分类的情况下, 1967-2015 年城市化对城市站年均气温、年均最高气温和年均最低气温都存在显著的增温影响, 城市站温度增温速率是郊区站的 1.24 倍, 城市化对年均最低气温贡献率大于其对年均气温变化和年均最高气温变化的贡献率, 达到 20.8%。城市化进程低速期阶段珠三角城市站年均最高气温呈增温趋势, 但郊区站气温降低, 城市化对年均最高气温的贡献率最高。城市站和郊区站年均气温和年均最低气温都呈增温趋势, 但城市站增温速率略低于郊区站, 城市化导致气温降低。中速期阶段珠三角城市化对年均气温、年均最高和最低气温都表现为增温影响, 城市化对气温影响的贡献率为 24.6%。高速期气温普遍呈降低的趋势, 城市站年均气温和年均最高气温降低速率稍快于郊区站, 城市化对年均气温和年均最高气温均表现为降低的影响, 贡献率分别为 -32.7% 和 -13.9%。按人口密度分类的情况下, 1967-2015 年城市化增强了年均气温、年均最高和最低气温, 其中, 城市化对年平均最高气温增温贡献率最高。低速期城市化导致年均气温和年均最高气温均增加, 城市化贡献率分别是 23.83% 和 100%, 但城市站年均最低气温增温速率低于郊区站, 城市化贡献率为 -87.5%。中速期城市化对年均最高气温增温贡献最高, 为 30.2%, 对年均最低气温增温贡献最低, 仅为 6.9%。高速期城市化对年均气温、年均最高和最低气温均表现为降温

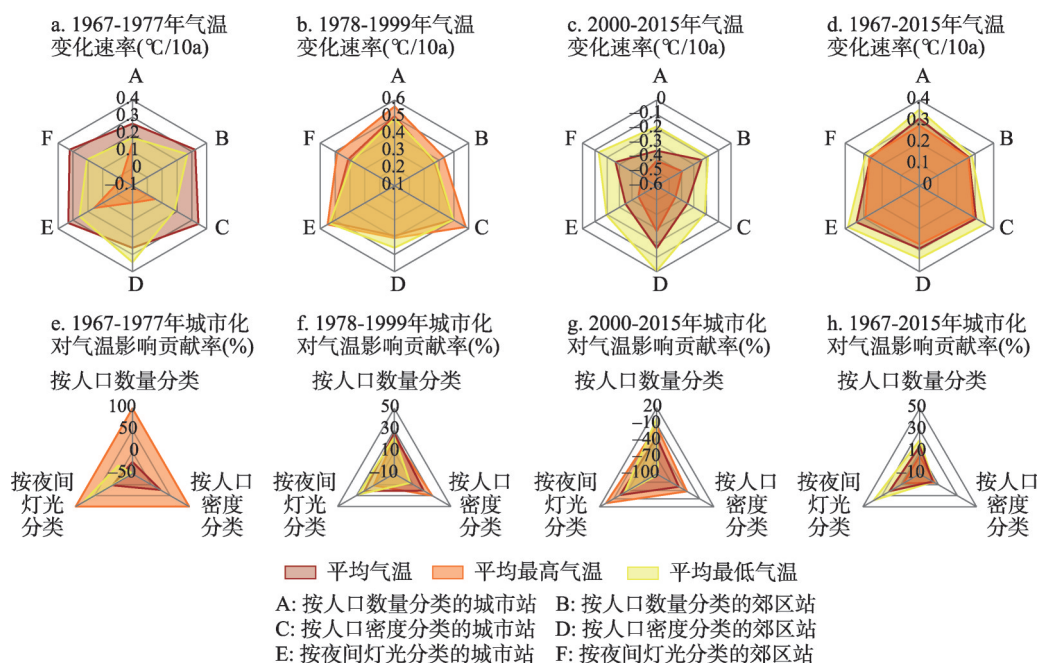


图 8 1967-2015 年以及城市化进程低速期(1967-1977 年)、中速期(1978-1999 年)、高速期(2000-2015 年) 3 种分类情况的城市站和郊区站的气温变化速率(a, b, c, d)以及城市化对气温影响的贡献率(e, f, g, h)
Fig. 8 The temperature change rate of urban stations and suburban stations under three classification methods (as shown in a, b, c, d respectively) and the contribution rate of urbanization to temperature (as shown in e, f, g, h respectively) in the low-speed period of the urbanization process (1967-1977), medium-speed period (1978-1999), high-speed period (2000-2015) and 1967-2015

