

城市化对极端高温事件影响研究进展

杨续超¹, 陈葆德², 胡可嘉¹

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030)

摘要: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,但对于极端高温—热岛效应相互作用、城市化对高温热胁迫及其健康后果的影响等研究还不够深入,在进行未来气候变化预估时也很少考虑城市的影响。在气候变化、中国城市化快速发展和人口老龄化的背景下,这将严重低估城市未来的变暖幅度以及城市极端高温的健康风险。随着近年来气候变暖所导致的高温热浪事件频发,城市化对极端高温事件的影响引起了广泛关注。本文对国内外陆续开展的城市热岛效应影响极端高温及其长期趋势的观测事实、城市极端高温数值模拟、城市高温期间超额死亡率的流行病学研究等方面所取得的成果进行了系统性的总结和评述。大部分观测和数值模拟研究都发现,城市热岛效应加剧了城市极端高温发生的范围和强度,增加了城市居民的高温健康风险,对城市极端高温的长期上升趋势也有重要贡献;流行病学研究表明,城市化引起的热岛效应对极端高温期间的死亡率有着重要影响。最后,对城市化影响极端高温未来的研究方向进行了探讨。

关键词:城市化;气候变化;极端高温;超额死亡率

1 引言

全球气候变暖和城市化是21世纪两个重要的全球性环境现象,两者的联系也日益紧密(Seto et al, 2009)。一方面,气候变化导致极端天气、气候事件的发生频率增加、强度增大,对人口和物质资产集聚程度高、且地理上多位于沿海和河谷地带的城市造成严重风险(IPCC, 2012);另一方面,城市化作为一种最强烈的土地利用/覆被变化,是温室气体排放最为集中的来源(Satterthwaite, 2008),对全球变暖的幅度和进程产生了重要影响。因此,全球变暖对城市地区具有怎样的影响,城市化又会产生怎样的叠加气候效应成为当前气候变化研究的重点之一。

气候变化导致极端高温事件呈范围扩大、频次增加的趋势(Meehl et al, 2004; IPCC, 2012),极端高

温已成为全球最为严重的气象灾害之一。极端高温会导致心脑血管和呼吸道等疾病发病率和死亡率上升,给城市居民,尤其是老龄人口带来严重的健康隐患。与此同时,城市化造成的下垫面类型的改变、人为热排放等因素产生城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI),加剧了城市极端高温发生的范围和强度。因此,城市化水平是潜在的高温健康风险因素(Smoyer et al, 2000),城市人口的快速增长与老龄化,热岛效应的增强与全球气候变化背景下高温热浪事件的频发将增加全球许多城市未来的极端高温风险(Hajat et al, 2010)。研究城市化与极端高温的叠加效应作为人类健康及社会可持续发展的重大需求,具有重要的科学价值和现实意义。为全面了解国内外有关城市化影响极端高温事件的研究现状,本文梳理了相关的研究成果以供参考。

收稿日期:2015-04;修订日期:2015-07。

基金项目:国家自然科学基金项目(41371068)。

作者简介:杨续超(1980-),男,河南信阳人,副教授,主要从事城市化与气候变化、全球变化与海岸带灾害风险管理研究,

E-mail: yangxuchao@zju.edu.cn。

引用格式:杨续超,陈葆德,胡可嘉. 2015. 城市化对极端高温事件影响研究进展[J]. 地理科学进展, 34(10): 1219-1228. [Yang X C, Chen B D, Hu K J. 2015. A review of impacts of urbanization on extreme heat events[J]. Progress in Geography, 34(10): 1219-1228.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.10.002

2 城市化影响极端高温事件的观测事实研究进展

城市热岛效应作为最为显著的城市气候特征,在夏季会与极端高温产生叠加效应。一方面,针对一些夏季典型高温热浪事件的观测事实分析表明,极端高温期间的城市热岛强度相比非高温日更大,UHI的影响也被放大(Zhou et al, 2010; Zhang et al, 2011; Li et al, 2013),且热岛强度有随夏季环境气温上升而增加的趋势(郑祚芳等, 2006; Founda et al, 2015);另一方面,城市热岛效应不仅影响夏季高温分布(丁金才等, 2001, 2002),对高温强度也有明显的增强,特别是夜间更为显著的热岛效应使得城区夜晚降温变缓,导致城市居民在白天和夜晚经历持续的高强度热胁迫(Basara et al, 2010),加剧了高温对城市居民健康的影响(Patz et al, 2005)。

从长期变化趋势来看,城市极端高温呈现上升趋势,城市化对此有重要贡献。且城市热岛在长时间尺度上对于高温日数的增加也有显著的贡献。相对于已处于稳定状态的城市,处于快速发展阶段的城市极端气温增加趋势更为显著(Sen Roy et al, 2009)。目前中国针对单个城市的相关研究主要集中在上海和北京这两个特大城市。对上海的研究发现,自 20 世纪 80 年代起,城市热岛强度增强,使得高温日数呈现出市区多于近郊和远郊的格局(Tan et al, 2007; 崔林丽等, 2009)。郑祚芳(2011)针对北京的研究得出类似的结论,并认为这一现象与 80 年代改革开放后城市化进程加速有关。司鹏等(2009)和张雷等(2011)仅利用北京站单站作为城市站,其他站点作为郊区/农村站,也发现了城市化对极端气温变化趋势的显著影响和贡献。但是城市化带来的湿度降低而引发的“城市干岛效应”则会部分抵消热岛效应对城市高温闷热天气的影响(王喜全等, 2010)。值得注意的是,杨萍等(2013)同样基于站点观测数据却得出不一样的结论:北京城区和郊区在极端高温事件发生频次上的差别很小。王君等(2013)也指出,城市化效应对北京白天的极端温度事件影响很小。表 1 给出了有关城市化对北京极端高温的影响研究中对气象站的城乡划分结果,不同研究对站点的城乡划分差异较大,杨萍等与其他研究结果的差异可能与站点划分有关。可见,在利用气象站点观测资料来研究城市化对极端高温事件的贡献时,站点的城乡划分对研究结果的

