

城市化对地面气温变化趋势影响研究综述

任玉玉¹,任国玉¹,张爱英²

(1. 国家气候中心,北京 100081; 2. 北京市气象科技服务中心,100089)

摘 要:在综述城市化对地面气温资料序列影响研究进展的基础上,总结评估了不同空间尺度上地面气温序列中城市化影响的性质和强度。在城市台站和局地尺度上,多数研究均发现城市化对地面气温序列影响明显;区域尺度的研究主要集中在中国、美国和欧洲等少数地区,研究结果存在较大的差异,但采用严格遴选乡村站资料的分析都得到了城市化影响很明显的结论。在中国大陆地区,国家级气象台站年平均地面气温的上升趋势中,至少有27.3%可归因于城市化影响;对于全球或半球陆地平均气温序列而言,研究工作还很不充分,但一般认为城市化影响较小,可能不超过总增温的10%。现有研究还表明,城市化对地面气温序列的影响随时间和区域有不同的表现;城市化对包括中国在内的东亚地区近半个世纪长序列地面气温趋势的影响是非常显著的,但对欧洲地区的明显影响可能主要发生在20世纪早期甚至19世纪后期。目前的研究仍然存在一些问题和困难,其中包括研究覆盖的区域和时间段有限、乡村站遴选标准不统一、城市化影响偏差订正方法有待完善等。

关 键 词:城市化;地面气温;城市热岛效应;气候变化;中国;美国;欧洲

1 引言

气温观测资料是气候变化研究中的基础数据。但是,地面气温观测资料仍存在若干误差。例如,观测规范变化、仪器更换、迁站等引起的资料序列非均一性,城市站地面气温记录中的城市热岛效应影响等,都会使研究结果出现明显偏差^[1-3]。在各种误差中,城市热岛效应引起的台站地面气温观测值系统偏高,对于气候变化分析有重要影响。城市的发展促使城市区域下垫面性质发生变化,影响到能量收支,致使城市区域的地面气温不断升高,而热力结构和下垫面构成的变化还可导致热岛穹窿,影响郊区气温^[4]。城市及其附近地区气象站的观测记录下了这种变化。由于城市区域只占地球表面很小一部分,城市化对地面气温的影响仅代表一种局地人为气候效应,分析区域及以上尺度的气候变化,及其对农业和水资源等部门的影响,均需要了解城市之间占陆地面积99%以上的旷野和乡村区域的气候变化趋势。

充分认识、合理订正单站和区域平均气温序列中的城市化影响,已经成为气候变化检测和影响研究亟待解决的重要问题。因此,本文对气象台站地面气温观测记录中城市化影响性质和强度的研究

结果进行总结,并对存在的一些问题进行了初步探讨,以期推动相关研究进展。

城市化对地面气温记录影响的研究最初始于单个案例城市。1833年Howard第一次记载了伦敦城市中心与郊区温度的不同^[5];Manley在1958年首次提出城市热岛(Urban Heat Island)的概念^[6]。20世纪80年代中期开始,人们认识到城市化影响偏差对于区域气温变化检测的重要性^[7]。20世纪末,Hansen对全球陆地气温变化中的城市化影响偏差进行了分析和订正^[8-9]。21世纪以来,不同学者利用多种方法对中国地区地面气温记录中的城市化影响进行了研究^[10-34]。

不同地区的城市发展过程和阶段不同,城市化对地面气温记录的影响也有差异。气象站地面气温记录中的城市化影响对区域空间尺度非常敏感。所以,本文按研究区域的空间尺度,将地面气温记录中城市化影响的分析评价划分为单站案例研究、区域尺度研究和全球/半球尺度研究,并分别评述其研究进展。此外,本文还简要评价了有关地面气温记录中城市化影响偏差订正的少量工作。目前对区域尺度的研究结果争议较大,而区域尺度研究对于气候变化检测和气候变化影响与适应性评价又十分重要,因此,本文进行了重点总结。

收稿日期:2009-11; 修订日期:2010-07.

基金项目:国家科技支撑项目(2007BAC03A01,2007BAC29B02);中国气象局气候变化专项(2010-2200509)。

作者简介:任玉玉,女,博士,助研。E-mail: renyuyu@126.com

2 单站案例研究

单站案例研究大多是通过对比某个城市站和附近村镇站地面气温观测资料序列的差异,确定城市化对气温变化趋势的影响^[25,27-31,35-38]。还有研究利用探空资料(850 hPa)作为背景观测序列,对比分析气象站地面气温记录中的城市化影响^[39-40]。对北美和东亚案例城市站的研究大多在近几十年的地面气温序列中发现了明显的城市化增温现象。例如,Roden发现1861—1964年间美国西部的3个大城市站增温趋势显著,而乡村站和小城镇站没有明显的增温^[35];此外,在美国Fairbanks^[36]和Tucson^[37]城市站的气温序列中均发现了明显的城市化增温;相对于乡村站,韩国首尔在1973—1996年呈现0.56℃的增温^[38];近年来对北京、天津、上海、武汉、昆明等地区的研究均发现显著的城市热岛增温^[25-34,41-43];北京地区的2个国家基本、基准站(北京站和密云站)城市化增温率为0.16℃/10a,占同期两站平均增温的71%,成为观测的气温变化的主要原因^[26];对北京和武汉两个案例城市的研究表明,年平均地面气温变化趋势的65%~80%可由增强的城市热岛效应解释^[31];Kataoka等发现,1951—2005年间汉城、东京和台北等大城市站由于城市化造成的增温为1.0~2.0℃,但改用城市周围CRU的网格化数据序列来代替乡村站序列,得出的城市化增温比实际的城市化增温明显偏小^[44],说明在CRU网格数据集中也仍然存在部分城市化影响。