市站和郊区站冬季年平均气温增温速率最高, 超过 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 而夏季气温却呈降温的趋势, 低于 $0.69\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。城市化对年均气温贡献率秋季最高, 对夏季和冬季年均气温表现为降低的影响, 贡献率最低为 -1.7% 。中速期和高速期城市化对夏季和秋季增温的贡献率最强, 最高可达 52.6% , 而对春季气温影响最低。按人口密度分类的情况下, 1967-2015 年间城市化对平均气温各季节增温贡献率普遍较低, 夏季最高仅为 4.8% , 而在秋季城市增温速率低于郊区, 城市化对气温贡献率为 -2.8% 。低速期城市化对平均气温各季节增温贡献率差异较大, 秋季和冬季城市化对年均气温表现为增温影响, 最高在秋季, 贡献率为 41.5% 。而在春季和夏季城市化对年均气温有降低的影响。中速期城市化对年均气温各季节变化均表现为增温影响, 其中夏季城市化增温影响的贡献率最高, 达到 43.9% , 春季贡献率最低, 仅为 9.3% 。高速期夏季和秋季年均气温为升温趋势, 而春季和冬季为降温趋势, 城市化对年均气温的季节变化均呈现降温影响。按夜间灯光分类的情况下, 1967-2015 年期间城市站和郊区站平均气温的增温速率均在冬季最大, 普遍高于 $0.359\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 其次是秋季, 夏季最低, 郊区站增温速率最低值为 $0.165\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。城市化对平均气温增温的贡献率的季节差异表现为夏季最高, 为 28.8% , 其次是秋季和春季, 冬季最低, 为 16.9% 。低速期城市化对冬季气温增加的贡献率最高, 为 19.6% , 秋季年均气温呈现降低趋势, 城市化对气温变化的贡献率为 -20.2% 。中速期各季节年均气温都呈增温趋势, 秋季增温速率最高, 城市站和郊区站增温速率均高于 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 城市化对年均气温增温贡献率的季节差异表现为夏季最高, 为 43.9% , 而秋季最低, 贡献率仅为 9.5% 。高速期各季节年均气温变化速率差异显著, 夏秋季增温, 春冬季降温, 而城市化对气温变化贡献率季节差异表现为春季最高, 夏季最弱。

综上所述, 在不同的城市和郊区站点划分方法下, 不同城市化进程时期及不同的研究尺度, 城市化对平均气温增温速率和平均气温增温贡献率及其季节性存在差异。

4 讨论

4.1 珠三角城市化对气温的影响特征

本文以珠三角地区为典型, 突出研究城市化对区域尺度气温变化及贡献率的影响。关于城市化对区域气温的影响研究大多集中在美国、欧洲及东亚地区^[13]。北美地区已有大量研究依靠人口数量区分城乡站点并对比城乡气温的差异, 如 Kuklai 等^[29]对比北美洲 34 对城乡站点的气温差异, 发现城市化所造成的增暖占总变暖的 30% 。在欧洲地区, Chrysanthou 等^[30]通过对欧洲逐日气温资料研究发现在 1960-2006 年城市地区增温速率为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 但城市化贡献的增温仅为 $0.0026\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 约占 1.5% 。纵观中国城市化对地面气温序列的影响相关研究, 如 Bian 等^[9]选择单一站点, 对比中国华北地区石家庄站和乡村站点地表温度序列, 认为城市站地表温度的增温完全由城市化引起。周雅清等^[23]对比分析华北地区不同类型台站与乡村站气温差异, 发现 1961-2000 年城市化引起的增温为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 贡献率达到 37.9% , 其增温速率以冬季最大, 增温贡献率以夏季最大。Yang 等^[19]利用 UMR 方法研究, 发现 1981-2007 年城市化对中国东部地区年平均气温增温贡献率为 24.2% 。Wang 等^[31]根据全国 1980-2009 年气温序列资料, 研究城市化对气温的影响发现其城市化效应为 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 占总变暖的 20% , 且冬季城市变暖强于夏季。相较来看, 珠三角地区城市站年平均气温增长速率超过 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 并在秋冬增温较强、春夏较弱。