表 1 城市化对北京极端高温影响研究中对气象站的城乡划分结果比较

Tab.1 Urban or rural designation of meteorological stations in various studies on the impact of urbanization on extreme heat events in Beijing

站名	郑祚芳 (2011)20站	王君等 (2013)20站	杨萍等 (2013)14站	张雷等 (2011)6站	司鹏等 (2009)14站
北京 观象台	城市	城市	城市	城市	城市
海淀	城市	城市	城市	/	/
丰台	城市	城市	城市	/	郊外
石景山	城市	城市	郊区	/	/
朝阳	城市	近郊	城市	/	郊外
顺义	近郊	近郊	郊区	/	郊外
怀柔	近郊	乡村	郊区	/	郊外
平谷	近郊	乡村	郊区	/	郊外
通州	近郊	城市	郊区	/	郊外
大兴	近郊	近郊	郊区	/	郊外
门头沟	近郊	城市	郊区	/	乡村
房山	近郊	近郊	郊区	/	乡村
昌平	近郊	城市	郊区	/	郊外
汤河口	远郊	山地	/	农村	/
密云	远郊	乡村	郊区	/	/
上甸子	远郊	山地	/	农村	山区农村
斋堂	远郊	山地	/	农村	/
霞云岭	远郊	山地	/	农村	山区农村
延庆	远郊	山地	/	/	湖边
佛爷顶	远郊	山地	/	农村	/

影响很大。

在更大空间尺度上,有关城市化对极端高温的影响研究主要集中在美国和中国。大部分研究发现,城市站点极端高温事件发生频率要普遍高于农村站点,但存在区域差异。例如,Gaffen等(1998)发现,1949–1995 年美国人口最为密集的区域夏季暖夜增加最为显著。相比 20 世纪 60 年代,90 年代美国城市站点夏季暖夜的增加是农村站点的 3 倍,城市站热日的增加是农村站点的 1.5 倍(DeGaetano et al, 2002)。针对全球城市的分析也显示城市站点高温日数的增加略高于非城市站点(Mishra et al, 2015)。极端高温事件的增加还与城市空间结构有关,蔓延型城市比紧凑型城市高温发生的频率更高(Stone et al, 2010)。然而,Mishra 等(2011)对美国最大的 100 个城市的研究却指出,与最低气温相关的极端气温指标变化主要受气候变化影响,与最高气温相关的指标变化同城市化关系更为密切,产生这一不同结论的原因可能在于城市/非城市气温计算

方法的差异。

近年来,中国也有一系列研究在区域尺度上证实了城市化对极端气温事件的影响。在华北地区,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,城市化对暖夜增加的贡献超过50% (Zhou et al, 2011; Si et al, 2014; 周雅清等, 2014)。在环渤海地区,城市化对不同类型城市夏季极端暖夜气温上升的影响约为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (李庆祥等, 2013)。在华东地区,快速城市化引起的热岛效应对夏季极端高温事件发生频率的增加也有重要贡献 (Sun et al, 2014)。1961–2000年大城市站暖夜增多趋势相比小城镇站高出 $1.38\text{ d}/10\text{ a}$ (华丽娟等, 2006)。进入21世纪,浙江省城市站相对于农村站高温日数显著增加,这与2000年以后城市化进程加速有关 (杨续超等, 2014)。

3 城市化影响极端高温的数值模拟研究进展

除观测事实分析外,数值模拟研究常被用来量化和解释城市化影响极端高温的物理机制。近年来, WRF (Weather Research Forecast) (Skamarock et al, 2008) 耦合城市冠层模式 (Urban Canopy Model, UCM) (Kusaka et al, 2001) 作为一个公用工具广泛应用于城市环境研究 (Chen et al, 2011)。该模式也常被应用于模拟城市化对极端高温事件的影响 (Grossman-Clarke et al, 2010; Zhang et al, 2011; Wang et al, 2012, 2013; Yang et al, 2012; Li et al, 2013; Chen et al, 2014), 以及不同热岛减缓措施的效果评估 (Zhou et al, 2010; Stone et al, 2014)。大部分数值模拟研究表明,考虑城市的影响并运用更新、更为精细的城市下垫面类型数据有利于提高城市高温事件的模拟效果 (蒙伟光等, 2010; Chen et al, 2014)。城市发展及其伴随的土地利用变化导致经历极端高温 (尤其是夜间高温) 的区域热胁迫增强, 范围扩大; 同时, 城市化还降低夜间风速, 使得进入城市的冷空气对流变弱 (Grossman-Clarke et al, 2010)。更重要的是, 高温热浪和城市热岛具有协同效应 (Wang et al, 2012; Li et al, 2013)。热浪不仅增加环境温度, 还增加了城乡间的温度差, 因此, 热浪期间城市增加的热胁迫要高于背景热岛效应 (Background Urban Heat Island Effect) 和热浪本身影响之和, 其中的主要原因是城市的植被覆盖度和湿