对欧洲城市的研究呈现不同的结果。例如,Böhm在维也纳3个城市站气温序列的分析中,仅发现一个站在1951—1995年的45年中有0.6℃的城市化增温^[45];Jones等对维也纳和伦敦城市站与邻近乡村站1961—2006年地面气温序列的对比研究发现,城乡站点增温速率没有显著差异^[33]。但是,其他研究则表明20世纪初—20世纪中叶,欧洲城市化对器测气温记录有明显影响^[46-47]。Jones等研究发现,近几十年欧洲城市站气温记录在数值上明显高于乡村站^[33],由于城乡站大致位于相似高度,这暗示城市化增温可能主要发生在研究时段之前。

单站案例研究可以提供不同类型城市站城市化增温速率及其季节性等细节信息,对于了解局地尺度地面气温记录在多大程度上受到城市化影响有帮助。但是,受站点具体位置和城市规模影响,这类研究结果一般不适宜推广到区域及大陆尺度。

为了检测区域和全球平均地面气温变化趋势,在城市化对地面气温记录影响很大的区域,需要对这种影响的偏差进行订正,获得消除了城市化影响的单站地面气温资料序列。但是,迄今对城市化影响的订正研究还比较少,目前还没有令人满意的订正方法。已有的工作主要可以分为利用模型和利用乡村站序列进行订正两种。案例城市研究多利用模型进行订正。常用模型可以简单归纳为数学模型和物理模型两类^[14]。单个城市可以利用社会经济参数(如建成区面积、人均公路里程、能源消耗量、每千人公交车数量、私人汽车数量等)对城市热岛强度进行统计回归处理^[18-19],得到订正值。除此之外,还有研究利用物理模型或者中尺度模式模拟城市热岛效应,从理论上揭示热岛效应产生和发展的机制^[14-15]。但这些模型大多是对某一城市简化后的情景模拟,与实际情况还有差别,且通用性较差。

3 区域尺度研究

区域尺度研究一般是通过各种方法筛选出研究区的乡村站,然后对比不同类型台站的区域平均地面气温序列,认为不同气温序列之间的差异即为城市化对区域气温序列的影响,并对其进行相应分析。显然,选择一定数量的地面气温乡村站是开展这类研究的关键。但对于怎样选择乡村站,以及选择多少乡村站,不同的研究者采用了不同的策略和标准,对于同一地区获得的分析结果往往也有较明显的差异。城市化对区域平均气温序列的影响研究大多集中在美国和东亚地区。

北美的早期研究主要依靠人口作为区分城市和乡村站的依据,对城乡气温变化的差异进行分析。研究发现,美国本土或北美地区地面气温观测记录中确实存在明显的城市化影响。Cayan等对1933—1980年美国西南地区的研究发现,城市站30~50年的线性趋势比非城市站、700 hPa无线电探空仪和海平面温度的趋势高1.0~2.0℃^[48]。Kukla等分析了北美洲34对城乡对比站的温度变化差异,认为1941—1980年的增暖(0.3~0.4℃)中约有30%(约0.12℃)是由城市化影响造成的^[49];Karl等^[50]利用人口与城市热岛强度之间的统计关系,分析美国HCN(Historical Climate Network)、CRUT(Climatic Research Unit Temperature)^[51]和GISS(Goddard Institute for Space Studies)^[52]3套地面气温数据集中的

城市化影响,发现HCN序列中1901—1984年城市热岛的影响为 0.06°C ,而且人口低于1万的聚落也可以观测到城市化对气温的正向影响,随聚落人口规模增加(>1万、>10万、>100万),城市化影响程度也随之增加(0.11°C 、 0.32°C 、 0.91°C)^[7];CRUT美国地区20世纪的平均气温序列中城市化造成的温度偏差为 0.1°C ;GISS等温度序列中的城市化增温为 $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}$,大于同期美国地面气温的总体变化趋势。

随着新技术的推广,新数据、方法不断应用于研究中。例如,一些学者开始利用遥感获取的夜间灯光影像,结合大比例尺地图、人口数据等资料遴选乡村站点,对美国地面气温记录中的城市化影响进行了分析,但得到的结论并不一致。例如,Gallo等依靠夜间灯光强度、地图与人口以及对观测者的调查等方法遴选分类美国的乡村、郊区、城市站点,分析对比各种气温序列之间的差异,发现台站筛选方法会影响区域气候变化研究的结果^[53]。Peterson等对比美国40组城市和乡村站1989—1991年地面气温记录,发现不存在显著的差异,并认为那些发现城市化对地面气温观测记录有显著影响的研究,可能是因为没有采用均一化订正的数据造成的^[54]。

此外,Epperson等利用高空和卫星观测资料分析城市化对全美地面气温观测的影响,研究结果表明,截至20世纪80年代末,城市化对月最低气温、平均气温和最高气温的影响值分别为 0.40°C 、 0.25°C 和 0.10°C ^[55]。Kalnay等使用NCEP/NCAR再分析资料和实测资料的气温变化趋势差来指示实测资料中城市化或土地利用等因素对地面气温变化的影响,发现1950—1999年城市化或土地利用变化对气温变化的影响为 $0.27^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ ^[56]。

还有研究分析了城乡地面气温差异的影响因素。例如,Gallo等利用遥感资料对城乡地面气温差异进行的研究发现,植被指数(NDVI)与城乡最低气温的差异之间存在线性关系,地表辐射温度与之也有类似的关系,不过相关性稍差。NDVI能够解释月城乡最低气温差异变化的37%,人口可以解释29%,NDVI每增加0.1,最低气温的差别就降低 0.9°C ;3—6月,地表辐射温度对城乡温差的拟合效果较好,而7—10月NDVI的效果更好一些^[57-59]。