综上所述,珠三角地区城、郊站点年平均气温增长趋势普遍高于中国其他地区,其城市化效应的季节规律与华北及全国地区普遍一致。但珠三角增温贡献率相比全国范围偏低,可能是由于珠三角城市化进程快速,城、郊站点气温增速比较快,导致城市化增温贡献率偏低。本文探讨不同城市化进程阶段,城市化对气温的影响,在2000-2015年即城市化进程高速期,受到自然和其他人为因素,城市站和郊区站气温都存在降低的趋势,导致城市化对气温影响贡献率是负值,也说明研究时间尺度较短,对城市化变暖影响相关研究带来不确定性^[14]。

4.2 导致城市化对气温影响差异的因素

当前,关于城市化对气温的影响研究更多采用城乡对比法,因此涉及到站点划分的问题。人口数量指标、城区面积、不透水面、夜间灯光数据等均可作为城乡站点的划分标准,但城乡站点划分方法不同,城市化对气温影响的研究结果存在差异。珠三角地区城市化进程迅速,不存在完全不受城市化影响的农村站点,因此选取郊区站和城市站进行对比,这样所研究的城市化对气温的影响可能会低于实际情况。考虑到以上两种因素,本文选取人口数量、人口密度和夜间灯光数据同时划分站点类型,研究城市化对气温变化的影响,同时探讨不同划分方法是否会使研究结果产生差异。如图8所示,不同分类方法下,城市站和郊区站年、季节平均气温、平均最高气温和平均最低气温均呈显著上升的趋势,但增温速率各不相同。从3种站点划分方法下城市化对气温影响的贡献率研究结果(图9)来看,各个方法下城市化对气温增温贡献率均存在差异。对比两个时间段城市化影响贡献率发现,研究时段不同,城市化影响的贡献率也不同,普遍认为研究时间范围越长,城市化效应越明显,城市化对气温影响贡献率也越大。由此说明站点类型划分方法和研究时间范围在城市化对气温影响贡献率研究中起重要作用。因此,在今后相关研究中,为能精确划分城乡站点的类型,还需要综合考虑多种因素,如人口数量、土地利用变化、人口增长变化、城市化率等。

除上述导致城市化对气温影响贡献率差异的因素外,不同气候带,不同海陆分布及不同城市化规模下,城市化对气温的影响结果也存在差异。以中国为例,东部地区自北向南分别分布着京津冀、长三角和珠三角三大城市群,并分别处于华北、长江流域和华南3个不同气候带,因而其背景气候特征如气温、降水等均存在差异。马新野等^[32]利用中国高密度台站逐日气温资料及风场和日照时间资料分析对京津冀、长三角和珠三角3个气候带背景气候的差异,并用UMR方法分析不同其后背景下城市化效应的差异特征。结果显示这3个地区背景气温等气象要素在变化范围、长期变化趋势及年代际变化等方面均有显著差异。由于三大城市群的城市规模差异,导致城市化对增温的贡献不同,证明不同气候带和不同城市规模的城市化效应存在差异。

4.3 气候变暖背景下城市化对气温的影响机制

城市化导致气温升高的驱动机制^[33]主要包括以下几个方面:① 植被减少^[34],植被可以通过蒸腾作用增加潜热通量,帮助减轻城市热岛效应。目前随着城市化进程加快,越来越多的自然植被被建筑物或道路所代替,导致城市地区的气温升高。② 城市建筑强度^[35],由于街道峡谷中可以捕获更多由人类排放和建筑材料所存储的热量,因此会保持更高的城市气温。③ 城市地表反照率^[36],由于城市“冠层效应”和城市建筑及道路中使用的“新型材料”,导致地表反照率降低,增强城市地区的热量存储,从而影响城市地区的气温。④ 人为热量排放^[37],城市化进程中,城市地区聚集人口越来越多。人为热通量可以转化成显热通量或其他热量组分,从而间接增强城市热岛效应。⑤ 城市规模^[38],有研究发现,城市规模越大,城市化导致的增温越强。⑥ 气候效应,气候变化是导致城市

