

# 城市化对气温变化影响研究进展

温康民<sup>1, 2, 3</sup> 吴滨<sup>4</sup>

(1 福建省气象科学研究所, 福州 350028; 2 福州市气象局, 福州 350028;  
3 福州市智慧气象行业技术创新中心, 福州 350028; 4 福建省气候中心, 福州 350028)

**摘要:** 人类活动导致的外强迫是气候变暖归因的重点之一, 而城市化(土地利用外强迫)是人类活动外强迫中的一个重要方面。国内外城市化对气候变暖的影响研究, 在过去几十年间取得了很大进展, 很有必要对其进行系统性总结及梳理。本文重点梳理了国内外背景站选取的主要方法, 城市化对单个城市、区域及全球/半球气温的影响, 城市化对极端气温的影响, 城市化对气温影响的订正5个方面的内容。总体看来, 城市化对单个城市及区域尺度气温序列的影响是十分显著的, 而对半球及全球尺度气温序列的影响则没有一致的结论; 城市化不仅对城市及区域尺度的平均气温有较大影响, 而且对与城市及区域尺度最高、最低气温有关的极端气温事件也有重要影响。合理订正气温变化中的城市化影响, 是改善气候变化监测、检测和预测结果的重要问题之一, 目前有关城市热岛效应的时空分布特征及其对气温变化趋势的影响已有大量研究, 但对于合理订正站点气温序列中的城市化影响工作还十分欠缺, 在进行未来气候变化预估时也很少考虑城市化的影响, 不少针对区域气候变暖的研究也没有考虑城市化的影响, 这将严重低估城市或区域未来的变暖幅度以及过高估计区域历史气温的变暖幅度。最后, 对城市化影响区域气温未来的研究方向进行了探讨。

**关键词:** 城市化影响, 平均气温, 极端气温事件, 偏差订正

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.05.003

## Research Progress of the Impact of Urbanization on Surface Air Temperature Variations

Wen Kangmin<sup>1, 2, 3</sup>, Wu Bin<sup>4</sup>

(1 Fujian Institute of Meteorological Sciences, Fuzhou 350028; 2 Fuzhou Meteorological Service, Fuzhou 350028;  
3 Fuzhou Intelligent Meteorological Industry Technology Innovation Center, Fuzhou 350028;  
4 Fujian Climate Center, Fujian Meteorological Service, Fuzhou 350028)

**Abstract:** The external forcing caused by human activities is one of the key contributors to climate warming, and urbanization (external forcing of land use) is an important aspect of the external forcing of human activities. The research on the impact of urbanization on climate warming has made great progress in the past few decades both domestically and abroad, and therefore it is necessary to summarize the previous studies. This paper mainly includes five aspects, the main methods of selecting background stations in China and in abroad, the impact of urbanization on the temperatures of individual cities, regions, and the globe/hemisphere, the impact of urbanization on extreme temperatures, and the correction of urbanization impacts. Overall speaking, the impact of urbanization on temperature series on a single city and regional scale is very significant, while no consistent conclusion concerning the impact on the hemispheric and global scale temperature series has been drawn. Urbanization not only has impact on the average temperature at the city and regional scales, but also exhibits important impact on extreme temperature events related to the highest and lowest temperature at the city and regional scales. Reasonable correction of the urbanization impact on temperature changes is one of the important issues for the improvement of climate change monitoring, detection and prediction. There are a lot of researches on the temporal and spatial distribution characteristics of urban heat island effect and its influence on the trend of temperature changes, but no sufficient attention is paid to reasonable correction of the urbanization influence on the station temperature series. Moreover, the impact of urbanization is rarely considered when predicting future climate change.

Many studies on regional climate warming have not considered the impact of urbanization, either. This will seriously underestimate the extent of future warming in cities or regions and overestimate the extent of regional historical temperature warming. Finally, the future research direction of urbanization affecting regional temperature is discussed.

**Keywords:** impact of urbanization, average temperature, extreme temperature events, bias correction

收稿日期: 2022年7月20日; 修回日期: 2023年2月20日  
第一作者: 温康民(1992—), Email: wenkangmin@126.com  
通信作者: 吴滨(1968—), Email: wwbbin\_2004@aliyun.com  
资助信息: 国家重点研发计划基金资助项目(2018YFA0605603);  
福建省气象局开放式课题(2021KFM02); 福州市  
科技计划项目(2021-S-200)

## 0 引言

温室气体排放和下垫面人为改变是人类活动对气候变暖影响的两个主要方面,其中城市化导致的热岛效应引起了广泛关注。由混凝土、沥青等下垫面组成的城市,较自然表面对太阳辐射的吸收、反射有很大的不同,同时,其热容量的不同加之工业、交通和商业等人类活动产生的热量,城市气温要比其周围的环境气温高,这种现象就是城市热岛效应<sup>[1]</sup>。随着全球经济的迅速发展,越来越多的人口集中于城市居住,城市化也进入了快速发展的阶段。城市化导致的热岛效应对城市生活环境(包括人类健康和出行)具有重要的影响,且其影响程度随着城市化发展逐渐增大。

地面气温序列中究竟包含多少城市化的影响,是一个极其复杂的问题。每个国家因为经济发展水平不同,其城市化的影响也不一样,在同一个国家不同的地区城市化对气温的影响也不一样。对于全球气候变暖的准确幅度及其原因,科学界还没有给出定论,主要是仪器记录时期地面气温资料的代表性尚存较大争议。其关键问题之一是当前的温度序列中还保留着城市化导致的台站附近的升温。目前全球所使用的长序列地面气温观测记录大多数源自城市附近的台站<sup>[2]</sup>,而城市市区面积占全球陆地面积的比例很小,城市站的增温不能代表大范围气温背景场的变化。在区域或全球气候变化检测及分析中,只有大范围气温背景场的数据才是有用的。温度序列受城市化影响的问题需要引起足够重视,解决不好这个问题,获得的全球或区域平均气温序列就没有代表性,得到的气候变化检测和预测的结论也就很难令人信服<sup>[3]</sup>。因此,合理评估和订正气温变化中的城市化影响,对于进一步检测区域气候变化信号,了解区域地面气候变化的观测情况,获得准确的气候变暖幅度及认识其原因,进而改善气候变化监测、检测和预测的结果,均具有重要理论和实际意义。近年来国内外许多气象科研人员针对此问题开展了一系列深入的研究。