度较小, 蒸发作用弱, 以及热浪天气下的低风速 (Li et al, 2013)。虽然 UCM 对城市下垫面进行了比较细致的划分 (分为低密度人口居住区, 高密度人口居住区, 工商业和交通区三类), 然而目前国际上还没有一套完整的全球范围包含上述三种类型的土地利用数据。Chen 等 (2014) 基于遥感夜间灯光和植被指数而构建的人居指数对杭州市的城市土地利用类型进行了划分, 结果表明利用更为精细、更接近现实的城市土地利用类型数据可提高 WRF/UCM 对极端高温事件的模拟效果。需要注意的是, 虽然模拟结果显示城市人为热排放对城市热岛有显著影响 (Wang et al, 2013; Chen et al, 2014), 但是目前 UCM 对人为热排放的处理还较简单, 没有考虑城市复杂下垫面人为热排放的异质性 (Stone et al, 2013), 一些模拟研究甚至没有考虑人为热因素 (蒙伟光等, 2010; Zhang et al, 2011; Wang et al, 2012)。因此, 在未来的数值模拟研究中需要改进对人为热的处理 (杨旺明等, 2014)。此外, 以往对于极端高温事件的模拟大多为个案研究, 而进行多案例的集合模拟可提高研究结论的可靠性。

近年来, 随着学界逐渐认识到城市化在全球气候变化中的重要性, 一些学者开始尝试在全球气候模式中耦合城市陆面模式来模拟未来城市气候变化。例如, McCarthy 等 (2010) 将 HadAM3 耦合一个城市陆面方案, 模拟了 CO_2 倍增和不同城市化情景下全球极端高温事件的变化, 结果显示城市化对最低气温有显著影响, 导致未来城市和农村暖夜发生频率出现很大差异。以北京为例, CO_2 倍增情景下北京农村地区增加 14 个暖夜, 而考虑城市土地利用和 $60\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的人为热排放后城市区域则会进一步增加 41 个暖夜。基于 CCSM4/CLMU 全球模式的模拟同样发现气候变化导致城市比农村暖夜的增加更为明显; 综合考虑气温和相对湿度的影响后, 在 CO_2 加倍情景下全球城市相对周边农村地区夜间将会经历更强的热胁迫 (Fischer et al, 2012; Oleson, 2012)。上述研究结果表明, 在气候变化背景下未来的城市热岛并非静态, 气候变暖和城市化的共同影响将导致极端高温事件 (尤其是极端暖夜) 的发生频率和强度显著增加。然而, 较粗的空间分辨率使得大气环流模式 (GCM) 对城市下垫面的影响未能得到充分反映, 上述研究也没有考虑未来城市发展对城市热岛效应预估的影响, 将低估城市化对未来城市极端高温事件的影响。

区域尺度上的气候变化影响研究和制定适应气候变化策略需要更为精细的气候变化情景,因此降尺度方法被广泛应用于发展较高分辨率的区域气候变化情景,然而目前城市区域气候的降尺度预估中同样很少考虑城市化的影响。近年来随着区域气候模式(RCM)的快速发展,国外学者开始尝试使用RCM耦合城市冠层模式的动力降尺度方法来预估未来的城市热岛效应、气候变化和城市化共同影响下的城市气候及极端高温事件。例如,McCarthy等(2011)基于区域气候模式HadCM3耦合城市模块的模拟显示,气候变化和城市化共同影响下伦敦未来城市暖夜发生频率将增加3倍以上。Argüeso等(2014)在A2排放情景下针对悉尼的预估得出了类似的结果。Kusaka等(2012)采用虚拟气候变暖(Pseudo Global Warming, PGW)方法构建新的全球初始场,驱动WRF/UCM进行动力降尺度模拟,结果显示,2070s东京夏季8月份夜间高温引起的睡眠不适日数将是2000s的1.5倍,警报级别以上的高温时数也由2000s的112小时增加到2070s的232小时。Oleson等(2015)发现无论在当前和未来气候变化情景下,城市化的面积和强度对高温热胁迫都有着显著的放大效应。Stone等(2014)将土地覆被模型—WRF—健康影响模型进行耦合,模拟了气候变化适应方式在缓解城市热岛效应,进一步减少未来城市高温死亡率的效果,结果表明通过对改变植被覆盖度和地表反照率两种方式的组合可以有效减少(40%~99%)未来高温死亡率。因此,通过大规模的土地覆被变化来缓解热岛效应是适应未来城市气候变暖的有效方式之一(Stone et al, 2012)。值得注意的是,目前综合考虑气候变化和城市化共同影响下的中国区域气候预估研究还很少见(Chen et al, 2015)。

4 城市化影响极端高温期间死亡率的流行病学研究进展

极端高温是与天气相关死亡率增加的主要原因(Robinson, 2001),已成为影响健康的重要公共卫生问题(Kovats et al, 2008)。高温对人的热胁迫会导致多种疾病发病率的上升,心血管、呼吸系统、脑血管疾病与肾衰竭是热浪诱发死亡的最主要疾病(Koppe et al, 2004; Kovats et al, 2008)。早在20世纪60年代,美国就不断有流行病学研究发现由高温热

浪引起的死亡多发生于城市。例如,1966年7月的热浪事件中,美国圣路易斯市246例死亡案例中有85%发生在市区(Henschel et al, 1969)。市区的高死亡率是城市化改变局地气候的结果:城市热岛加剧了市区的高温强度,特别是夜间更为显著的热岛效应使得城区在夜晚降温变缓,导致城市居民在白天和夜晚经历持续的高强度热胁迫(Clarke, 1972)。因此,有学者提出“热岛等于死亡之岛”(Buechley et al, 1972)。随后,针对1980年圣路易斯和堪萨斯的热浪事件(Jones et al, 1982)以及1995年芝加哥热浪事件(Changnon et al, 1996)的分析,也证实热岛效应使得城市居民高温健康风险显著增加,导致中心城区的死亡率要远高于周围的郊区和农村地区。