中国大陆地区是另一个研究热点区域。Wang等^[60]对中国各类台站地面气温记录的分析发现,1954—1983年中国城市热岛强度为 0.23°C ,东部地区城市站($0.36^{\circ}\text{C}/30\text{a}$)和乡村站($0.24^{\circ}\text{C}/30\text{a}$)有明显

的增温差异;赵宗慈对不同等级城市气温变化的研究也发现,1951—1989年大城市增温 0.48°C ,全国平均增温 0.2°C ,小城市站(乡村站)增温 0.04°C ,差异明显^[61];Portman使用华北地区21个城市站和8个乡村站1954—1983年资料进行的对比研究则认为,城市与乡村气温序列有显著的差异^[62];

20世纪90年代开始,多数研究开始关注中国城市化对地面气温序列的影响,但得到的结论有较大的差异。Jones等^[63]、Li等^[16]和He等^[32]对中国地面气温序列的研究均没有发现显著城市化影响。朱瑞兆等认为,城市热岛效应对中国地面气温观测记录有明显影响^[64];黄嘉佑等发现,中国南方沿海地区热岛效应造成的年平均气温与自然趋势的差值约为 $0.064^{\circ}\text{C}/\text{a}$,其中秋季最低^[17];Zhou等和Zhang等认为城市化和土地利用变化等因素对地面气温记录造成了明显影响^[65,66];周雅清等使用台站附近聚落区人口和站址具体位置等信息,从华北地区所有气象台站中选择乡村站,对比分析不同类型台站与乡村站平均地面气温序列的差异,发现1961—2000年城市热岛效应加强因素引起的国家基本、基准站年平均气温增暖达到 $0.11^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,占全部增暖的37.9%^[24]。

新的方法也被应用于中国地区背景气候场的计算和分离。Zhou等和Zhang等借鉴Kalnay等^[56]的方法,利用NCEP/NCAR再分析资料计算研究区未受城市影响的背景气温变化^[65-66];黄嘉佑等通过分析高空大气环流的自然变化与城市气温自然变化的关系,提取气温变化中的自然背景值,从而得到城市热岛效应引起的气温变化^[17];He等^[32]利用所选择的乡村站资料插值计算城市所处位置的气温数值,对比1990—2000年城市站记录与插值所得数值的差异发现,冬季黄、淮、海平原和长江三角洲地区的城市化影响最大,但就全国平均而言城市化对气温记录的影响不明显;Jones等利用中国东部海面温度作为背景温度,对比分析发现CRUT气温序列中1951—2004年中国东部地区城市化增温为 $0.11^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,占全部增温的40%,尽管他们仍不认为这种影响是显著的^[33]。最近,张爱英等采用更严格的标准遴选乡村站^[67-68],应用经过均一化订正的月平均气温数据,通过对比分析中国614个国家基本/基准站和138个乡村站地面气温变化趋势,发现1961—2004年全国范围内国家基本/基准站地面年平均气温序列中的城市化增温率为 $0.076^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,占

同期全部增温的27.33%。在他们划分的全国6个区域中,除北疆区外,其他地区年平均城市化增温率均非常显著,江淮地区尤其明显,其年平均热岛增温率达到0.086℃/10a,城市化增温贡献率高达55.48%。城市化造成的全国全部国家级台站地面增温幅度在冬季和春季最明显,而城市化增温贡献率在夏季和春季最大。这项研究表明,在目前中国大陆广泛应用的地面气温数据集中,城市化造成的增温偏差是很显著的。

在中国更局地区域的案例研究中,大多发现城市热岛强度增强因素对当地平均地面气温记录具有不可忽略的影响,需要在气候变化检测和原因分析中给予更多注意^[21,69-72]。中国华中地区和西南地区尽管总体变暖趋势较弱,但国家站地面气温记录中的城市化影响同样十分显著^[21,73]。

表1列出了针对中国地区地面气温资料序列中城市化影响研究的若干代表性结果。由于所用资料、乡村站选择标准和分析时段与地区不同,这些研究结果存在比较明显的差异。但是,大多数研究,特别是近年采用更密集站网资料 and 更严格乡村站遴选标准的研究,一般表明城市化对中国各类城市站和国家级台站地面年和季节平均气温观测记录具有明显的影响。

综合已有的研究,城市化对器测时期地面气温的影响在不同地区、不同时间有不同表现。城市化对气温序列具有显著性影响开始的时间不同,同一时间段城市化影响的强度也有所不同。例如,周雅清等^[24]和Portman^[62]研究结果的对比说明,华北平原地区城市化对地面气温序列的绝对影响可能具有随时间上升的趋势。按此趋势逆推,在1950年以前华北地区气温序列中城市化的影响应当很小。Balling等对欧洲长序列气温记录的研究发现,在1890—1950年的60年中,地面气温增温与城市化或者其它区域因子有明显的相关^[47]。任玉玉的研究发现,中国中东部地区气温记录中出现显著城市化影响的时间晚于欧洲地区^[46]。张爱英等的研究中,也发现中国地面气温序列中的城市化影响有着明显的区域差异^[67]。

此外,一些研究者对韩国、日本等其他东亚地区器测气温记录进行的分析也大多发现了明显的城市化影响。Cho等对1911—1985年地面气温数据的分析发现,韩国城市区域扩张与增温趋势之间有明显的关系^[74],其中日最低气温数据

与插值的格点数据比较会有2.0℃左右的偏差^[75-76]。Chung对比韩国区域1951—1980年和1971—2000年的地面气温序列发现,除4月外,城市化对各月平均气温变化均有显著影响,影响范围在0.3~0.6℃,认为区域气候变化的研究必须建立在剔除了城市化影响的资料集的基础上^[77]。日本气候中心也发现了城市化对日本气温记录的显著影响^[78]。