本文旨在介绍国内外气温变化中城市化偏差评价及订正的研究现状,重点对比不同尺度上城市化对气温影响研究结果,同时探讨城市化对气温影响偏差订正技术发展现状及未来研究计划。

## 1 城市化对地面气温变化影响研究方法(背景站选取方法)进展

### 1.1 综合人口及其他指标

很多研究发现城市化对气温的影响同人口有一定的联系。Oke<sup>[4]</sup>研究发现城市人口指标的对数与热岛强度具有线性关系;Karl等<sup>[5]</sup>研究发现城市热岛强度与人

口指标的平方根具有较好相关性;林学椿等<sup>[6]</sup>研究得出人口及其他城市发展指标与热岛强度变化具有较好相关性。贾艳青等<sup>[7]</sup>在分析长三角地区城市化对气温变化的影响时,把人口小于20万且位于乡村的台站作为乡村站;赵宗慈<sup>[8]</sup>也依据人口指标来挑选城市和乡村站。此外,Jones等<sup>[9]</sup>、Portman<sup>[10]</sup>、张爱英等<sup>[11]</sup>、Jin等<sup>[12]</sup>在进行乡村站遴选时,除了把人口因素作为选取指标,还把台站与城市之间的距离、台站附近环境、台站的迁站情况、台站与城市站的高度差等纳入考虑范畴,作为选取乡村参考站的指标。周雅清等<sup>[13]</sup>在分析山西省城市化对气温变化的影响时,把以台站为中心2 km半径范围内,建成区面积在1/3以内的台站定义为乡村站。因此,单纯依靠人口作为指标,容易忽略台站本身的代表性,综合人口因素及台站与城市之间的距离、台站附近环境、台站的迁站情况、台站与城市站的高度差等来选取乡村站更具代表性。

### 1.2 夜晚灯光指数

Peterson<sup>[14]</sup>使用卫星夜灯指标来挑取乡村站。谢志清等<sup>[15]</sup>使用DMSP/OLS夜灯指标获取长三角城市空间扩展区。此外,Yang等<sup>[16]</sup>使用1978—2013年的夜间灯光遥感数据及土地利用数据对长三角流域的187个城乡站点进行动态分类。吴子璇等<sup>[17]</sup>把珠三角地区人口、夜间灯光人口数量低于100万、区域内70%的人口密度值小于4000人/km<sup>2</sup>作为遴选指标,把气象站点周围7 km缓冲区的夜间灯光平均值小于城市气象站阈值的站作为郊区站。于凤硕等<sup>[18]</sup>根据人口、土地利用、夜晚灯光人口格网(表征人口)、土地利用(表征城市用地规模)和夜晚灯光(表征人类活动强度)5种数据来划分城乡站。因此,单纯利用夜灯指数作为划分指标,容易产生误差,因为夜灯数据并不能直接表示人口的密度,最好结合遥感数据及人口因素等作为综合划分指标。

### 1.3 卫星遥感数据

随着卫星遥感技术的发展,20世纪90年代末,一些学者开始采用卫星遥感资料进行乡村站的选取,如Gallo等<sup>[19]</sup>指出城乡气温差异与归一化植被指数(NDVI)成线性相关,并认为NDVI比人口指标在拟合城乡温度差异方面更有优势。Yang等<sup>[20]</sup>使用遥感图像展开了土地类型的区分,研究人类活动对我国东部气温的改变。Ren等<sup>[21]</sup>、Wickham等<sup>[22]</sup>也通过MODIS资料来选取乡村站。此外,吴蓉等<sup>[23]</sup>将台站周边2 km缓冲区范围内的建成区面积比例<25%,同时资料序列长度不少于50年且搬迁次数不多于1次的站作为乡村站。李宇等<sup>[24]</sup>根据1 km<sup>2</sup>格网尺度的城市不透水面比例

来遴选乡村站。综上，遥感数据是遴选乡村站比较常用的方法，但是单纯依据遥感数据容易忽略站点本身的代表性，因此，还应考虑迁站、站点周围环境、站点距城市的距离等因素。

### 1.4 海岛或高山等位置特殊站为指标

由于海岛或高山等特殊观测站受城市化的影响很小，故也被部分学者用来代表乡村站，如曾侠等<sup>[25]</sup>使用广东的海岛站代替乡村站。段春锋等<sup>[26]</sup>使用我国东部的高山站代替乡村站。由于海岛站受海洋气候影响较大，高山站受大气温度垂直递减率影响温度通常低于地面站，因此，使用海岛站或高山站作为背景站，容易引入不必要的误差。

### 1.5 EOF第二特征向量当作指标

聚类分析<sup>[27]</sup>也被用于乡村站的遴选。初子莹等<sup>[28]</sup>及刘学锋等<sup>[29]</sup>把空间函数的第二特征向量作为城市化或土地利用影响局地气温的指标，把年、季节气温EOF第二特征向量都为负的站作为乡村站。但是，使用聚类分析从统计学角度遴选乡村站并不是最直接和有效的方法，因为容易忽视人口因素等及站点本身的代表性。