气温变化的主要原因。此外,气候还可通过改变植被条件、地表反照率来改变城市化对气温的影响。

当前全球正处于气候变暖的背景中,IPCC第五次评估报告指出,100多年来全球地面平均温度上升了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[39]。在导致全球变暖的诸多原因中,人口增长,温室气体排放,人为气溶胶,地表覆盖类型变化是重要的人为影响因素^[40-44],其中城市化是地表覆盖类型变化的原因之一。因此,城市化和全球变暖问题的因果关系相互交织,区分城市化引起的增温和由全球变暖对区域气候的影响程度,估计城市化对区域增温的贡献率是需要解决的问题之一^[45]。本文的研究区为珠江三角洲,在全球气候变暖的背景下,城、郊地区气温均会上升,在剔除南海的海表温度之后,对比城、郊站点气温序列差异,研究城市化对增温贡献率,以突出城市化发展对气温的作用。由上述问题可见,当前正处于全球气候变暖的背景下,在进行城市化效应的研究时,如何准确区分全球变暖和城市化对区域气温序列的影响及其对增温的贡献率相关问题,还需要进一步探讨。此外,本研究立足于城、郊站点的对比研究城市化对气温的影响,未深入到城市内部研究城市扩张及城市建筑群对局部气候的影响,以细化城市化对局部气温的影响研究。今后,还需在此类问题上开展深入研究。

5 结论

利用1967-2015年21个国家基本/基准站逐日平均气温、平均最高气温、平均最低气温资料,研究城市化对珠三角气温时空差异性的影响,根据人口数量、人口密度和夜间灯光数据进行城市和郊区站点划分,整体分析1967-2015年气温变化情况及城市化增温特性,并根据城市化进程进行分段讨论,研究站点分类方法差异和时间尺度差异对珠三角城市化增温的响应规律,得到以下结论:

(1) 1967-2015年间,珠三角地区平均气温、平均最高气温和平均最低气温均显著升高,增温速率均高于 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。从空间分布来看,增温趋势显著的地区主要集中于珠三角中部和南部地区,其中平均气温强增温的区域主要对应城市建设用地集中及城市化发展迅速的城区。

(2) 通过城市与海表温度对比研究城市化效应,珠三角城市化导致的年平均气温的增温趋势是 $0.096\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。空间差异表现为离海洋的距离越远的站点,且下垫面建成区分布比例较低,城市化对气温的影响较弱。

(3) 通过城市与郊区对比研究城市化效应,1967-2015年城市站和郊区站年平均最低气温的增温速率最快,分别是平均气温的1.05~1.16倍和平均最高气温的0.95~1.32倍。从年平均气温的季节变化来看,秋冬季节增温最强,增温速率均高于 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,春夏季节增温较弱。

(4) 普遍来看,城市化对平均最低气温增温的贡献率最高,是其对平均气温增温贡献的1.3倍以上。城市化对年平均气温影响贡献率的季节差异主要表现为夏冬季节较强,春秋季节较弱。

(5) 城市站和郊区站划分方法不同,城市化发展阶段及研究的时间尺度不同,所得到的城市化对增温效应贡献率的研究结果上存在显著差异。不同站点分类方法多表明城市化对最低气温影响贡献率较为显著,最高可达到38.6%。因此,城市和郊区站点分类方法以及研究时间尺度对城市化热岛效应研究会产生差异性影响。

参考文献(References)