在其他大陆地区,对阿根廷和南非地区CRUT记录的研究也发现了明显的城市化影响^[79-81],说明CRUT数据对当地平均气温上升趋势的估计偏高了。另外,Camilloni等对美国、阿根廷和澳大利亚的研究认为城乡的温度差异与乡村站温度呈负相关。乡村站增温的时段,部分站点的城乡温差出现下降的趋势;在乡村站降温的时段,这种负相关更

表1 对中国地面气温资料中城市化影响的部分研究结果
Tab.1 Research results on urbanization effects on China's surface air temperature series

作者	研究区域	研究时段	站点类型	温度变化 /(℃/10a)	城市化增 温/(℃/10a)
Wang, 等 ^[60]	东部地区	1954—1983	乡村站	0.08	-
			城市站	0.12	0.04
Jones, 等 ^[63]	东部地区	1954—1983	乡村站	0.08	-
			城市站	0.13	0.05
赵宗慈 ^[61]	全国	1951—1989	CRU 格点	0.06	-0.02
			>100 万人	0.07	0.06
			100~50 万人	0.12	0.11
			50~10 万人	0.05	0.04
			1~10 万人	0.03	0.02
			<1 万人	0.01	-
			基准站	0.05	0.04
Portman ^[62]	华北平原	1954—1983	乡村站	-0.02	-
			小城市站	0.02	0.04
			大城市站	0.08	0.10
			>100 万人	0.29	0.38
黄嘉佑, 等 ^[17]	南方沿海地区	1951—2001 (气候自然变化与城市热岛效应之和)	100~50 万人	0.31	0.46
			50~30 万人	0.31	0.45
			30~10 万人	0.27	0.50
			10~3 万人	0.33	0.55
			<3 万人	0.29	0.64
			基准基本站		<0.0012
Li, 等 ^[16] 周雅清, 等 ^[24]	全国 华北地区	1954—2001 1961—2000	乡村站	0.18	-
			基本基准站	0.29	0.11
			小城市站	0.25	0.07
			中等城市站	0.28	0.10
			大城市站	0.34	0.16
			特大城市站	0.26	0.08
陈正洪, 等 ^[21]	湖北	1961—2000	乡村站	0.03	-
			基本基准站	0.12	0.09
唐国利, 等 ^[73]	西南地区	1961—2004	全部站点	0.14	0.11
			乡村站	0.06	-
任玉玉 ^[46]	中东地区	1951—2004	基本基准站	0.12	0.06
			乡村站	0.17	-
张爱英, 等 ^[67]	全国	1961—2004	基本基准站	0.23	0.06
			乡村站	0.20	-
白虎志, 等 ^[72]	甘肃	1961—2002	基本基准站	0.28	0.08
			城市站	0.38	0.15
			乡村站	0.23	-
			基本基准站	0.29	0.06

加明显^[79]。

利用统计模型对区域尺度城市化影响偏差进行订正时,大多采用人口数据进行拟合分析,得到城市热岛强度。例如,Karl等^[7]、Choi^[75]分别利用人口对美国和韩国气温记录中的城市化增温偏差进行了订正。黄嘉佑等也发现中国南方沿海地区台站城市热岛效应与人口数之间存在显著相关^[17]。但是,统计模型的通用性较差,不同地区城市人口与城市热岛强度之间的关系差异明显^[82-83]。而且,人口数据在不同地区的统计口径和统计时间不同,数据连续性较差,对研究结果的可信性均具有一定影响。有研究认为,人口只能部分地解释站点之间的差异^[58,84]。

因此,利用周围乡村站序列对目标城市站序列进行订正是最合理的。这种方法主要是依据乡村站趋势值对城市站的线性增温趋势做订正,计算城市站序列和乡村站序列气候倾向率的差异,即城市化增温;假定城市化增温在研究时段内是线性增加的,逐年计算订正值,得到剔除城市化影响后的气温序列^[24,62]。

综上所述,在近几十年城市化发展迅速的地区,城市热岛效应对区域气温记录有较为明显的影响。考虑到城市区域范围有限,对相关地区开展区域尺度气候变化检测研究和气候变化影响研究时,需谨慎选择气象站点,或者采用经过城市化影响订正的站网地面气温资料。

4 全球/半球尺度研究

随着空间尺度的扩大,特别是在全球或者半球尺度上,研究的难度也越来越大。主要原因是不同国家和地区的城市化进程差异明显,很难采用统一的标准和方法遴选乡村站。目前的研究多利用人口或者卫星夜间灯光资料对观测台站所在聚落区进行分类,将位于人口较少、夜间灯光强度弱的区域的站点做作为乡村站;或者通过对案例区的研究结果推测全球或者半球的情况。

Karl等利用人口数据筛选乡村站进行研究发现,剔除1970年人口超过10万的站点后,全球20世纪(Hansen数据集)平均的增温趋势大约降低 0.1°C ,城市化对全球范围的影响远小于对美国地区的影响^[52]。Jones等利用Karl方法对Jones^[50]美国序列中城市化增温进行计算,结果显示在1920-1980

年由于城市化造成的气温偏差为 0.08°C ^[85]。Jones等^[63]没有发现中国东部、澳大利亚东部、俄罗斯和美国四个地区CRUT数据与乡村站记录有明显差异,因此,Jones等认为CRUT数据集中城市化影响较小。此外,对比这几个典型地区人口增长情况,他们推测该数据集中20世纪北半球陆地年平均气温序列中由城市引入的增温不超过 0.05°C ,不到全球陆地平均增温的1/10。这个结论具有深远的影响,IPCC SAR、TAR和AR4均采用了这一研究结论,并认为在全球尺度上城市化造成的增温比观测到的全部增温趋势小一个数量级。IPCC AR4认为城市热岛效应的影响是存在的,但这种影响具有局地性,不会对近50年或近100年的全球升温造成影响,在全球陆地上小于 $0.06^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ ^[86]。

