

聂敬娣, 张俊华, 黄波. 城市热岛效应对人体健康影响研究综述[J]. 生态科学, 2021, 40(1): 200–208.

NIE Jingdi, ZHANG Junhua, HUANG Bo. A review of the human health consequences of urban heat island effect[J]. Ecological Science, 2021, 40(1): 200–208.

城市热岛效应对人体健康影响研究综述

聂敬娣¹, 张俊华¹, 黄波^{1, 2, *}

1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872

2. 香港中文大学地理与资源学系, 香港 999077

【摘要】城市热岛效应改变了城市局部气候环境, 对人体健康构成了极大的威胁。随着城市的发展和城市人口的增加, 城市热岛效应愈发严重。在此背景下, 城市热岛效应对人类健康的影响成为研究热点。本文从热岛效应与人体健康的定量分析、热岛环境下弱势群体识别以及热岛效应缓解措施等方面, 总结了近年来众多学者关于热岛效应对健康影响的研究, 为城市建设管理者预防并减少城市热岛效应对城市居民健康的影响、建设生态文明城市提供参考。研究表明: 1) 城市热岛效应不仅可以通过热危害直接威胁人体健康, 还可以通过加重空气污染间接增加呼吸系统疾病和心脑血管疾病等的发病率; 2) 老人、婴儿、低收入者、患病人群、学历较低者和体力劳动者等是热岛效应中的弱势群体; 3) 改善城市风环境, 种植绿色植被, 增加城市地表反射率等措施可以有效缓解城市热岛效应, 减缓热岛效应对人体健康的影响。

关键词: 城市热岛效应; 城市化; 人体健康; 热风险

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2021.01.025 中图分类号: P951; X24 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2021)01-200-09

A review of the human health consequences of urban heat island effect

NIE Jingdi¹, ZHANG Junhua¹, HUANG Bo^{1, 2, *}

1. School of Environmental and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China

2. Department of Geography and Resource Management, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, 999077, China

Abstract: Urban heat island effect is the phenomenon that urban temperature is higher than its surrounding suburbs and countryside. The massive urbanization and rapid urban population growth have intensified the urban heat island effect. Local climate affected by the urban heat island poses a great threat to human health. In this context, that urban heat island effect on human health has become a research hotspot. This paper summarizes the recent studies on the health effects of heat island effect by many scholars from quantitative study of heat island effect on human health, vulnerable groups analysis and mitigation measures, which can provide urban construction managers with reference to prevent and reduce urban heat island effect on urban residents' health and ecological civilization of city construction. This study shows: 1) The urban heat island effect can not only directly threaten human health by thermal hazards, but also indirectly increase the incidence of respiratory diseases and cardiovascular and cerebrovascular diseases by aggravating air pollution. 2) The elderly, infants, low-income people, sick people, less educated people and manual workers are the vulnerable groups in the heat island effect. 3) Measures to improve the urban wind environment, plant green vegetation and apply highly reflective materials to the building surface can effectively alleviate the urban heat island effect and reduce the impact on the health of the population.

Key words: urban heat island effect; urbanization; human healthy; heat risk

收稿日期: 2019-09-29; 修订日期: 2020-10-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAJ05B04)

作者简介: 聂敬娣(1996—), 女, 河北邯郸人, 硕士, 主要从事 GIS 在城市环境中的应用研究, E-mail: 2018101876@ruc.edu.cn

*通信作者: 黄波, 男, 博士, 教授, 主要从事空间智能、时空统计、空间优化等研究, E-mail: bohuan@cuhk.edu.cn

0 前言

城市化和工业化发展极大地提高了城市居民的生活质量,但与此同时也影响了城市的自然环境和气候,其中以城市热岛效应最为显著。城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI)在1958年被Manley正式定义^[1],表现为城市的温度相对于周围自然地区较高,在区域空间温度分布中呈现岛状分布^[2]。这一现象最早于1833年被记录于文献中^[3],其强度一般用城市与周围乡村地区温度的差异表示^[4]。城市热岛效应现已普遍认为是城市最显著的气候特征。