- [1] United Nations. Department of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects: The 2007 revision. Highlights, 2008, 22(8): 656-659.
- [2] Kaufmann R K, Seto K C, Schneider A, et al. Climate response to rapid urban growth: Evidence of a human-induced precipitation deficit. *Journal of Climate*, 2007, 20(10): 2299-2306.
- [3] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [4] Li Q, Li W, Si P, et al. Assessment of surface air warming in northeast China, with emphasis on the impacts of urbanization. *Theoretical & Applied Climatology*, 2010, 99(3/4): 469-478.
- [5] Ren G, Zhou Y. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over mainland China, 1961-2008. *Journal of Climate*, 2014, 27(6): 2340-2360.
- [6] Jones P D, Lister D H, Li Q. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D16122). Doi: 10.1029/2008JD009916.
- [7] Ren G. An overview on studies of surface air temperature change. *Meteorological Monthly*, 2003, 9(8): 3-6.
- [8] Wang S, Ma Q, Ding H, et al. Detection of urban expansion and land surface temperature change using multi-temporal Landsat images. *Resources Conservation & Recycling*, 2018, 128: 526-534.
- [9] Bian T, Ren G, Yue Y. Effect of urbanization on land surface temperature at an urban climate station in north China. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, 165(3): 553-567.
- [10] Wang F, Ge Q, Wang S, et al. A new estimation of urbanization's contribution to the warming trend in China. *Journal of Climate*, 2015, 28(22): 8923-8938.
- [11] Chu Ziyang, Ren Guoyu. The impact of change in Beijing metropolis heat island intensity on regional temperature series. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(4): 534-540. [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(4): 534-540.]
- [12] Zhao P, Jones P, Cao L, et al. Trend of surface air temperature in eastern China and associated large-scale climate variability over the last 100 years. *Journal of Climate*, 2014, 27(12): 4693-4703.
- [13] Ren Yuyu, Ren Guoyu, Zhang Aiyang. An overview of researches of urbanization effect on land surface air temperature trends. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1301-2013. [任玉玉, 任国玉, 张爱英. 城市化对地面气温变化趋势影响研究综述. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1301-1310.]
- [14] Park B J, Kim Y H, Min S K, et al. Long-term warming trends in Korea and contribution of urbanization: An updated assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(20): 0148-0224.
- [15] Dai Yifeng, Liu Yimin, Zhou Linjong. Observation analysis of urbanization effect on surface air temperature trends in east China. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, 31(4): 365-371. [戴一枫, 刘屹岷, 周林炯. 中国东部地区城市化对气温影响的观测分析. *气象科学*, 2011, 31(4): 365-371.]
- [16] Li Ruojian. Discussion on the gains and losses of urbanization in the Pearl River Delta: Analysis based on the census data. *Population & Economics*, 2014(1): 15-18. [李若建. 珠三角城市化得失探讨—基于人口普查数据的分析. *人口与经济*, 2014(1): 15-18.]
- [17] Wang D, Jiang P, Wang G, et al. Urban extent enhances extreme precipitation over the Pearl River Delta, China. *Atmospheric Science Letters*, 2015, 16(3): 310-317.
- [18] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423(6939): 528-31.
- [19] Yue S, Pilon P. Interaction between deterministic trend and autoregressive process. *Water Resources Research*, 2003, 39(4): 53-62.
- [20] Jiang Zhihong, Li Yang. Impact of urbanization in different regions of eastern China on precipitation and its uncertainty. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(4): 601-611. [江志红, 李杨. 中国东部不同区域城市化对降水变化影响的对比研究. *热带气象学报*, 2014, 30(4): 601-611.]
- [21] Kishhtawal C M, Niyogi D, Tewari M, et al. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(13): 1908-1916.
- [22] Yang X, Hou Y, Chen B. Observed surface warming induced by urbanization in east China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D1413). Doi: 10.1029/2010jd015452.
- [23] Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Urbanization effect on long term trends of extreme temperature events in north China. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(6): 1589-1598. [周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响. *高原气象*, 2014, 33(6): 1589-1598.]