### 1.6 非常规背景资料

部分学者采用一些非常规背景资料来作为乡村站，如吴息等<sup>[30]</sup>的研究中，将850 hPa温度探空资料用来选取参考站；Kalnay等<sup>[31]</sup>把NCEP/NCAR I再分析资料作为乡村站，对美国近50年城市化对最高、最低气温的影响展开分析；Kataoka等<sup>[32]</sup>使用城市周边网格数据序列替换背景站；Jones等<sup>[33]</sup>使用海温指标替换乡村站，对我国东部1951—2004年城市化效应展开了分析；Goddard等<sup>[34]</sup>使用ERA-Interim再分析资料作为背景气温资料。综上，常用的替代乡村站的非常规资料

包括850 hPa温度探空资料、各种再分析资料、城市周边网格数据序列、海温指标、40 cm地温指标等，其中使用最多的是各种再分析资料，但是使用NCEP资料研究区域气候变化趋势时不确定性因素较大，因此，非常规资料并不是城乡站划分的最直接有效的手段，在进行城市化影响分析时，只能作为一种备用资料。

使用观测资料对比分析是城市化对气温变化影响研究的最重要方法，方法的关键之处在于合理地挑选乡村站。综上，挑选乡村站的方法有很多种，对于附近有足够乡村站分布的城市站，利用卫星遥感数据结合人口及其他指标来综合挑选乡村站，是最常用及有效的方法，但是，对于周边乡村站分布不够，以及沿海或靠近荒漠等特殊地理位置的城市站，利用海岛或高山等位置特殊站为指标或非常规背景资料（如再分析资料等）也是一种有效的获取乡村站资料的方法。

## 2 平均气温中城市化影响检测研究进展

### 2.1 单个城市气温中的城市化影响研究

早在1953年，Mitchell<sup>[35]</sup>发现纽黑文市温度变化受城市化影响显著。此后，Kukla等<sup>[36]</sup>和Magee等<sup>[37]</sup>也发现美国城市站气温变化中存在显著的城市化偏差。国内有关单个城市受城市化影响最经典的论述为陈沈斌等<sup>[38]</sup>、程胜龙<sup>[39]</sup>。此外，乔盛西等<sup>[40]</sup>、初子莹等<sup>[28]</sup>、林学椿等<sup>[6]</sup>、于淼等<sup>[41]</sup>也对城市化对气温的影响作了相关论述。详见表1。

除传统的观测数据研究外，数值模式模拟<sup>[42-43]</sup>也应用到城市化影响研究中（表1）。针对单个城市气温中的城市化影响评估，大都表明城市化的影响不可忽略，且随着城市化发展速度加快，城市地区气温增加有加快的趋势，导致热岛效应不断加强，且大城市气温受城市化影响最大，中小城市次之；最高和最低气

表1 单个城市地面气温中城市化偏差的评价

Table 1 Assessment of urbanization bias for single-city surface air temperature

文献	研究方法	研究时段	研究结果
Mitchell <sup>[35]</sup>	UMR	1900—1940年	纽黑文市温度变化受城市化影响显著，美国地区的地面气温变化趋势普遍受城市化等非自然因素的影响，在使用这些台站的资料研究气温变化时，应剔除城市化及多次迁站导致的偏差
Kukla等 <sup>[36]</sup>	UMR	1941—1980年	气温趋势中含有0.12 °C/10 a的城市化偏差
Magee等 <sup>[37]</sup>	UMR	1949—1997年	气温变暖趋势中的城市化贡献占到20%左右
陈沈斌等 <sup>[38]</sup>	主成分分析	1955—1993年	城市化对北京气温的影响约为0.21 °C/33 a
程胜龙 <sup>[39]</sup>	UMR	1933—1997年	城市化对兰州气温影响的转折点在20世纪70年代的末期
乔盛西等 <sup>[40]</sup>	UMR	1966—1989年	县城城市化对年平均气温的影响，平均每5 a以0.1 °C的速度递增
初子莹等 <sup>[28]</sup>	UMR	1961—2000年	北京城市化对国家基本、基准站年平均温度变化影响为0.16 °C/10 a，对整个时期全部增温的贡献达到71%
林学椿等 <sup>[6]</sup>	UMR	1960—2000年	北京城市化偏差改革开放前为0.001 °C/10 a；改革开放后跃升为0.2286 °C/10 a
于淼等 <sup>[41]</sup>	UMR	1997—2016年	哈尔滨城市化进程对城市年平均气温的影响呈3次函数关系，城市化进程同城市热岛效应存在一定的相关性
赵西龙等 <sup>[42]</sup>	数值模拟	2015年	城市化后南京城市热岛效应明显增强，1月和7月2 m气温有明显增加的趋势，边界层高度分别增加了约60 m和180 m
张含等 <sup>[43]</sup>	数值模拟	2010—2017年	杭州城区面积在2017年基础上约增加2倍时，8月热岛强度等级高于“无”的区域扩大157%，1846.4 km <sup>2</sup> 的中心城区热岛强度等级由“弱”或“无”提升为“中等”，且主城区的2 m平均气温增加0.6 °C

注：UMR表示城郊对比法。

温也都呈上升趋势,且城市化发展对最低气温的变化影响最大,其次是平均气温,对最高气温影响最弱。

## 2.2 区域气温趋势中的城市化影响研究

有关城市化对区域气温的影响,最早是由美国学者开始研究的,其中最为经典的论述为Mitchell<sup>[35]</sup>、Kukla等<sup>[36]</sup>、Karl等<sup>[5]</sup>及Epperson等<sup>[44]</sup>。早期,有关城市化对中国地区气温的影响,最为经典的论述为赵宗

慈<sup>[8]</sup>、Jones等<sup>[9]</sup>及Portman<sup>[10]</sup>。

近期,城市化影响中国区域气温最为经典的论述包括周雅清等<sup>[45]</sup>、张爱英等<sup>[11]</sup>、段春锋等<sup>[26]</sup>。此外,近期关于中国区域气温受城市化影响的论述还包括Wang等<sup>[46]</sup>、Sun等<sup>[47]</sup>、肖宇昕等<sup>[48]</sup>,国外也有相关论述<sup>[49-50]</sup>。详见表2。