迄今多数全球尺度研究支持Jones等^[63]的结论。Easterling等认为,就全球平均来说,20世纪城市热岛效应对最高、最低气温升高的贡献均不超过 $0.01^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[87];Peterson等利用地图和卫星夜间灯光资料选择乡村站,建立全球平均陆地气温序列。所建序列与全部站点所建序列在趋势上没有显著的差异^[88]。Hansen等对5万人以上的城市依据附近乡村站的记录进行订正,对比乡村站、小城镇站和未订正的城市站序列、以及未进行城市化订正的全部站点序列,指出城市化对20世纪地面气温趋势的影响不会超过 0.1°C ,相比于全球变暖,城市化的影响有限;大部分格点的城市化影响订正小于或者约等于 0.1°C ;此外,Hansen认为城市化在区域尺度的影响要比在全球尺度的影响明显^[8-9]。

此外,一些相关研究也得到城市化对全球器测时期地面气温没有显著影响的结论。例如,Parker发现全球和区域不同风速下地面气温变化的趋势没有显著的差异,结合已有的研究结论,即城市化影响在静风条件下最明显,大风条件下最小,Parker认为城市化对观测到的增温影响很小^[89]。

但是,Wood对Jones等^[50]广泛应用于半球或全球变暖研究中的地面气温序列提出了质疑,认为此数据集在建立过程中还存在很多的不确定性,城市化的影响可能还保留在现有温度序列中^[90]。

目前对全球尺度上的城市化影响进行的订正主要依靠可靠的乡村站序列。Hansen等在建立全球序列时,对城市站序列的订正采用了两段式方法,即在上述区域订正方法基础上分两个时间段分别依据乡村站观测进行线性订正,使订正后城市站

与乡村站序列差异最小^[8-9]。但是,总体上,在全球和半球尺度上开展城市化影响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,仅在平均气温序列的误差分析时考虑这种随时间增大的偏差。

因此,在全球和半球大陆尺度上,城市化对平均地面气温序列的影响可能比较弱。不同陆地地区之间存在较显著的差异,这种差异不仅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,也体现在显著城市化影响开始出现的时间上。欧洲和美国等发达国家最显著城市化影响出现的时间比中国等发展中国家和地区来得早。

5 结论、问题与建议

综上所述,单站序列的对比分析多发现明显的城市化影响;在区域尺度分析上,美国和东亚地区常用的地面气温数据集中,城市化影响也是很明显的。一些研究没有发现这种影响,主要是因为研究者采用的乡村站序列代表性不够;在全球和半球尺度上,多数研究认为城市化的影响可能比较小,但是否小到可以忽略不计的程度,目前还没有确定研究结论。现有研究还表明,城市化对地面气温序列的影响随时间和区域有不同的表现,在东亚地区,近半个世纪长序列地面气温趋势中城市化的影响是非常显著的;但在欧洲等发达国家和地区,城市化的明显影响可能主要发生在20世纪中期之前。

有研究者认为,城市站点多在公园和机场,而公园具有“冷岛”效应,机场多在郊区,因此城市站记录到的城市热岛效应影响应该不明显^[54]。这种情况在美国等西方国家可能发生,但城市热岛效应主要是城市边界层内热空气穹隆笼罩作用的结果,市内公园和郊区机场可能仍然无法完全摆脱城市化影响^[4]。另外,Peterson还提出,在气温资料经历了均一化订正以后,城市化影响也明显变弱了^[54]。但是,这种情况也没有出现在中国和欧洲。中国华北^[24,91]和全国^[67]地面气温资料在均一化订正后,其城市化影响往往还被恢复了。Parker的研究也认为均一化订正对城市热岛强度的计算不会产生显著的影响^[89]。

目前对地面气温序列中城市化影响的研究仍存在问题。首要的问题还是乡村站的遴选原则和方法。综观国内外有关城市化对地面气温

序列影响的研究,所采用方法多种多样。但遴选出不受城市影响的乡村站,对城乡站气温序列的趋势差异进行研究,是当前研究城市化对地面气温序列影响偏差问题的最可靠方法^[92]。

显然,单站基础上的城、乡站序列对比研究是最可靠的方法,结果具有较高可信性。但是,这类研究的关键是临近目标站的乡村站或参考站的遴选,目前的遴选方法和标准很不一致,分析结果有较大差异。在城、乡站对比研究中选择乡村站的方法可分为以下4种:①就近选择:根据台站位置和聚落规模,通过主观判断就近选择城市附近村镇气象站^[22,27-28,42,93],或者利用同站探空资料,设定对流层低层为参考观测序列^[39-40];②根据人口遴选乡村站:规定附近聚落人口总数或者人口密度小于某一阈值的台站为乡村站^[17,24,61-64];③利用卫星影像资料选择:根据卫星夜间灯光强度或大比例地图等资料选择目标站附近的乡村站^[8-9,88];④数学方法:根据EOF分析和空间插值等温线等方法识别乡村站^[17,26,94]。

前3种方法依靠各种来源数据对台站附近聚落进行分类,识别出乡村聚落,进而间接选择乡村站。利用人口指标选择乡村站的参数设置比较主观,而且既不能反映观测场周边环境对观测记录的影响,也不能客观反映“乡村站”是否处于附近城市热岛效应的影响区域内,因此得到的参考站可能并不是典型的乡村站;城市夜间灯光的强度受经济发展水平、消费观念和城市扩张方式的影响,在不同国家和地区之间缺乏可比性,而且也不能反映测站观测场附近的环境情况;利用数学方法划分城市影响区可直接地反映台站是否受城市化影响,但是大部分地区站点密度不够,进行空间插值误差较大。