2003年8月欧洲发生了大范围热浪事件,造成上万人死亡(Kovats et al, 2004),此后的流行病学研究发现了城市热岛效应对高温期间超额死亡率的影响。例如,在法国,这次热浪造成死亡率最高的是城市化水平最高的大巴黎地区(Fouillet et al, 2006)。相比农村地区,热岛效应使得城市的高温暴露指数增加了10%,而大巴黎地区则增加了35%(Rey et al, 2009)。其中,夜间城市热岛效应对巴黎市区超额死亡的影响更大(Dousset et al, 2011; Laaidi et al, 2012)。针对意大利的研究也发现,城市热岛效应增加了2003年热浪期间城市居民特别是老年居民的死亡率(Conti et al, 2005)。此外,Smargiassi等(2009)对比了加拿大蒙特利尔平均气温为26℃相对于20℃的死亡率变化,发现热岛区域比非热岛区域死亡率增加15%。Gabriel等(2011)的研究发现,1994和2006年夏季极端高温多发期间,德国柏林异常死亡率要明显高于周边农村地区;高温期间柏林市内各区域的死亡率与其建筑物密度有很好的相关性,不透水比例更高的区域异常死亡率更高。

国内针对高温热浪对死亡率的影响研究尚处于起步阶段,相关研究集中于高温致死现象的时间分布特征,不过也有一些学者涉及该现象的空间分布尤其是城乡分布的流行病学研究。例如,Tan等(2010)发现,1998年热浪期间上海市区的平均超额死亡率为102.4%,比近郊区(84.3%)高了18.1%,比远郊区(43.0%)更是高出59.4%。研究得出城市热岛强度指数越大,超额死亡率也越高的结论。Goggins等(2012)指出,高密度建筑引起的热岛效应和低风速增加了香港市区高温期间死亡率。上述流

行病学研究都证实了极端高温期间热岛效应与超额死亡率密切相关的相关性,因此,在进行城市高温预报(Changnon et al, 1996; Hamdi et al, 2012)和城市高温风险评估(Tomlinson et al, 2011)时需要考虑热岛效应的影响。

5 未来研究方向与展望

综上所述,有关城市化影响极端高温的观测事实和数值模拟,以及城市极端高温致死率的流行病学研究已经取得很多成果,为未来城市一极端高温的相互作用及其健康影响的深入研究打下了很好的理论基础。以下根据近期国际上研究的热点问题对该领域未来研究作简单展望。

5.1 城市极端高温和其他环境要素的协同作用问题

多种环境因素(如空气污染物 O_3 和 PM_{10} 等)或气象因素(如风速、湿度等)是作用于高温期间超额死亡率的重要协同因子。目前,城市极端高温期间气温和其他环境要素的协同作用中研究最多的是高温与空气污染物的协同作用。一方面,极端高温会增加大气中二次污染物的生成,增强的光化学反应导致 O_3 、 SO_2 以及光化学烟雾等污染物的浓度升高;另一方面,高温、弱风以及晴空少云不仅是城市热岛效应发展的重要局地天气条件,也在大气污染物的产生和分布中起着关键作用。然而,目前有关极端高温与空气污染对健康的协同作用研究大都是从流行病学角度进行统计分析,对高温与多种气象及环境因素相互作用机理的理解还不够透彻。城市中空气污染物的空间分布和时间演变特征主要受城市上空热力和动力过程驱动,未来的研究须加强高温期间各城市边界层气象与大气化学的同步观测,通过卫星遥感、地面观测等多种监测手段揭示高温期间城市空气污染物的结构特征及变化规律,并为城市大气环境耦合模型提供基本参数,构建城市冠层—大气物理—大气化学过程的耦合模式,以理解高温热浪期间城市污染物间的化学反应、以及它们与较大尺度系统、热岛环流以及城市复杂下垫面产生的环流的相互作用。

5.2 城市极端高温预警

降低高温健康风险的一项重要对策是建立高温健康预警系统(Heat Health Warning System, HHWS)。20世纪90年代,美国费城就开始建设HHWS(Kalkstein et al, 1996)。2003年欧洲热浪事件以后,

建立高温健康预警系统在国际上引起了高度关注(Koppe et al, 2004)。美国(Palecki et al, 2001)和欧洲(Lowe et al, 2011)的经验表明,该系统能够有效降低高温死亡率。近年来,中国上海(谈建国等, 2002)、南京(汪庆庆等, 2014)等地也陆续建设了热浪健康预警系统。高温健康预警系统一般都建立在单个城市,大多由气象部门发布,但是目前的天气预报业务系统中对城市化的影响考虑得还远远不够。尽管城市冠层模式参数化方案已有了重要进展,但对于城市地表特征及其气候效应的机理认识还有待进一步加强,城市化影响极端高温强度与范围的物理机制也尚未形成完整的理论。理论的缺乏也限制了精细化城市天气数值预报模式的发展和完善,未来在这方面的研究还有很大的发展空间。例如,城市地表特征精细参数化以及城市地表特征数据库的建立对于城市陆面过程数值模拟研究至关重要(Ching et al, 2009; 孟春雷, 2014),目前中国急需加强这两方面的研究。极端高温健康预警系统另一个重点是热胁迫指标及其阈值的确定,当热胁迫指数超过对人体健康产生严重威胁的阈值时则发布健康预警。由于不同地域气候条件不同,人体对于热胁迫的适应性存在着显著的区域差异,热胁迫指标阈值也会有所不同。此外,阈值的确定还需要考虑其他环境要素(如空气污染物)的影响以及成本、可信度等其他条件。尤其值得注意的是,目前中国的高温预警只是单纯地考虑高温热浪灾害的危险性,对自然环境、社会经济状况、资源可得性等高温易感人群脆弱性方面考虑得不多。因此,根据年龄、性别、疾病、职业及其他社会经济条件所决定的不同人群适应性的差异,更加有针对性地开展高温与健康预警系统研究,还有待进一步探索。