从前人的研究结果能够看出,美国学者是最早

表2 区域地面气温中城市化偏差的评价

Table 2 Assessment of urbanization bias for regional surface air temperature

文献	研究方法	研究时段	研究结果
Kukla等 <sup>[36]</sup>	UMR	1941—1980年	对美国历史气候站网(USHCN)的资料进行了重新分析,美国1901—1984年由城市化导致的增温为0.3~0.4℃,超同期气温增暖幅度达0.16℃
Karl等 <sup>[5]</sup>	UMR	1901—1984年	20世纪美国国家站网温度序列由城市化影响造成的增温只有0.06℃
赵宗慈 <sup>[8]</sup>	城市分类	1951—1989年	1951—1989年中国大城市年平均增暖明显,而小城市变暖很少
Epperson等 <sup>[44]</sup>	城市与区域对比	1989—1991年	1989—1991年美国月平均最高、最低、平均气温中的城市化影响分别为0.10℃、0.40℃、0.25℃
Jones等 <sup>[9]</sup>	UMR	1954—1983年	中国东部的百年气温序列中的城市化影响同全球增暖的幅度比较至少低一个量级,年平均气温中的城市化偏差为0.16℃/10a,城市化贡献率为41%
Portman <sup>[10]</sup>	UMR	1954—1983年	1954—1983年华北平原年平均气温中的城市化偏差为0.19℃/30a,7个大城市站为0.26℃/30a,14个小城市站为0.15℃/30a
周雅清等 <sup>[45]</sup>	UMR	1961—2000年	平均及最低气温受城市化影响明显,但城市化对最高气温趋势影响微弱,个别台站和季节甚至可能造成降温
张爱英等 <sup>[11]</sup>	UMR	1961—2004年	1961—2004年中国大陆平均的城市化增温率为0.076℃/10a,占全部增温率的27.33%
段春锋等 <sup>[26]</sup>	城市与高山站对比	1957—2005年	城市站气温变化明显地受到城市化影响,对于平均气温和最低气温以正影响为主,而对于最高气温为负影响为主,城市化影响的非对称性是气温变化非对称性形成的主要因素
Wang <sup>[46]</sup>	UMR	1951—2010年	中国区域气温变化受城市化的影响随空间尺度的改变而改变,通过考虑城市化效应的空间尺度,发现城市热岛的贡献可以忽略不计(小于1%)
Sun等 <sup>[47]</sup>	数值模拟	1961—2013年	1961—2013年中国东部比西部经历了更早且更强的变暖
肖宇昕等 <sup>[48]</sup>	观测减再分析	1998—2012年	不同城市化进程的模式模拟试验中气温变化趋势的差值与基于站点观测的OMR方法都证明了重庆和成都的城市下垫面对地面2m温度的升高具有显著影响,且在日最低气温的表现尤为突出
Chung等 <sup>[49]</sup>	回归模型	1951—2000年	根据模型计算发现韩国城市化效应在除4月外的所有月份均普遍存在,且贡献高达50%,1951—1980年和1971—2000年的温度序列进行对比,发现除了4月,各月平均气温受到城市化影响的范围介于0.3~0.6℃
Park等 <sup>[50]</sup>	UMR和观测减再分析	1912—2014年	韩国1973—2014年30%~45%的局地变暖趋势可能是由于城市化效应,并表明结果取决于站点分类方法和分析周期,1912—2014年城市化对增暖的贡献为3%~11%,1973—2014年城市化贡献率为30%~45%,1954—2014年城市化贡献率为25%~30%

开始研究地区气温中的城市化影响的国家,美国地区20世纪平均气温受城市化的影响比较严重,应引起重视,全面认识美国地区气温变化受城市化的影响十分必要;针对中国地区的研究表明,大城市站增温率明显高于小城镇和中等城市站,城市化效应对大城市气温基本上都是增温作用,平均及最低气温受城市化影响明显,但城市化对最高气温趋势影响较小,就中国大陆平均而言,20世纪60年代至21世纪初,中国平均气温受城市化影响较为严重;韩国针对区域气温中的城市化影响研究同样发现城市化增暖效应显著。

## 2.3 全球/半球气温记录中的城市化影响研究

早期,在全球/半球尺度上的城市化对气温的影响分析,最经典的论述包括Jones等<sup>[9, 51-52]</sup>、Easterling等<sup>[53]</sup>、Hansen等<sup>[54]</sup>。此外,Peterson<sup>[14]</sup>也对早期半球或全球尺度的气温受城市化影响作了相关论述。近期,Wickham<sup>[22]</sup>对比了由39028个站和由16132个乡村站计

算的1950—2010年气温变化趋势,得出城市热岛效应的影响为0;任玉玉<sup>[55]</sup>表示北半球气温增加趋势中包含明显的城市化影响偏差。详见表3。

因此,在全球及半球大陆尺度上,城市化对平均地面气温序列的影响可能比较弱;不同陆地地区之间有较明显的差异,这种差异不但体现在相同时期城市化增温速率和对总增温贡献的程度上,而且体现在开始出现显著城市化影响的时间上,欧美等发达国家出现最显著城市化影响的时间比中国等发展中国家要来得早;截至当前,城市化对气温变化趋势的影响在全球及大尺度区域上是否可以忽略,仍存在分歧,国际上对全球或半球气温序列中的城市化贡献率的具体数值,仍不能给出统一的定论。

## 3 极端气温中的城市化影响检测研究

相比气候平均态,极端气候事件对气候变化更加敏感<sup>[56]</sup>,其强度和频率的变化对环境和社会的影响更

严重。近期, 极端气温受城市化影响研究的经典论述包括崔林丽等<sup>[57]</sup>、郑祚芳<sup>[58]</sup>。此外, Ren等<sup>[59]</sup>、张小玲等<sup>[60]</sup>也对极端气温受城市化的影响做了相关论述。详见表4。