由于乡村站遴选方法差异明显,再加上使用的站点数量和密度不同,不同研究结果往往具有较大的差异。中国东部平原地区人口密度大,气象站点的设置与欧美不同,很少设置在真正的乡村或机场,台站地面气温观测记录对城市化比较敏感,因此乡村站的选择方法就尤为关键。在已有的研究中,乡村站选择标准很不统一。在利用人口资料的研究中,对乡村站人口数的限定有1万、5万和10万等几种,对迁站、观测场具体位置等的要求也不一致。例如,以5万人口作为乡村站的上线(山东省除外),同时考虑站址具体位置,周雅清等从华北地区全部站点(包括国家级台站和一般站)中仅选择22%的站点作为乡村站^[24];而Li等把10万以下人口同时

测站在“郊区”作为遴选标准,各地选出的乡村站数量在国家级台站中均超过50%,其中东北和华北地区、长江中下游地区乡村站数量占国家级台站数的比例更超过70%和57%^[16]。乡村站遴选标准的不同导致了研究结果的显著差异。

研究表明,在聚落由1万~10万人口逐步发展中,气象站点地面气温记录始终有城市化影响^[95];Karl等认为,1万左右人口的聚落附近气象站就会感受到城市化影响^[7]。因此,相对宽松的乡村站选择标准无疑会将部分城市化影响引入到乡村站序列中,导致目标站地面气温变化中城市化影响的估计结果偏低^[96]。

使用NCEP/NCAR等再分析资料和实测资料的趋势差,来分析地面实测资料中城市化或土地利用等因素对气温变化的影响,最近得到几个研究组的采纳^[20,56,65]。这种方法有一定合理性。但由于参考序列和目标序列不是同一性质的资料,NCEP/NCAR再分析资料中也没有考虑云的因素,地面热量收支平衡当中还存在一定误差^[97],加之所使用的地面观测资料没有对由于仪器和观测时间变更所造成的非均一性进行订正^[98],这些研究受到不少质疑。但是,这种方法经过改进有潜力作为检测城市化影响的一个有效技术之一。

未来的研究需要寻找能直观精确反映测站与城市影响区相对位置和测站周围环境的乡村站点遴选方法,并对其他观测站点进行客观分类,准确地评价城市化对各类台站地面气温观测记录的影响。采用详细的站史资料和精准的站址经纬度位置资料,以及高分辨率卫星、航空图片资料和大比例尺地图资料,结合历史人口和城市土地利用变化资料,有望获得有代表性的乡村站点。在单站和区域尺度上,上述各种资料都比较容易获得;在全球和半球陆地尺度上,利用高分辨率卫星遥感资料,开发遴选乡村站通用方法,可能是比较现实选择。

最后,已有的研究在空间和时间覆盖上还有很大的局限性。目前尚没有覆盖全球各个区域的可靠分析结果,也缺少对20世纪中期以前城市化影响的系统评价。由于城市化对气温序列的影响在不同时间、不同地区有不同的表现,因此今后还需要开展对几个热点地区以外区域的独立研究,得到覆盖全球陆地所有地区的研究结果和经过城市化影响偏差订正的数据集,以供相应的气候变化检测、气候模式检验和气候变化影响研究使用。当

然,在检测出明显的城市化影响以后,如何合理有效地订正这种局地人类活动影响的偏差,仍是一个需要深入研究的问题。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 任国玉. 地表气温变化研究的现状和问题. 气象, 2003, 29(8): 3-6.
- [3] Folland C K, Rayner N A, Brown S J, et al. Global temperature change and its uncertainties since 1861. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(13): 2621-2624.
- [4] 徐祥德,卞林根,丁国安,等. 城市大气环境观测工程技术与原理. 北京:气象出版社, 2003: 11-43.
- [5] Howard L. *Climate of London Deduced from Meteorological Observations*. 3rd edition. London: Harvey and Dorton Press, 1833: 348.
- [6] Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1958, 84(359): 70-72.
- [7] Karl T R, Diaz H F, Kukla G. Urbanization: its detection and effect in the United States climate record. *Journal of Climatology*, 1988, 1(11): 1099-1123.
- [8] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. A closer look at United States and global surface temperature change. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 23947-23964.
- [9] Hansen J, Ruedy R, Glascoe J, et al. GISS analysis of surface temperature change. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D24): 30997-31022.
- [10] 邓莲堂,束炯,李朝颐. 上海城市热岛的变化特征分析. *热带气象学报*, 2001, 17(3): 273-280.
- [11] 何云玲,张一平,刘玉洪,等. 昆明城市气候水平空间分布特征. *地理科学*, 2002, 22(6): 724-729.
- [12] 杨玉华,徐祥德,翁永辉. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟. *应用气象学报*, 2003, 14(1): 61-68.
- [13] 李延明,张济和,古润泽. 北京城市绿化与热岛效应的关系研究. *中国园林*, 2004, 20(1): 72-75.
- [14] 卢曦. 城市热岛效应的研究模型. *环境技术*, 2003, 21(5): 43-46.
- [15] 陈燕,蒋维楣,吴润,等. 利用区域边界层模式对杭州市热岛的模拟研究. *高原气象*, 2004, 23(4): 519-528.
- [16] Li Q, Zhang A, Liu X, et al. Urban heat island effect on annual mean temperature during the last 50 years in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 79(3-4): 165-174.
- [17] 黄嘉佑,刘小宁,李庆祥. 中国南方沿海地区城市热岛效应与人口的关系研究. *热带气象学报*, 2004, 20(6): 713-722.
- [18] 陈志,俞炳丰,胡海洋,等. 城市热岛效应的灰色评价与