城市较高的温度对城市居民的健康有着显著的负面影响^[5-8]。城市热岛效应提高了冠心病^[9-11]、心脏病^[12]等疾病发病率,加重呼吸系统疾病^[13]。同时,温度较高的热环境使城市居民的死亡率和患病率明显上升,增加了城市居民的健康风险^[14]。随着城市化的加速以及全球气候变化加剧,热岛效应日趋严重,城市居民的健康风险持续上升^[15]。截止到2014年,全球范围内已有超过50%的人口居住在城市地区,根据预测这一数字在2050年将达到66%^[16]。人口的大量涌入使得城市资源消耗量大幅上升,增加了城市的人为热排放量,同时增加的人口也加快了城市的扩张速度,导致更为严重的城市热岛效应^[17]。

探究热岛效应对人体健康的影响可以辅助决策者制定相关政策和措施以缓解热岛效应对健康的危害,保护城市居民生命财产安全。近年来,这一领域吸引了诸多学者的探索,并取得了许多有价值和有借鉴意义的成果。本文梳理了相关文献,从热岛效应与人体健康的定量分析、热岛环境下弱势群体识别以及热岛效应缓解措施等方面,总结了近年来众多学者关于热岛效应对人体健康影响的研究。

1 城市热岛的形成

城市规模不论大小,都存在着不同程度的热岛效应,促使热岛效应形成的因素有多个方面。城市的发展改变了其所在区域的下垫面,是热岛效应产生的主要原因之一。城市下垫面是城市表层能量收支的界面,调节和控制着城市生态系统的水分收支和能量收支,并最终影响城市热环境^[18]。随着城市化进程的加快,原本以植被、水体、土壤等土地覆盖类型为主的自然表面逐渐被高热容的、高导热率、低反照率的沥青、水泥等高蓄热的不透水面取代。

由此,城市下垫面对太阳辐射低反照率和高吸收率使得地表温度随着空气中的热量增多而逐渐升高^[19]。加之城市不透水面蒸发冷却潜力有限,加速了城市热岛效应的形成。另一方面,城市中高楼林立,建筑密集,基础设施材料存在较大差异,导致太阳辐射在城市建筑之间多次反射,大量聚集于城市建筑群内,进而加速了城市热岛效应的扩散^[20]。

人为热也是城市热岛效应形成的主要热量来源。人为热是指由人类生活生产活动而释放到大气中的热量,具有较明显的区域集聚性,主要集中在城市区域^[21]。人类活动直接向大气中排放大量热量,从而使得大气温度升高,加剧了城市的热岛效应^[22]。同时,由于人类工业活动所产生的大量CO₂、N₂O等温室气体和颗粒污染物排放到大气中,增加了近地层大气对地表长波辐射的吸收,进一步加剧了城市热岛效应。除上述因素外,云量、气压、空气湿度和风速等气象要素也显著影响着城市热岛的产生。

现有的监测方法主要分为地面监测、遥感监测和数值模拟三种。地面监测方法通过地面监测站点获取的实时地面观测数据对城市热岛效应进行研究^[23-25],该方法准确度高,但存在站点位置和数量的限制;基于遥感影像反演地表温度的热岛效应监测手段能够提供全面的城市热岛分布图,同时,能克服传统站点监测数据无法与城市下垫面、人口分布情况等结合的缺点,具有较好的时间周期性^[26-28],但若应用于复杂现实条件(如下垫面粗糙、热性质差异大等),则易产生较大误差^[29];数值模拟是在热力学和动力学的理论基础上,利用计算机模拟城市热岛,从而对能量平衡和温度的时空变化进行统计分析^[30-32]。该方法所获得的数据具有较高的空间分辨率,但模拟过程中由于数据不完整或下垫面复杂性使得模型中近地面的气象因素分析易产生误差。

2 热岛对人体健康影响的研究方法

热岛效应会导致城市居民死亡率以及患病率的上升,因此定量分析温度与死亡率或患病率之间的关系可用于评估热岛效应对健康的影响。此外,应对热岛效应的健康风险管理也已成为新的研究方向之一,综合全面的风险识别与评估和合理的风险规避对于城市管理具有极大的现实意义。

2.1 定量分析

流行病学理论是定量评估大气环境对人体健康影响的基础,其中时间序列(time-series)与病例交叉设计(case-crossover design)两种流行病学方法被广泛应用于温度与死亡率或患病率关系的定量分析^[33-35]。通过基于时间序列分析和病例交叉设计的研究方法可以识别出脆弱群体,并量化热岛效应导致的温度升高与超额死亡率或患病率之间的关系。