表3 全球/半球地面气温中城市化偏差的评价  
Table 3 Assessment of urbanization bias for global/hemispheric surface air temperature

文献	研究方法	研究时段	研究结果
Jones等 <sup>[51]</sup>	UMR	1851—1984年	在北半球2666个观测站中, 只有38个站存在明显的城市化影响
Jones等 <sup>[52]</sup>	UMR	1900—1980年	最近编制的北半球陆地平均温度可能包含一种虚假的变暖趋势, 在20世纪的前80年, 这种变暖趋势最高为0.1 °C, 远远低于同期观察到的长期变暖趋势, 城市化影响为0.013 °C/10 a
Jones等 <sup>[9]</sup>	UMR	1890—1990年	在两个使用最广泛的半球数据集中, 城市化的影响最多比在一个世纪尺度上看到的变暖小一个数量级, 城市化影响为0.05 °C/10 a
Easterling等 <sup>[53]</sup>	UMR	1900—2000年	全球及半球尺度, 20世纪全球最高、最低气温包含的城市化影响都低于0.01 °C/10 a
Hansen等 <sup>[54]</sup>	UMR	1900—2000年	城市化对全球温度变化的影响低于0.01 °C/10 a
Peterson <sup>[14]</sup>	UMR	1989—1991年	将全球乡村站资料集与全球历史资料集GHCN进行对比, 发现全球陆地平均气温包含的城市化影响近似为0, 地面气温序列中不包含显著的城市化影响, 原因可能是先前的分析中所采用资料没有经过均一化订正, 造成结果存在差异
任玉玉 <sup>[55]</sup>	数据集对比法	1901—2004年	北半球气温增加趋势中包含明显的城市化影响偏差
Wickham <sup>[22]</sup>	全球	1950—2010年	城市热岛效应的影响为0

表4 极端气温中城市化偏差的评价  
Table 4 Assessment of urbanization bias for extreme temperature

文献	研究方法	研究时段	研究结果
崔林丽等 <sup>[57]</sup>	UMR	1960—2007年	极端最高气温和高温日数在市区增加较多, 近郊和远郊增加较少
郑祚芳 <sup>[58]</sup>	UMR	1960—2009年	1980年起, 城市极端最高气温及其增温率明显高于近郊和远郊, 高温日数市区多于近郊, 近郊多于远郊; 极端最低气温温差近郊高于城市, 远郊高于近郊
Ren等 <sup>[59]</sup>	UMR	1961—2008年	城市化效应导致中国暖夜变多, 冷夜变少, 而暖日和冷日变化趋势较小
张小玲等 <sup>[60]</sup>	UMR	1960—2018年	城市化对成都地区最低气温、冷夜指数和暖夜指数的贡献率分别为34.00%、45.81%和26.88%, 与最低气温相关的指数对城市化的响应更为敏感

从前人的研究结果能够看出, 极端气温受城市化的影响应引起重视, 全面认识极端气温变化受城市化的影响十分必要, 针对北京、上海、宁波、天津、成都等城市的研究表明, 最低气温受城市化的影响远大于最高气温, 与最低气温相关的指数受城市化影响比与最高气温相关的更显著; 针对华北地区及中国区域的研究表明, 中国区域尤其是华北区域与最低气温有关的极端气温指数中包含显著的城市化影响, 受城市化影响导致冷指数日数减少和暖指数日数增加, 同时也使最低气温的极值明显升高。

## 4 城市化对气温影响偏差的订正研究进展

### 4.1 人口订正

要订正气温序列中的城市化偏差, 要求构建研究时段内气温及人口指标的回归方程, 但逐年的人口数据是没有的, 且不同区域的发展程度、人口密度、能源消耗等各有差异, 探讨人口与城市化之间的关系及适用区域是未来需要展开的课题。Karl等<sup>[5]</sup>根据美国1219个观测台站的人口数据和热岛增温速率构建了一个回归方程, 对区域平均尺度的平均、最高及最低气温进行了城市化偏差订正, 同时指出这个回归方程不一定适用于美国之外的地区。但应用人口订正方法订正气温变化中的城市化影响偏差并不是最常用的方

法。Kim等<sup>[61]</sup>指出小城市城市化效应实际上高于大城市, 并利用聚类分析方法, 对韩国南部30个不同台站的人口增长与年平均气温升高的关系进行了分析, 发现超过60%的站点的气温上升与人口增长相匹配。

### 4.2 卫星遥感订正

Gallo等<sup>[19]</sup>通过对比城乡气温差值与地表辐射温度的城乡差值、卫星反演的归一化植被指数(NDVI), 获得了显著的相关关系, 认为基于人口的城市化偏差订正和基于卫星估计的城市化偏差订正有相同的误差量级, 遥感方法更有潜质发展成为订正全球城市热岛偏差的最佳方法, 但应用卫星遥感方法订正气温变化中的城市化影响偏差的研究还不多见。Wang等<sup>[62]</sup>基于中国长期土地利用数据集, 发展了一种更加可靠和客观地估算大尺度地表温度中城市偏差的回归函数, 该回归方法适用于农村站点很少的地区, 且易于获取和更新数据, 避免了发展中地区城市的人口数据已经过时的问题。

### 4.3 城乡对比订正

目前对全球尺度上的城市化偏差进行的订正主要依靠可靠的乡村站数据序列。Hansen等<sup>[63]</sup>在建立全球气温序列时, 使用分段式线性订正法有效规避了人口数据等的影响, 同时为了确保具有最小的城市站与其

乡村站气温趋势之差,使用乡村站气温序列分别订正城市站1950年之前及1950年之后的气温。Hansen等<sup>[54]</sup>使用订正后城市站减去乡村站气温增加趋势的值达到最小的年份当作分割点,利用乡村站使用两段式线性订正避免了人口数据质量、回归方程调整检验的一系列问题。总体上,在全球和半球尺度上开展城市化偏差订正的工作还很少,一些研究者因此参照各个区域尺度评价结果,仅在分析平均气温序列的误差时才考虑这种随时间增大的偏差。