- 预测. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 985-988.
- [19] 孙越霞, 张于峰. 城市热岛现象的分析与机理研究. 暖通空调, 2004, 34(12): 24-28.
- [20] 江学顶, 夏北成. 珠江三角洲城市群热环境空间格局动态. 生态学报, 2007, 27(4): 1461-1470.
- [21] 陈正洪, 王海军, 任国玉, 等. 湖北省城市热岛强度变化对区域气温序列的影响. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 771-779.
- [22] 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.
- [23] 宫阿都, 江樟焰, 李京, 等. 基于 LandsatTM 图像的北京城市地表温度遥感反演研究. 遥感资讯, 2005, 79: 18-30.
- [24] 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.
- [25] 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 北京城市化进展与热岛强度关系的研究. 自然科学进展, 2005, 15(7): 882-886.
- [26] 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.
- [27] 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(1): 69-77.
- [28] 田武文, 黄祖英, 胡春娟. 西安市气候变暖与城市热岛效应问题研究. 应用气象学报, 2006, 17(4): 438-443.
- [29] 朱家其, 汤绪, 江灏. 上海市城区气温变化及城市热岛. 高原气象, 2006, 25(6): 1154-1160.
- [30] 张尚印, 徐祥德, 刘长友, 等. 近40年北京地区强热岛事件初步分析. 高原气象, 2007, 25(6): 1147-1159.
- [31] 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. Geophysical Research Letters, 2007, 34, L05711.
- [32] 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. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 90(3-4): 217-226.
- [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, D16122, doi:10.1029/2008JD009916.
- [34] 李书严, 陈洪滨, 李伟. 城市化对北京地区气候的影响. 高原气象, 2008, 27(5): 1102-1109.
- [35] Roden G I. A modern statistical analysis and documentation of historical temperature records in California, Oregon, and Washington, 1821-1962. Journal of Applied Meteorology, 1966, 5(1): 3-24.
- [36] Magee N, Curtis J, Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska. Theoretical and Applied Climatology, 1999, 64(1-2): 39-47.
- [37] Comrie A C. Mapping a wind-modified urban heat island in Tucson, Arizona (with comments on integrating research and undergraduate learning). Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(10): 2417-2431.
- [38] Kim Y H, Baik J J. Maximum urban heat island intensity in Seoul. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41(6): 651-659.
- [39] 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.
- [40] Ernesto J. Heat island development in Mexico City. Atmospheric Environment, 1997, 31(22): 3821-3831.
- [41] 郭军, 李明财, 刘德义. 近40年来城市化对天津地区气温的影响. 生态环境学报, 2009, 18(1): 29-34.
- [42] 王学锋, 周德丽, 杨鹏武. 近48年来城市化对昆明地区气温的影响. 地理科学进展, 2010, 29(2): 145-150.
- [43] 何萍, 陈辉, 李宏波, 等. 云南高原楚雄市热岛效应因子的灰色分析. 地理科学进展, 2009, 28(1): 25-32.
- [44] 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.
- [45] Böhm R. Urban bias in temperature time series: A case study for the city of Vienna, Austria. Climatic Change, 1998, 38(1): 113-128.
- [46] 任玉玉. 城市化对北半球陆地气温观测记录的影响[D]. 北京: 北京师范大学, 2008.
- [47] Balling R C, Vose R S, Weber G R. Analysis of long-term European temperature records: 1751-1995. Climate research, 1998, 10: 193-200.
- [48] Cayan D R, Douglas A V. Urban influences on surface temperatures in southwestern United States during recent decades. Journal of Applied Meteorology, 1984, 23(11): 1520-1530.
- [49] Kukla G, Gavin J, Karl T R. Urban warming. Journal of Applied Meteorology, 1986, 25(9): 1265-1270.
- [50] Karl T R, Jones P D. Urban bias in area-averaged surface air temperature trends. American Meteorological Society, 1989, 70(33): 265-270.
- [51] Jones P D, Raper S C B, Bradley R S, et al. Northern hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984. Journal of Applied Meteorology, 1986, 25(2): 161-179.
- [52] Hansen J, Lebedeff S. Global trends of measured surface air temperature. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(D11): 13345-13372.
- [53] Gallo K P, Owen T W. Satellite-based adjustments for the urban heat island bias. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38(6): 806-813.
- [54] 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.
- [55] Epperson D L, Davis J M. Estimating the urban bias of surface shelter temperatures using upper-air and satellite data. Part II: Estimation of the Urban Bias. Journal of Ap-