2.1.1 时间序列方法

时间序列方法通过对一系列时间序列数据进行回归分析,识别出影响热岛效应对人体健康危害程度的因素。通过对时间序列数据的对数线性回归分析,Curriero 描述了 1973 年美国东部 11 个大型城市的气温-死亡率关系,并探索与这种温度-死亡率关系变化相关的城市特征来估算死亡率的相对风险^[36]。Ai Ishigami 对 3 个城市的日死亡率数据进行了时间序列研究,发现年龄和性别等因素的差别导致不同人群在热岛环境下面临的热风险系数不同^[37]。Dan 基于时间序列方法针对极端高温天气事件对高度城市化和人口稠密的亚热带城市的死亡率的影响进行了探讨,识别出了影响人体健康的条件阈值^[38]。时间序列方法具有较好的时间连续性,但数据收集时间长,获取难度较高。

2.1.2 病例交叉设计方法

病例交叉的研究方法最早由 Maclure 提出,基本思想是比较同一研究对象在某一紧急事件发生前一段时间的暴露情况与未发生事件的某段时间内的暴露情况,以揭示该事件与某现象之间的关系^[39],观察得出可疑病因与疾病和健康状况之间的关联。Stafoggia 采用病例交叉设计来评价意大利四个城市平均表观温度与死亡率之间的关系及其影响因素,分析出由温度升高引起健康受损的群体^[40]。Xu 基于长时间序列的 1814 个巴西城市炎热季节时的住院和天气数据,利用病例交叉方法发现了全球变暖对营养不良发病率的直接影响^[41]。Varghese 等人采用基于时间分层的病例交叉设计,量化了环境温度对工伤和疾病等职业伤害风险的影响,并发现此影响受地理环境影响明显^[42]。病例交叉设计以研究对象自身作为对照,不需要设置其他对照组,并且能通过选择对照期控制混杂,但该方法不适用于暴露效应期较长或存在严重滞留的情况。

2.2 健康风险评价

健康风险评价(health risk assessment),又被称为健康危险度评价,旨在量化大气环境对于人体健康的影响,健康风险评价一般包括暴露-反演关系分析、暴露评价和风险危害的定量评估三部分^[43]。常用作相关政府部门决策的科学支持。常用的方法有空间格局分析方法和模拟分析预测方法两种。

2.2.1 空间格局分析方法

热岛效应是一个空间分布现象,受地理位置、环境以及经济社会等因素的影响,同一城市的不同区域所面临的健康风险是不同的。通过分析城市由于热岛效应产生的健康风险的空间格局能够识别出一个城市的高风险区,有助于预防和应对城市热岛效应带来的健康风险。

分析一个城市的健康风险空间格局通常利用 GIS 制图来展现。Reid 利用人口、土地利用等数据,制作了美国热浪天气下的脆弱性制图,分析了美国的健康风险空间格局^[44]。Tomlinson 结合遥感城市热岛数据与商业社会数据,评价了英国伯明翰市的热环境,以突出潜在的热健康风险区域^[45];陈倩融合多源遥感数据、人口和社会经济统计数据对长江三角洲地区的高温热浪人群健康风险分布格局进行分析与评价,并识别出高风险地区的风险主导因子^[46]。

2.2.2 模拟分析预测方法

利用高分辨率区域天气和气候模型进行的建模研究可以提供一种有效的方法来描述温度的空间变化,进而分析热岛效应对健康的影响。使用模拟分析的方法研究热岛效应可以避免传统观测手段的一些局限。Macintyre 利用区域气象天气研究预报模型(WRF)与城市冠层模型模拟了西米德兰地区的城市热岛效应,并模拟改良城市屋顶反射率对城市热岛效应的影响^[47]。同样以西米德兰地区为研究区,Heaviside 通过模拟土地利用的变化对温度造成的影响,来分析该地区不同温度下,温度与死亡率之间的关系^[48]。Stone 结合 WRF 模型、土地覆被模型和健康影响模型,模拟了气候变化条件下植被覆盖度和地表反照率对城市热岛导致的高温死亡率的减缓作用^[49]。