在国内,周雅清等<sup>[45]</sup>、张爱英等<sup>[64]</sup>通过城市站和乡村站的整个时段的线性趋势之差来订正城市站的增温趋势,得到的区域平均序列剔除了城市化的影响。该方法规避了回归方程调整检验、人口数据质量等一系列问题,但没有对单站气温序列的城市化偏差进行订正。周雅清等<sup>[45]</sup>通过将各类城市站得到的区域平均气温的趋势减去乡村站得到的区域气温的趋势,得到城市化偏差,再从各类台站(包括基本站、基准站)的年平均气温中减去城市化偏差,获得的华北区域气温资料集不含城市化偏差。Ren等<sup>[65]</sup>也使用了上述订正方法。

部分学者开发了城市和乡村台站资料进行气温差值订正的方法。Portman<sup>[10]</sup>对华北地区地面气温中的城市化偏差进行评估后,对该区域的城市化偏差进行了订正,订正公式为:

$$T'_i = T_i - \bar{T}_{u-r} - (\Delta T_{u-r} / 30) \times (i - 1954), \quad (1)$$

式中, $i$ 为1954—1983年中的任一年, $T_i$ 为订正前的温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $T'_i$ 为订正后的温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $\Delta T_{u-r}$ 为该区域30年的城市增温率( $^{\circ}\text{C}/30\text{a}$ ), $\bar{T}_{u-r}$ 为30年平均城乡温度差。Choi等<sup>[66]</sup>使用同样的方法对韩国年平均和各个季节的城市站区域平均序列进行了订正。以上订正城市化偏差的研究都只是对区域平均序列中的城市化偏差进行订正,并没有逐站订正气温序列中的城市化偏差。温康民等<sup>[67]</sup>发展了一套订正站点尺度气温序列中城市化偏差的方法,并对中国国家站近50年中的城市化偏差进行了订正,获得了一套剔除城市化偏差的气温数据集,估算出城市化对中国区域气温序列的影响贡献率为19.6%。

## 5 讨论与展望

研究城市化对气温的影响,选用何种方法来选取参考站会对研究结果造成较大的影响。选取乡村参考站的方法比较多,它们各有优点和缺点,在分析气温或极端气温事件的城市化偏差时,通过哪种方法选取参考站或划分城乡站非常关键。运用单一方法或单一数据进行乡村参考站的选取,各种不确定性因素比较

大,说服力不够,因此,综合利用多种方法或综合利用多种数据进行乡村参考站的选取是今后运用基于观测资料的对比分析法研究这类问题的一个趋势。

城市化偏差是站点气温记录中最常见的系统性偏差,城市化对温度序列变化的影响究竟有多大,如何订正其影响,只有解决了这些问题,才能准确地了解气候变暖的幅度及其原因,也才能改进气候变化监测、检测和预测的结果,这项工作将对今后区域及全球地面气温变化研究奠定基础,对于气候变化研究和推进对气候变化的了解具有重要意义。城市化偏差订正研究最早由美国学者在20世纪80年代发起,城乡对比订正是城市化偏差订正研究最重要的方法,城乡站趋势差值方法避免了人口数据质量、回归方程调整检验等一系列问题,这种方法建立在假设整个研究时期内城市化对地面气温趋势影响是准线性的基础之上。目前,国内对城市化偏差订正方法的研究较为薄弱;国外的订正方法在中国的地面气温序列订正中试验并应用的实例也较少。对地面气温变化趋势中的城市化偏差进行订正是非常重要的,只有发展可靠的订正方法,才能建立背景气温变化序列,为更好地预测区域地面气温变化趋势提供坚实的基础,这对于进一步认识地面气候变化的观测事实,检测区域气候变化信号,分析气候变化的原因,均具有重要理论和实际意义。对于普遍具有较大城市化偏差的中国地面气温观测资料,在站点基础上开展中国地面气温城市化偏差订正工作还是凤毛麟角,在站点基础上开展全球陆地地面气温城市化偏差订正工作还未见报道,这种局面无助于大尺度气候变化监测和研究工作的深入。因此,发展合理的城市化偏差订正方法,获得订正城市化偏差后的观测资料,利用订正后的资料分析研究现代气候变化,得到真实的区域或全球/半球地面气温长期变化特征,是当前气候变化领域迫切需要解决的课题之一。

关于中国近半个世纪气温序列中的城市化影响检测已开展较多工作,而针对中国近百年地面气温序列中的城市化影响的评价和订正几乎还没有相关工作开展,尽快开展相关研究对于正确认识中国近百年气温变化具有重要意义。此外,对于区域和单站尺度极端气温序列受城市化影响的研究还很少,尤其是对于城市化进程快速的东亚区域,对东亚地区极端气温事件序列中包含的城市化影响进行研究,是更准确地进行东亚极端天气、气候事件监测与检测的前提,也能为极端事件的准确预测和模拟提供依据。对东亚自然背景下极端天气、气候事件时空特征的准确分析有助

于理解中国气候变化的时空规律,更准确进行气候变化监测、检测和预测,进而更好地分析气候变化对农业、水利等方面的影响,为评估气候变化及其对社会经济的影响提供支持。因此,未来有必要进一步分析评价城市化因素对东亚区域极端气温指数变化可能产生的影响。