5.3 城市极端高温风险评估

作为最主要的气象灾害之一,极端高温事件给人类造成的健康威胁是剧烈的、致命的。风险评估作为灾害风险管理的重要组成部分,对于气候变化下极端高温的防灾减灾工作具有重要意义。近年来,随着国际上对于气候变化、公共健康与风险概念的日益关注,仅考虑高温危险性的风险评估方法已不是主流,人口脆弱性等要素(包括年龄、种族、性别、社会隔离程度以及空调使用等)已被尝试纳入高温风险评估指标体系中。目前基于健康的极端高温风险评估主要通过在地图上叠加高温危险

性与脆弱性因素,实现人群高温健康风险的可视化。并且,大量的研究试图寻找到在风险评估模型中量化脆弱性的科学、合理方法。但人口脆弱性涉及因素众多,对高温死亡率的作用机理非常复杂,并存在不确定性,目前主流的专家打分法、主成分分析法以及聚类分析法等方法在指标权重确定方面仍受到多种制约,导致风险评估结果精度仍较低,离实际应用尚有较大差距。在这方面,谢盼等(2015)已对高温脆弱性框架以及定量评价方法进行了综述,进一步探讨人口脆弱性的定量化表征已成为当前风险评估研究的重要趋势。

科学合理的风险评估结果可用于表征人群风险以及脆弱性在空间上的差异,为适应性政策的制定提供参考,但目前国内外针对适应能力的讨论仍相对较少。例如,大量研究表明,老龄人口在极端高温状况下体温调节机能更差,死亡风险更高。在气候变暖、热岛效应与极端高温呈现上升趋势的背景下,城市的人口老龄化也将成为未来高温死亡的主要驱动因素之一(Luber et al, 2008)。但目前这个问题尚未引起足够的重视,对于如何增加老龄人口(尤其是独居老人与失能半失能老人)对高温的适应性,较少有针对性的措施。

总体来看,如何通过极端高温风险评估达到对社区、群体或个人水平的预警,国内目前还缺乏这一类的研究和实践。因此,将人口分布、年龄、疾病史等承灾体信息与气象、环境等危险源信息纳入到风险评估框架,综合考虑城市热岛效应的影响,根据高时空动态分辨率的风险评估结果进行科学决策,从而在国家及区域尺度上有效应对城市极端高温频发趋势,同时在城市及社区尺度上提供有效信息进行科学预警,是减缓及适应气候变化背景下城市极端高温的重要发展方向之一,对城市规划及区域发展也具有重要意义。

5.4 未来城市极端高温预估

仅重视全球尺度上的气候变化,而忽视了区域尺度上由于城市迅速扩张造成的气候变化,将给未来高温风险评估造成不确定性(Hondula et al, 2014)。目前利用全球或区域气候模式耦合城市冠层模式预估未来城市气候及极端高温变化的研究是有限且初步的,仅有很少的模式应用于这方面的研究,因此这类研究带有更多的探索性。然而,这些研究表明,在气候变化中城市热岛效应未必是静态的,城市化对区域未来的极端气候变化有着重要

的影响。因此,城市热岛强度会继续发展抑或有所缓解将是未来城市气候变化预估中一个重要科学问题。当前中国许多区域正经历快速的城市化进程,城市人口不断增加,城市面积迅速扩展,而且这一趋势在未来10多年还将持续,气候变化和城市化的叠加影响将使得城市面临更大的极端高温风险。因此,城市陆面模式的设计和嵌套,城市热岛效应的预估,尤其是极端高温期间的热岛预估,城市排放的气溶胶对大气辐射影响的参数化等,将是未来研究城市气候变化的重要课题。未来城市气候的动力降尺度模拟在很大程度上依赖于输入的GCM气候情景,城市未来发展情景也会对模拟结果产生重要影响。因此,有必要进行多个全球/区域气候模式、多种CO₂、人为热以及气溶胶排放情景,多城市发展情景的集合模拟以减少高温风险评估的不确定性,再进行多情景模拟与方案权衡,从而对未来的风险防范提供多目标决策支持。

参考文献(References)

- 崔林丽, 史军, 周伟东. 2009. 上海极端气温变化特征及其对城市化的响应[J]. 地理科学, 29(1): 93-97. [Cui L L, Shi J, Zhou W D. 2009. Characteristics of extreme temperature variations and their response to urbanization in Shanghai[J]. Scientia Geographica Sinica, 29(1): 93-97.]
- 丁金才, 叶其欣, 丁长根. 2001. 上海地区高温分布的诊断分析[J]. 应用气象学报, 12(4): 494-500. [Ding J C, Ye Q X, Ding C G. 2001. Diagnostic analysis of high temperature distribution in Shanghai[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 12(4): 494-500.]
- 丁金才, 张志凯, 奚红, 等. 2002. 上海地区盛夏高温分布和热岛效应的初步研究[J]. 大气科学, 26(3): 412-420. [Ding J C, Zhang Z K, Xi H, et al. 2002. A study of the high temperature distribution and the heat island effect in the summer of the shanghai area[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 26(3): 412-420.]
- 华丽娟, 马柱国, 曾昭美. 2006. 中国东部地区大城市和小城镇极端温度及日较差变化对比分析[J]. 大气科学, 30(1): 80-92. [Hua L J, Ma Z G, Zeng Z M. 2006. The comparative analysis of the changes of extreme temperature and extreme diurnal temperature range of large cities and small towns in eastern China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 30(1): 80-92.]
- 李庆祥, 黄嘉佑. 2013. 环渤海地区城市化对夏季极端暖夜的影响[J]. 气象学报, 71(4): 668-676. [Li Q X, Huang J Y. 2013. Effects of urbanization in the surrounding Bohai area on extreme summer warmest night temperatures[J]. Acta Meteorologica Sinica, 71(4): 668-676.]