3 热岛对人体健康的危害

3.1 提高热风险

城市热岛效应对人体健康最直接的危害来自热

风险,并且由热岛效应导致的热风险会在热浪天气中加重。热浪事件频发已成为影响健康的重要公共卫生问题,对人体健康造成极大威胁^[50]。热浪导致死亡的一个重要原因是生理冷却需求增加了心血管系统负担^[51]。高温与由心脑血管系统疾病导致的死亡和与热相关的中暑、脱水导致的死亡密切相关^[52]。由于城市热岛效应,热浪对城市的危害比对乡村严重的多。20 世纪以来,世界各地城市发生热浪灾害对人类生命财产安全造成巨大的威胁。1995 年英国和芝加哥发生的热浪灾害对城市居民生命财产造成巨大损失^[9,53]。1999 年印度的热浪导致了 15000 人死亡^[54]。2003 年夏天西欧的热浪也造成了严重后果,尤其是西班牙和法国,估计约有 35000 人受到影响^[55]。

热浪除最直接造成人类死亡外,也会引发相关疾病发病率的升高。在炎热的环境中,人体温度调节系统超负荷运转,器官负荷增加,加重病人的病情。在热浪天气中,呼吸系统疾病和心脑血管疾病的发病率明显上升。由于全球气候变化和城市热岛效应的影响,21 世纪热浪在强度、频率及持续时间上都会明显增加^[56]。因此,减少热浪的影响,预测热风险程度,完善预防措施极为重要。

3.2 加重空气污染

城市热岛和城市空气污染之间存在密切的相互作用^[57]。受城市热岛效应的影响,城市中心存在一股上升气流,在郊区下沉,同时郊区的冷空气吹向城市,行成一个闭合的大气环流圈。在这个环流圈中,郊区吹向城市的冷空气包含大量的空气污染物,降低了城市空气质量,并且大量聚集的污染物有助于雾的产生,严重危害城市居民健康。并且热岛效应生成的环流圈会导致污染物在城市上空聚集,加强大气对太阳长波辐射的吸收,加重热岛效应,行成恶性循环。

热岛效应导致城市温度较高,加重了城市空气污染。城市较高的温度促进了空气中的化学反应,导致地面臭氧浓度升高。地面高浓度臭氧会增加城市光化学烟雾产生的频率,危害人体健康^[58]。许多研究发现城市空气污染与热岛效应密切相关。Aslam 等研究了德里市 UHI 强度对空气质量的影响,发现 PM_{2.5} 浓度与 UHI 强度呈正相关^[59]。Xu 利用流行病学方法研究 PM₁₀ 与热环境的关系,发现热环境与 PM₁₀ 污染密切相关^[60]。空气污染(尤其是臭氧和

总悬浮微粒)会进一步加重人体的呼吸系统和循环系统,从而加剧高温对健康的损害^[61]。

4 热岛下的弱势群体

在城市居民中,因年龄、职业、收入、受教育程度以及居住条件等因素的影响,受热岛效应的影响程度和承受的热风险是不同的。基于人口学特征、疾病特征、社会经济学特征可以筛选出脆弱性人群^[62]。

老年人和婴儿因其生理原因,对高温的适应能力较差,往往被认为是高温热浪灾害脆弱性群体^[63-64]。日本学者发现在热浪天气中,65 岁以上的老年人和 0—4 岁的婴幼儿人群死亡率占整个人群死亡率的 50.1%^[65]。老年人群由于身体素质下降,对热的忍耐力和承受力较低,容易受到热岛效应的影响^[66]。又由于老年群体患病概率相对较高,加重了老年人群在热岛效应中的脆弱性^[67]。社会隔离、护理水平的限制、生活条件以及缺乏相关热风险和预防的信息也是导致老人在热环境中死亡率上升的因素^[68]。高温环境下,老年人群的心血管疾病、脑血管疾病以及呼吸系统疾病发病率升高,死亡率明显上升^[69-70]。婴幼儿生理系统并不完善,不能很好地通过生理调节适应高温天气,患有腹泻、呼吸道感染和精神性缺陷疾病的婴儿在热浪期间最易受高温危害^[71]。

在高温和热浪环境中,对灾害的防护能力也影响着不同人群的高温抵御能力^[9]。患病人群或健康不佳的人群,包括患有心理健康和生理健康的人群,容易受到城市热岛效应的影响^[72]。低收入者以及受教育程度较低的人群也容易受城市温度增高影响^[73-74]。低收入者以及受教育程度较低的人群常从事体力劳动,而从事体力工作的人群在热环境中面临较高的风险^[75]。同时,这一群体通常经济情况不佳,不能很好地自主防护热风险。