### 参考文献

- [1] UN-Habitat. State of the world's cities 2010/2011-bridging the urban divide. London: Earthscan, 2008.
- [2] 龚道溢,王绍武.全球气候变暖研究中的不确定性.地学前缘,2002,9(2):371-376.
- [3] 任国玉.地表气温变化研究的现状和问题.气象,2003,29(8):3-6.
- [4] Oke T R. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment, 1973, 7(8): 769-779.
- [5] Karl T R, Diaz H F, Kukla G. Urbanization: its detection and effect in the United States climate record. Journal of Climate, 1988, 1(11): 1099-1123.
- [6] 林学椿,于淑秋,唐国利.北京城市化进程与热岛强度关系研究.自然科学进展,2005,15(7):882-886.
- [7] 贾艳青,张勃,张耀宗,等.城市化对长三角地区极端气温影响的时空分异研究.自然资源学报,2017,32(5):814-828.
- [8] 赵宗慈.近39年中国的气温变化与城市化影响.气象,1991,17(4):14-16.
- [9] 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(6289): 169-172.
- [10] Portman D A. Identifying and correcting urban bias in regional time series: surface temperature in China's Northern Plains. Journal of Climate, 1993, 6(12): 2298-2308.
- [11] 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(6):957-966.
- [12] Jin K, Wang F, Zong Q, et al. An updated estimate of the urban heat island effect on observed local warming trends in mainland China's 45 urban stations. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2020, 98(4): 787-799.
- [13] 周雅清,胡桃花,王骏,等.山西省气温变化特征及其城市化效应.科技与创新,2020(24):68-70.
- [14] Peterson T C. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: no difference found. Journal of Climate, 2003, 16(18): 2941-2959.
- [15] 谢志清,杜银,曾燕,等.长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响.地理学报,2007,62(7):717-727.
- [16] Yang X, L Ruby L, Zhao N, et al. Contribution of urbanization to the increase of extreme heat events in an urban agglomeration in east China. Geophysical Research Letters, 2017, 44: 6940-6950.
- [17] 吴子璇,张强,宋长青,等.珠三角城市化对气温时空差异性影响.地理学报,2019,74(11):2342-2357.
- [18] 于凤硕,康丽姝,李宝富,等.城市化对山东省极端气温事件的影响.气象科技,2019,47(1):129-139.
- [19] Gallo K P, Owen T W. Satellite-based adjustments for the urban heat island bias. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38: 806-813.
- [20] Yang X C, Zhang Y L, Liu L S, et al. Sensitivity of surface air temperature change to land use/cover types in China. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(8): 1207-1215.
- [21] Ren Y Y, Ren G Y. A remote-sensing method of selecting reference stations for evaluating urbanization effect on surface air temperature trends. Journal of Climate, 2011, 24: 3179-3189.
- [22] Wickham C, Curry J, Groom D, et al. Influence of urban heating on the global temperature land average using rural sites identified from MODIS classifications. Geoinformatics & Geostatistics An Overview, 2013, 1(2): 1-14.
- [23] 吴蓉,孙怡,杨元建,等.城市化对安徽省极端气温事件的影响.气候变化研究进展,2016,12(6):527-537.
- [24] 李宇,周德成,闫章美.中国84个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子.环境科学,2021,42(10):5037-5045.
- [25] 曾侠,钱光明,陈特固,等.广东省沿海城市热岛特征分析.气象,2006,32(11):94-97.
- [26] 段春峰,缪启龙,曹雯,等.以高山站为背景研究城市化对气温变化趋势的影响.大气科学,2012,36(4):811-822.
- [27] 王君,严中伟,李珍,等.近30年城市化对北京极端温度的影响.科学通报,2013,8(33):3464-3470.
- [28] 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.
- [29] 刘学峰,于长文,任国玉.河北省城市热岛强度变化对区域地表平均气温序列的影响.气候与环境研究,2005,10(4):763-770.
- [30] 吴息,王少文,吕丹苗.城市化增温效应的分析.气象,1994,20(3):7-9.
- [31] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. Nature, 2003, 423(6939): 528-531.
- [32] Kataoka K, Matsumoto F, Ichinose T, et al. Urban warming trends in several large Asian cities over the last 100 years. Science of the Total Environment, 2008, 407(9): 3112-3119.
- [33] Jones P D, Lister D H, Li Q. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(D16): D16122.
- [34] Goddard I L M, Tett S F B. How much has urbanisation affected United Kingdom temperatures? Atmospheric Science Letters, 2019, 20: e896.
- [35] Mitchell J M. On the causes of instrumentally observed secular temperature trends. Journal of the Atmospheric Sciences, 1953, 10: 244-261.
- [36] Kukla G, Gavin J, Karl T R. Urban warming. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1986, 25: 1265-1270.
- [37] Magee N, Curtis J, Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska. Theoretical and Applied Climatology, 1999, 64: 39-47.
- [38] 陈沈斌,潘莉卿.城市化对北京平均气温的影响.地理学报,1997,52(1):27-36.
- [39] 程胜龙.城市化对兰州气温变化影响的定量分析.气象,2005,31(6):29-34.
- [40] 乔盛西,覃军.县城城市化对气温影响的诊断分析.气象,1990,16(11):17-20.
- [41] 于淼,曹蕾,韩志鹏,等.哈尔滨城市化进程对气温影响的研究.黑龙江气象,2021,38(3):27-29.
- [42] 赵西龙,周顺武,郑丹,等.城市化对南京气候影响的数值模拟研究.气象与环境科学,2019,42(2):1-9.
- [43] 张含,张小伟,樊高峰.城市化影响杭州城市热环境的数值模拟研究.中国环境科学,2021,41(9):4107-4119.
- [44] Epperson D L, Davis J M, Bloomfield P, et al. Estimating the urban bias of surface shelter temperatures using upper-air and satellite data. Part II: estimation of the urban bias. Journal of Applied Meteorology, 1995, 34(2): 358-370.
- [45] 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(4):743-753.
- [46] 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.
- [47] Sun Y, Zhang X B, Ren G Y, et al. Contribution of urbanization to warming in China. Nature Climate Change, 2016, 6(7): 706-709.
- [48] 肖宇昕,吴钰,方德贤,等.城市化对四川盆地夏季气温变化影响的观测和模拟研究.地球物理学报,2021,64(1):100-113.
- [49] Uran C, Jaeyeon C, Jin I Y. Urbanization effect on observed change in mean monthly temperature between 1951 - 1980 and 1971 - 2000 in Korea. Climate Change, 2004, 66(1-2): 127-136.
- [50] 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): 148-224.
- [51] Jones P D, Kelly P M, Goodess C M, et al. The effect of urban warming on the Northern Hemisphere temperature average. Journal of Climate, 1989, 2(3): 285-290.
- [52] Jones P D, Raper S C B, Bradley R S, et al. Northern Hemisphere surface air temperature variations: 1851 - 1984. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1986, 25(2): 161-179.
- [53] Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe. Science, 1997, 277(5324): 364-367.
- [54] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. A closer look at United States and