- 蒙伟光, 张艳霞, 李江南, 等. 2010. WRF/UCM在广州高温天气及城市热岛模拟研究中的应用[J]. 热带气象学报, 26(3): 273-282. [Meng W G, Zhang Y X, Li J N, et al. 2010. Application of WRF/UCM in the simulation of a heat wave event and urban heat island around Guangzhou City [J]. Journal of Tropical Meteorology, 26(3): 273-282.]
- 孟春雷. 2014. 城市地表特征数值模拟研究进展[J]. 地球科学进展, 29(4): 464-474. [Meng C L. 2014. Review of numerical simulation research on urban land surface characteristics[J]. Advances in Earth Science, 29(4): 464-474.]
- 司鹏, 李庆祥, 轩春怡, 等. 2009. 城市化对北京气温变化的贡献分析[J]. 自然灾害学报, 18(4): 138-144. [Si P, Li Q X, Xuan C Y, et al. 2009. Contribution of urbanization to change of air temperature in Beijing[J]. Journal of Natural Disasters, 18(4): 138-144.]
- 谈建国, 殷鹤宝, 林松柏, 等. 2002. 上海热浪与健康监测预警系统[J]. 应用气象学报, 13(3): 356-363. [Tan J G, Yin H B, Lin S B, et al. 2002. Shanghai heat wave/health warning system[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 13(3): 356-363.]
- 汪庆庆, 李永红, 丁震, 等. 2014. 南京市高温热浪与健康风险早期预警系统试运行效果评估[J]. 环境与健康杂志, 31(5): 382-384. [Wang Q Q, Li Y H, Ding Z, et al. 2014. Assessment on heat-wave and health risks early warning system in Nanjing[J]. Journal of Environment and Health, 31(5): 382-384.]
- 王君, 严中伟, 李珍, 等. 2013. 近30年城市化对北京极端温度的影响[J]. 科学通报, 58(33): 3464-3470. [Wang J, Yan Z W, Li Z, et al. 2013. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978-2008[J]. Chinese Science Bulletin, 58(36): 4679-4686.]
- 王喜全, 龚晏邦. 2010. “城市干岛”对北京夏季高温闷热天气的影响[J]. 科学通报, 55(11): 1043-1047. [Wang X Q, Gong Y B. 2010. The impact of an urban dry island on the summer heat wave and sultry weather in Beijing City [J]. Chinese Science Bulletin, 55(11): 1043-1047.]
- 谢盼, 王仰麟, 彭建, 等. 2015. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价: 研究进展与框架[J]. 地理科学进展, 34(2): 165-174. [Xie P, Wang Y L, Peng J, et al. 2015. Health related urban heat wave vulnerability assessment: research progress and framework[J]. Progress in Geography, 34(2): 165-174.]
- 杨萍, 刘伟东, 侯威. 2013. 北京地区城郊极端温度事件的变化趋势及差异分析[J]. 气候与环境研究, 18(1): 80-86. [Yang P, Liu W D, Hou W. 2013. Trends and difference analyses of temperature extremes in rural and urban areas in Beijing during 1979-2008[J]. Climatic and Environmental Research, 18(1): 80-86.]
- 杨旺明, 蒋冲, 喻小勇, 等. 2014. 气候变化背景下人为热估算和效应研究[J]. 地理科学进展, 33(8): 1029-1038. [Yang W M, Jiang C, Yu X Y, et al. 2014. Review of research on anthropogenic heat under climate change[J]. Progress in Geography, 33(8): 1029-1038.]
- 杨续超, 陈锋, 祝炜平, 等. 2014. 城市化对浙江省夏季极端高温事件的影响[J]. 热带气象学报, 30(4): 719-726. [Yang X C, Chen F, Zhu W P, et al. 2014. Urbanization effects on observed change in summer extreme heat events over Zhejiang Province[J]. Journal of Tropical Meteorology, 30(4): 719-726.]
- 张雷, 任国玉, 刘江, 等. 2011. 城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响[J]. 地球物理学报, 54(5): 1150-1159. [Zhang L, Ren G Y, Liu J, et al. 2011. Urban effect on trends of extreme temperature indices at Beijing Meteorological Station[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(5): 1150-1159.]
- 郑祚芳. 2011. 北京极端气温变化特征及其对城市化的响应[J]. 地理科学, 31(4): 459-463. [Zheng Z F. 2011. Characteristics of extreme temperature variation and their response to urbanization in Beijing[J]. Scientia Geographica Sinica, 31(4): 459-463.]
- 郑祚芳, 范水勇, 王迎春. 2006. 城市热岛效应对北京夏季高温的影响[J]. 应用气象学报, 17(S1): 48-53. [Zheng Z F, Fan S Y, Wang Y C. 2006. Effects of urban heat island on summer high temperatures in Beijing[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 17(S1): 48-53.]
- 周雅清, 任国玉. 2014. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响[J]. 高原气象, 33(6): 1589-1598. [Zhou Y Q, Ren G Y. 2014. Urbanization effect on long-term trends of extreme temperature events in north China[J]. Plateau Meteorology, 33(6): 1589-1598.]
- Argüeso D, Evans J P, Fita L, et al. 2014. Temperature response to future urbanization and climate change[J]. Climate Dynamics, 42(7-8): 2183-2199.
- Basara J B, Basara H G, Illston B G, et al. 2010. The impact of the urban heat island during an intense heat wave in Oklahoma City[J]. Advances in Meteorology, doi: 10.1155/2010/230365.
- Buechley R W, Van Bruggen J, Truppi L E. 1972. Heat island=death island[J]. Environmental Research, 5(1): 85-92.
- Changnon S A, Kunkel K E, Reinke B C. 1996. Impacts and responses to the 1995 heat wave: a call to action[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 77(7): 1497-1506.
- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2011. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems[J]. International Journal of Climatology, 31(2): 273-288.
- Chen F, Yang X C, Zhu W P. 2014. WRF simulations of urban