- plied Meteorology, 1995, 34(2): 358-370.
- [56] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528-531.
- [57] Gallo K P, McNab A L, Karl T R, et al. The use of a vegetation index for assessment of the Urban Heat Island Effect. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14 (11): 2223-2230
- [58] Gallo K P, McNab A L, Karl T R, et al. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the Urban Heat Island Effect. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32 (5): 899-908.
- [59] Gallo K P, Owen T W, Esaterling D R, et al. Temperature trends of the U.S. historical climatology based on satellite-designated land use and land cover. *Journal of Climate*, 1999, 12(5): 1344-1348.
- [60] Wang W C, Zeng Z, Karl T R. Urban heat island in China. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17: 2377-2380.
- [61] 赵宗慈. 近39年中国气温变化与城市化影响. *气象*, 1991, 17(4): 14-16.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 朱瑞兆, 吴虹. 中国城市热岛效应的研究及其对气候序列影响的评估//陈隆勋. 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第一集), 北京: 气象出版社, 1996: 239-249.
- [65] 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. U.S.A.*, 2004, 101(26): 9540-9544.
- [66] Zhang J, Dong W, Wu L, et al. Impact of land use changes on surface warming in China. *Advances in Atmospheric Science*, 2005, 22(3): 343-348.
- [67] 张爱英, 任国玉, 周江兴, 等. 我国地面气温变化趋势中的城市化影响. *气象学报*, 2010(4).
- [68] 任国玉, 张爱英, 初子莹, 等. 我国地面气温乡村站遴选的依据、原则和步骤. *气象科技*, 2010, 38(1): 78-85.
- [69] 曾侠, 钱光明, 潘蔚娟. 珠江三角洲城市群城市热岛效应初步研究. *气象*, 2004, 30(10): 12-16.
- [70] 张爱英, 任国玉. 山东省城市化对区域平均温度序列的影响. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 754-762.
- [71] 刘学锋, 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.
- [72] 白虎志, 任国玉, 张爱英, 等. 城市热岛效应对甘肃省温度序列的影响. *高原气象*, 2006, 25(1): 90-94.
- [73] 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, 19(6): 722-730.
- [74] Cho H M, Cho C H, Chung K W. Air temperature changes due to urbanization in Seoul area. *J Korean Meteor. Soc.*, 1988, 24(1): 27-37.
- [75] 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 (12): 1711-1719.
- [76] Yun J I, Choi J Y, Ahn J H. Seasonal trend of elevation effect on daily air temperature in Korea. *Korean J Agric For Meteor.*, 2001, 3(2): 96-104.
- [77] Chung U, Choi J, Yun J I. 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.
- [78] Japan Meteorological Agency. Climate change monitoring report 2007, 2008: 29-32.
- [79] Camilloni I, Barros V. 'Influencia de la Isla Urbana de Calor en la Estimación de las Tendencias Seculares de la Temperatura en Argentina Subtropical', *Geofísica Internacional*, 1995, 34(2): 161-170.
- [80] Camilloni I, Barros V. On the urban heat island effect dependence on temperature trends. *Climatic Change*, 1997, 37(4): 665-681.
- [81] Hughes W S, Balling R C. Urban Influences on South African Temperature Trends. *International Journal of Climatology*, 1996, 16(8): 935-940.
- [82] Oke T R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 1976, 14: 268-277.
- [83] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108(455): 1-24.
- [84] Peterson T C, Owen T W. Urban heat island assessment: metadata are important. *Journal of Climate*, 2005, 18 (14): 2637-2646.
- [85] 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.
- [86] IPCC 2007. The Fourth Assessment Report: Working Group I Report: "The Physical Science Basis". <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>
- [87] Easterling D R, Horton B, Jones P D. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 1997, 277: 364-367.
- [88] Peterson T C, Gallo K P, Lawrimore J, et al. Global rural temperature trends. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(3): 329-332.
- [89] Parker D E. A demonstration that large-scale warming is not urban. *Journal of climate*, 2005, 19(12): 2882-2895.
- [90] Wood F B. Comment: on the need for validation of the Jones et al. Temperature trends with respect to urban warming. *Climatic change*, 1988, 12(3): 297-312.
- [91] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进

- 展. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701-716.
- [92] Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548.
- [93] 白虎志, 张焕儒, 张存杰. 兰州城市化发展对局地气候的影响. *高原气象*, 1997, 16(4): 410-416.
- [94] Winkler J A, Skaggs R H, Baker D G. Effect of temperature adjustments on the Minneapolis-St. Paul urban heat island. *Journal of Applied Meteorology*, 1981, 20(11): 1295-1300.
- [95] 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.
- [96] Ren G Y, Zhou Y, Chu Z, et al. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. *Journal of Climate*, 2008, 21(6): 1333- 1348
- [97] Trenberth K E. Rural land use change and climate. *Nature*, 2004, 427: 213
- [98] Vose R S, Karl T R, Easterling D R, et al. Impact of land use change on climate. *Nature*, 2004, 427: 213-214.

An Overview of Researches of Urbanization Effect on Land Surface Air Temperature Trends

REN Yuyu¹, REN Guoyu¹, ZHANG Aiying²

(1. Laboratory for Climate Studies, CMA, National Climate Center, Beijing 100081, China;

2. Beijing Meteorological Science and Technology Service Center, Beijing 100089, China)

Abstract: Urbanization may have affected the surface air temperature records at many stations in continents, especially in industrial regions like Europe, North America and East Asia. However, this issue is still under debate at present, especially at regional and global scales. Based on an overview of researches on urbanization effects on surface air temperature series mostly in the continents of northern Hemisphere, the nature and intensity of urbanization effects at different spatial scales are summarized and assessed. At city and local scales, most studies have found obvious urbanization effects, with big cities showing the most significant urban warming. At regional scale, the studies focused on mainland China and the United States also have showed significant urban warming in varied extents, in spite of the fact that a few studies have claimed an insignificant urban bias. It is obvious that the researches with robust methods to select reference stations have generally found significant urbanization effect on surface air temperature trends. For global or hemispheric average temperature series, researches are far from enough at present, but they have mostly indicated that the urbanization effect may be minor or insignificant, and it may have not exceeded 10% of the total warming observed. Studies have also found that the urbanization effect changes over time and regions. In East Asia, including China, Korea and Japan, urbanization has had very significant impact on surface temperature trend during the past half a century, but in Europe the significant urbanization effect might have occurred in the early 20th century and even the late 19th century. At present, there are still many problems and difficulties on the study of urbanization effect on temperature series, including the limited areas and time periods studied, radically different selection criteria of reference stations and imperfect methodology for urban bias adjustment. To solve these problems in the near future will help promote the progress of research.

Key words: urbanization; surface air temperature; urban heat island; climate change; China; USA; Europe

本文引用格式:

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.