- global surface temperature change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 – 2012), 2001, 106(D20): 23947-23963.
- [55] 任玉玉. 城市化对北半球陆地气温观测记录的影响. 北京: 北京师范大学, 2008.
- [56] Marotzke J, Jakob C, Bony S, et al. Climate research must sharpen its view. *Nature Climate Change*, 2017, 7(2): 89-91.
- [57] 崔林丽, 史军, 周伟东. 上海极端气温变化特征及其对城市化的响应. *地理科学*, 2009, 29(1): 93-97.
- [58] 郑祚芳. 北京极端气温变化特征及其对城市化的响应. *地理科学*, 2011, 31(4): 459-463.
- [59] 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.
- [60] 张小玲, 刘梦娜, 青泉, 等. 1960—2018年成都地区极端气温变化及城市化贡献分析. *高原山地气象研究*, 2022, 42(1): 10-17.
- [61] Kim J U, Byun Y H, Kim J W, et al. Characteristics of urbanization effects due to recent urban population changes in South Korea. *Journal of Climate Change Research*, 2021, 12(6): 677-689.
- [62] Wang J, Tett S F B, Yan Z W. Correcting urban bias in large-scale temperature records in China, 1980 – 2009. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 401-408.
- [63] Hansen J, Ruedy R, Glascoe J, et al. GISS analysis of surface temperature change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 – 2012), 1999, 104(D24): 30997-31022.
- [64] 张爱英, 任国玉. 国家基本基准站地面气温序列中城市化影响的检测与订正. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.
- [65] Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. *Journal of Climate*, 2008, 21(6): 1333-1348.
- [66] Choi J, Chung U, Yun J I. Urban effect correction to improve accuracy of spatially interpolated temperature estimates in Korea. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, 42: 1711-1719.
- [67] 温康民, 任国玉, 李娇, 等. 国家基本/基准站地面气温资料城市化偏差订正. *地理科学进展*, 2019, 38(4): 600-611.

(上接5页)

toc/10.1002/(ISSN)1477-870X.aeolus), 持续收集相关论文便于读者阅读。

### 3 结果与讨论

QJ走过的150年, 成为全球学者高度认可的反映气象和大气科学及相关领域最新进展的权威窗口。2021年以后, QJ的影响因子快速提升, 从之前的不到5达到接近10, 凸显了这份历史悠久的期刊, 始终保持的学术活力。

QJ是典型的国际化期刊, 其刊载的大量具有转折点意义的论文, 得到了全球学术界的高度认可。表2

表2 QJ投稿按照主要来源国家和地区分布

序号	国家和地区	投稿数量/篇	占比/%
1	英国	290	17.4
2	中国	244	14.7
3	美国	204	12.3
4	印度	180	10.8
5	德国	136	8.2
6	法国	83	5.0
7	澳大利亚	42	2.5
8	日本	33	2.0
9	意大利	31	1.9
10	加拿大	30	1.8
11	瑞士	29	1.7
12	挪威	28	1.7
13	伊朗	23	1.4
14	韩国	23	1.4
15	荷兰	23	1.4
16	阿根廷	18	1.1
17	奥地利	17	1.0
18	巴西	17	1.0
19	西班牙	15	0.9
20	以色列	14	0.8

给出最近5年(2019—2023年)QJ主要投稿来源按照国家和地区分布。虽然来自期刊主办国英国的投稿数量最多, 但与排在2~4位(占比均超过10%)的中国、美国和印度相比, 差距并不大。即使按照大洲分布来看, 由于亚洲的中国、日本、韩国学者投稿踊跃, 美国、澳大利亚和加拿大等气象强国学者对其也很重视, QJ的“欧洲”特征被模糊。尤其是, 来自伊朗、阿根廷和巴西等国家的投稿占据一定比例, 是很难得的。

QJ鼓励世界各地学者投稿高质量的文章, 作者无需支付任何出版费用, 这对于发展中国家学者和依然主要靠兴趣的研究者尤其重要。QJ还受到中国学者的高度重视, 近年来不仅投稿和发表论文数量增加(见本期封三文章), 还是中国学者引用国际成果最多的来源期刊之一。

#### 深入阅读

- Baldwin M P, 2023. The stratosphere. *RMetS Quarterly Journal: Celebrating 150 Years*, London, 13 September 2023.
- Golding B, 2023. Numerical weather prediction: the quest for accurate rainfall forecasts. *RMetS Quarterly Journal: Celebrating 150 Years*, London, 13 Sep 2023.
- Haigh J D, 2023. Advances in climate science through the pages of the QJ. *RMetS Quarterly Journal: Celebrating 150 Years*, London, 13 Sep 2023.
- Pourret V, Šavli M, Mahfouf J F, et al, 2022. Operational assimilation of Aeolus winds in the Météo-France global NWP model ARPEGE. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(747): 2652-2671.
- Ross A N, Methven J, 2023. Introduction to the QJ@150 Anniversary Collection. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(754): 1541-1545.
- Woollings T, 2023. Rossby waves in the Quarterly Journal. *RMetS Quarterly Journal: Celebrating 150 Years*, London, 13 Sep 2023.

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)