- heat island under hot-weather synoptic conditions: the case study of Hangzhou City, China[J]. *Atmospheric Research*, 138: 364-377.
- Chen L, Frauenfeld O. 2015. Impacts of urbanization on future climate in China[J]. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-015-2840-6.
- Ching J, Brown M, McPherson T, et al. 2009. National Urban Database and Access Portal Tool[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8): 1157-1168.
- Clarke J F. 1972. Some effects of the urban structure on heat mortality[J]. *Environmental Research*, 5(1): 93-104.
- Conti S, Meli P, Minelli G, et al. 2005. Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy[J]. *Environmental Research*, 98(3): 390-399.
- DeGaetano A T, Allen R J. 2002. Trends in twentieth-century temperature extremes across the United States[J]. *Journal of Climate*, 15(22): 3188-3205.
- Dousset B, Gourmelon F, Laaidi K, et al. 2011. Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area [J]. *International Journal of Climatology*, 31(2): 313-323.
- Fischer E M, Oleson K W, Lawrence D M. 2012. Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change [J]. *Geophysical Research Letters*, 39(3): L03705.
- Fouillet A, Rey G, Laurent F, et al. 2006. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France[J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 80(1): 16-24.
- Founda D, Pierros F, Petrakis M, et al. 2015. Interdecadal variations and trends of the Urban Heat Island in Athens (Greece) and its response to heat waves[J]. *Atmospheric Research*, 161-162: 1-13.
- Gabriel K M A, Endlicher W R. 2011. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany[J]. *Environmental Pollution*, 159(8-9): 2044-2050.
- Gaffen D J, Ross R J. 1998. Increased summertime heat stress in the US[J]. *Nature*, 396: 529-530.
- Goggins W B, Chan E Y Y, Ng E, et al. 2012. Effect modification of the association between short-term meteorological factors and mortality by urban heat islands in Hong Kong [J]. *PLoS One*, 7(6): e38551.
- Grossman-Clarke S, Zehnder J A, Loridan T, et al. 2010. Contribution of land use changes to near-surface air temperatures during recent summer extreme heat events in the Phoenix Metropolitan Area[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(8): 1649-1664.
- Hajat S, Kosatky T. 2010. Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity[J]. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 64(9): 753-760.
- Hamdi R, Degrauwe D, Termonia P. 2012. Coupling the town energy balance (TEB) scheme to an operational limited-area NWP model: evaluation for a highly urbanized area in Belgium[J]. *Weather and Forecasting*, 27(2): 323-344.
- Henschel A, Burton L L, Margolies L, et al. 1969. An analysis of the heat deaths in St. Louis during July, 1966[J]. *American Journal of Public Health and the Nations Health*, 59(12): 2232-2242.
- Hondula D M, Georgescu M, Balling R C Jr. 2014. Challenges associated with projecting urbanization-induced heat-related mortality[J]. *Science of the Total Environment*, 490: 538-544.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[R]. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press: 582.
- Jones T S, Liang A P, Kilbourne E M, et al. 1982. Morbidity and mortality associated with the July 1980 heat wave in St Louis and Kansas City, Mo[J]. *JAMA: the Journal of the American Medical Association*, 247(24): 3327-3331.
- Kalkstein L S, Jamason P F, Greene J S, et al. 1996. The Philadelphia hot weather-health watch/warning system: development and application, summer 1995[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(7): 1519-1528.
- Koppe C, Kovats S, Jendritzky G, et al. 2004. Heat-waves: risks and responses[R]. Copenhagen, Denmark: World Health Organization.
- Kovats R S, Hajat S. 2008. Heat stress and public health: a critical review[J]. *Annual Review of Public Health*, 29(1): 41-55.
- Kovats S, Wolf T, Menne B. 2004. Heatwave of August 2003 in Europe: provisional estimates of the impact on mortality[J]. *Eurosurveillance*, 8(11): 2409.
- Kusaka H, Hara M, Takane Y. 2012. Urban climate projection by the WRF model at 3-km horizontal grid increment: dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya Metropolis-es[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90B: 47-63.
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 101(3): 329-358.
- Laaidi M, Zeghnoun A, Dousset B, et al. 2012. The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave[J]. *Environmental Health Perspectives*, 120(2): 254-259.
- Li D, Bou-Zeid E. 2013. Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: the impact in cities is larger than the sum of its parts[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9): 2051-2064.