- [24] 《10000 Selected Problems in Sciences》Earth Sciences Editorial Board. 10000 Selected Problems in Sciences. Earth Science. Beijing: Science Press, 2010. [《10000 个科学难题》地球科学编委会. 10000 个科学难题: 地球科学卷. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [25] Li Juan, Zuo Juncheng, Li Yanfang. Low-frequency variation and influence factors of sea surface temperature in South China Sea. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, 39(5): 575-582. [李娟, 左军成, 李艳芳. 南海海表温度的低频变化及影响因素. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(5): 575-582.]
- [26] Oda R, Kanda M. Observed sea surface temperature of Tokyo Bay and its impact on urban air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(10): 2054-2068.
- [27] Yan Z W, Wang J, Xia JJ, et al. Review of recent studies of the climatic effects of urbanization in China. *Advances in Climate Change Research*, 2016, 7(3): 154-168.
- [28] Muggeo V M R. Estimating regression models with unknown break-points. *Statistics in Medicine*, 2003, 22(19): 3055-3071.
- [29] Kukla G, Gavin J, Karl TR. Urban warming. *Journal of Applied Meteorology*, 1986, 25(9): 1265-1270.
- [30] Chrysanthou A, Schrier G, Besselaar EJM, et al. The effects of urbanization on the rise of the European temperature since 1960. *Geophysical Research Letters*, 2015, 41(21): 7716-7722.
- [31] Wang F, Ge Q S. Estimation of urbanization bias in observed surface temperature change in China from 1980 to 2009 using satellite land-use data. *Science Bulletin*, 2012, 57(14): 1708-1715.
- [32] Ma Xinye. The difference of urbanization effect over different climate zones and the impact of urban expansion on regional climate [D]. Nanjing University, 2014. [马新野. 不同气候带城市化效应的差异和城市扩展对区域气候的影响[D]. 南京大学, 2014.]
- [33] Zhou D, Zhao S, Liu S, et al. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152(152): 51-61.
- [34] Peng S, Piao S, Ciais P, et al. Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 696-703.
- [35] Yow DM. Urban heat islands: Observations, impacts, and adaptation. *Geography Compass*, 2007, 1(6): 1227-1251.
- [36] Stewart ID, Oke TR. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [37] Christen A, Vogt R. Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*, 2004, 24: 1395-1421.
- [38] Streutker D R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2595-2608.
- [39] Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1068-1076. [沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1068-1076.]
- [40] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature*, 1990, 344 (6266): 529-531.
- [41] Hu Z, Yang S, Wu R. Long- term climate variations in China and global warming signals. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D19): 4614. Doi: 10.1029/2003JD003651.
- [42] Streets D G, Yu C, Wu Y, et al. Aerosol trends over China, 1980-2000. *Atmospheric Research*, 2008, 88(2): 174-182.
- [43] Sr P R, Marland G, Betts R A, et al. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: Relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions*, 2002, doi: 10.1098/rsta.2002.1027.
- [44] Ren Guoyu, Chu Ziying, Zhou Yaqing. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 701-716. [任国玉, 初子莹, 周雅清. 中国气温变化研究最新进展. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 701-716.]
- [45] Li Guodong, Zhang Junhua, Cheng Hongyi. Urban heat island effect against the background of global warming and urbanization. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2012, 2(6): 45-49. [李国栋, 张俊华, 程弘毅. 全球变暖和城市化背景下的城市热岛效应. *气象科技进展*, 2012, 2(6): 45-49.]

Impacts of urbanization on spatio-temporal variations of temperature over the Pearl River Delta

WU Zixuan^{1,2,3}, ZHANG Qiang^{1,2,3}, SONG Changqing^{1,2,3}, ZHANG Fen⁴, ZHU Xiudi^{1,2,3},
SUN Peng⁵, FAN Keke^{1,2,3}, YU Huiqian^{1,2,3}, SHEN Zexi^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 5. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: Daily temperature data at 21 stations across the Pearl River Delta during the period of 1967-2015 were selected, and these stations were divided into urban stations and suburban stations based on population, population density and DMSP/OLS data. Meanwhile, spatio-temporal variations due to urbanization were investigated by comparing the temperature changes at urban and suburban stations. The results show that: (1) In the past 50 years, the annual average temperature, the average maximum temperature and the average minimum temperature in the Pearl River Delta region increased significantly, and the average minimum temperature increased at the highest rate, or 1.05-1.16 times of the average temperature and 0.95-1.32 times of the average maximum temperature, respectively. Among them, the seasonal difference of annual average temperature change rate is generally manifested as the strongest temperature increase in autumn and winter, with the temperature increase rate higher than 0.3 °C/10a, and the temperature increase rate is weaker in spring and summer, with the temperature increase rate as low as 0.16 °C/10a. (2) Using urban and Sea Surface Temperature (SST) comparison to study the urbanization effect, affected by urbanization, the annual average temperature of the Pearl River Delta is increasing by 0.096 °C/10a. (3) Using urban and rural comparison to study the urbanization effect, from 1967 to 2015, urbanization leads to the temperature increase in urban areas. Generally speaking, urbanization contributes the most to the increase of average minimum temperature. Meanwhile, the seasonal difference in the contribution rate of urbanization to the annual average temperature change indicates that the increase rate is stronger in summer and winter, with the contribution rate higher than 11.8%, and lower in spring and autumn, with the contribution rate being only 4.46%. (3) The selection of stations division method, the different periods of urbanization development and time scale of research all lead to the uncertainty of the research results on the warming effect of urbanization. Different stations classification methods indicate that urbanization contributes the most to the increase of the minimum temperature, and for a longer time scale, the contribution rate of urbanization to the increase of the minimum temperature is up to 38.6%.

Key words: urbanization; temperature; station classification methods; Pearl River Delta