- Lowe D, Ebi K L, Forsberg B. 2011. Heatwave early warning systems and adaptation advice to reduce human health consequences of heatwaves[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(12): 4623-4648.
- Luber G, McGeehin M. 2008. Climate change and extreme heat events[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5): 429-435.
- McCarthy M P, Best M J, Betts R A. 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects[J]. *Geophysical Research Letters*, 37(9): L09705.
- McCarthy M P, Harpham C, Goodess C M, et al. 2011. Simulating climate change in UK cities using a regional climate model, HadRM3[J]. *International Journal of Climatology*, 32(12): 1875-1888.
- Meehl G A, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century[J]. *Science*, 305: 994-997.
- Mishra V, Ganguly A R, Nijssen B, et al. 2015. Changes in observed climate extremes in global urban areas[J]. *Environmental Research Letters*, doi: 10.1088/1748-9326/10/2/024005.
- Mishra V, Lettenmaier D P. 2011. Climatic trends in major U. S. urban areas, 1950-2009[J]. *Geophysical Research Letters*, 38(16): L16401.
- Oleson K. 2012. Contrasts between urban and rural climate in CCSM4 CMIP5 climate change scenarios[J]. *Journal of Climate*, 25(5): 1390-1412.
- Oleson K W, Monaghan A, Wilhelmi O, et al. 2015. Interactions between urbanization, heat stress, and climate change[J]. *Climatic Change*, 129(3-4): 525-541.
- Palecki M A, Changnon S A, Kunkel K E. 2001. The nature and impacts of the July 1999 heat wave in the midwestern United States: learning from the lessons of 1995[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(7): 1353-1367.
- Patz J A, Campbell-Lendrum D, Holloway T, et al. 2005. Impact of regional climate change on human health[J]. *Nature*, 438: 310-317.
- Rey G, Fouillet A, Bessemoulin P, et al. 2009. Heat exposure and socio-economic vulnerability as synergistic factors in heat-wave-related mortality[J]. *European Journal of Epidemiology*, 24(9): 495-502.
- Robinson P J. 2001. On the definition of a heat wave[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 40(4): 762-775.
- Satterthwaite D. 2008. Cities' contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions[J]. *Environment and Urbanization*, 20(2): 539-549.
- Sen Roy S, Yuan F. 2009. Trends in extreme temperatures in relation to urbanization in the Twin Cities Metropolitan Area, Minnesota[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(3): 669-679.
- Seto K C, Shepherd J M. 2009. Global urban land-use trends and climate impacts[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1): 89-95.
- Si P, Zheng Z F, Ren Y, et al. 2014. Effects of urbanization on daily temperature extremes in North China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 24(2): 349-362.
- Skamarock W, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF Version 3[Z/OL]. 2008-06 [2015-09-30]. http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf.
- Smargiassi A, Goldberg M S, Plante C, et al. 2009. Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands[J]. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 63(8): 659-664.
- Smoyer K E, Rainham D G C, Hewko J N. 2000. Heat-stress-related mortality in five cities in Southern Ontario: 1980-1996[J]. *International Journal of Biometeorology*, 44(4): 190-197.
- Stone B, Hess J J, Frumkin H. 2010. Urban form and extreme heat events: are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities[J]. *Environmental Health Perspectives*, 118(10): 1425-1428.
- Stone B, Vargo J, Habeeb D. 2012. Managing climate change in cities: will climate action plans work[J]. *Landscape and Urban Planning*, 107(3): 263-271.
- Stone B, Vargo J, Liu P, et al. 2013. Climate change adaptation through urban heat management in Atlanta, Georgia[J]. *Environmental Science & Technology*, 47(14): 7780-7786.
- Stone B, Vargo J, Liu P, et al. 2014. Avoided heat-related mortality through climate adaptation strategies in three US cities[J]. *PLoS One*, 9(6): e100852.
- Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China[J]. *Nature Climate Change*, 4(12): 1082-1085.
- Tan J G, Zheng Y F, Song G X, et al. 2007. Heat wave impacts on mortality in Shanghai, 1998 and 2003[J]. *International Journal of Biometeorology*, 51(3): 193-200.
- Tan J G, Zheng Y F, Tang X, et al. 2010. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai[J]. *International Journal of Biometeorology*, 54(1): 75-84.
- Tomlinson C J, Chapman L, Thornes J E, et al. 2011. Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: a case study for Birmingham, UK[J]. *International Journal of Health Geographics*, 10: 42.
- Wang J, Feng J M, Yan Z W, et al. 2012. Nested high-resolution

- tion modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117(D21): D21103.
- Wang M N, Yan X D, Liu J Y, et al. 2013. The contribution of urbanization to recent extreme heat events and a potential mitigation strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 114(3-4): 407-416.
- Yang B, Zhang Y C, Qian Y. 2012. Simulation of urban climate with high-resolution WRF model: a case study in Nanjing, China[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 48(3): 227-241.
- Zhang N, Zhu L F, Zhu Y. 2011. Urban heat island and boundary layer structures under hot weather synoptic conditions: a case study of Suzhou City, China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28(4): 855-865.
- Zhou Y Q, Ren G Y. 2011. Change in extreme temperature event frequency over mainland China, 1961-2008[J]. *Climate Research*, 50(2-3): 125-139.
- Zhou Y, Shepherd J M. 2010. Atlanta's urban heat island under extreme heat conditions and potential mitigation strategies [J]. *Natural Hazards*, 52(3): 639-668.

A review of impacts of urbanization on extreme heat events

YANG Xuchao¹, CHEN Baode², HU Kejia¹

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China;

2. Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China)

Abstract: Extreme heat events (EHEs) are a major cause of weather-related deaths. People who live in cities may be more vulnerable to EHE because the urban heat island (UHI) effect causes a slower cooling process at night, and thus provides little relief from the heat stresses of the day. Although UHI is a well-documented phenomenon, relatively little information in the literature is available about its characteristics during EHEs. Moreover, urban warming in addition to greenhouse gas-induced warming has not been taken into account explicitly in climate change simulations to date. Under the background of global climate change and rapid urbanization in China, the magnitude of future warming and the health risk of EHEs may be significantly underestimated in urban areas. With the forecast of global warming continuing into the foreseeable future, extreme heat events will become more intense, more frequent, and longer lasting with climate change. The impacts of urbanization on extreme heat events have attracted an increasing attention in recent years. The potential exposure of urban populations to climate change will be enhanced by local factors with the development of urbanization. This review systematically collates research results in three main areas: observational evidence of trends in EHEs in relation to urbanization, numerical simulation experiments of the impact of urbanization on temperature and heat stress during EHEs, and epidemiological study of excess mortality associated with urbanization during EHEs. Most observational and simulation studies show that urban heat island results in an increase in the extent and intensity of extreme heat in cities. Inhabitants of urban areas may experience increasing heat-related health risk. Heat island also significantly contributes to the long-term increasing trends in urban EHEs. The epidemiological studies reveal that heat island caused by urbanization has great impacts on excess mortality in cities during EHEs. Finally, future avenues of research are speculated, including: synergistic effect of extreme heat with other environmental factors, heat-health warning systems, mapping extreme heat health risk, and future projection of EHEs due to climate change and urban growth.

Key words: urbanization; climate change; extreme heat; excess mortality