此外,居住环境和工作环境也影响城市居民对城市温度上升的防护能力。居住在通风不佳或者没有空调住房的人是热浪易感人群,而具有良好通风条件的住房有利于创造舒适的室内环境,降低热死亡人数^[76]。

5 缓解热岛效应对健康影响的措施

缓解热岛效应对健康的影响本质上要改善城市的热环境,提高城市空气质量。现有减缓热岛效应

的研究从热岛的成因和影响因素出发,提出了很多具有实用性和科学性的方法。根据研究者考虑重点的不同,这些方法和措施主要分为 4 类: 1) 控制人为热的排放; 2) 优化城市土地利用空间布局模式; 3) 增加绿色植被面积, 提高城市表面反射率; 4) 合理规划城市通风廊道。

5.1 控制人为热的排放

人为热的排放是城市热岛效应热量的主要来源之一,合理地控制人为热排放可以有效地缓解城市热岛效应^[77]。传统的能源如煤炭、石油等化石燃料燃烧排放大量热量到空气中,并且化石燃料所产生的大量空气污染物严重影响人体健康。诸如风能、太阳能等新能源的使用可以有效减少化石燃料对城市环境的影响。研究表明机动车数量过载、烟尘排放量增加等现象会加剧城市的热岛效应^[78],因此合理管控交通、工厂等热排放源的排放。同时,提高能源利用效率,减少能源损耗也能有效缓解城市热岛效应。

5.2 优化城市土地利用空间布局模式

城市土地利用规划对城市热环境起到基础性作用,研究表明城市土地利用的结构和空间组合模式与城市热岛效应显著相关^[79],通过空间优化手段合理布局城市新增用地和城市在开发用地能够有效平衡城市建设需求和环境生态目标^[80-81]。空间优化手段也能使得有限的城市绿地合理分布,最大化城市绿地对于城市热岛效应的缓解作用,减轻城市居民的热暴露量。

5.3 增加绿色植被面积,提高城市表面反射率

增加绿色植被面积和改变城市表面反射率可以有效降低城市的热岛效应。城市绿地可通过植被光合作用、蒸腾和蒸散作用等来改变地表显热和潜热的分配,是调控城市热岛效应的重要因素之一^[82]。NDVI(Normalized Difference Vegetation Index, 归一化植被指数)是遥感领域中常用的对地面植被覆盖率进行有效度量的指标。一般来说,NDVI 值越高,植被覆盖率越高。研究表明,在 NDVI 值较高的绿色植被覆盖区,温度明显低于周围的建成区,这意味着植被能有效地缓解城市的热岛效应^[83]。在屋顶和建筑物表面涂抹覆盖反射率较高的涂料增强城市建筑对太阳反射,从而降低城市温度。Fallmann 发现增强地表反射率和绿色植被分别可以使 Stuttgart

市的日均温度降低 1.1 °C 和 1.7 °C^[84]。地面反射率的增加也可以使臭氧浓度降低^[85]。此外,城市的树木和高反射率的屋顶可以显著减少城市的能量消耗,从而改善城市空气质量^[86]。Sarah 对 California 定量分析了高太阳反射率的材料对热岛效应的缓解作用,发现高太阳反射材料的应用可以减少能量的消耗,提高空气质量^[87]。

5.4 合理规划城市通风廊道

此外,合理的城市通风设计能够改善城市风环境,有助于城市热量的分散,提高空气质量。通过建立城市通风廊道能有效地调节城市的气候,改变热岛环流,促进城市与周边地区的气流交换,提高城市空气的流动性。通风廊道的建设可以充分利用现有的绿地、水面以及道路,在改变风环境的同时可以产生更多的清新空气^[88]。风环境的改善能够有效治理城市的空气污染。

6 结论与展望

受全球气候变暖和城市化的影响,城市热岛效应逐渐成为全球城市的普遍问题。城市热岛效应会提高环境中的热风险,加重空气污染,对人体健康具有显著影响,尤其是对特定的脆弱群体,严重影响着城市居民的生命财产安全。因此控制并减缓热岛效应,是改善城市生态环境,提升居民生活质量极为重要的一步。

现有的关于城市热岛效应对人体健康影响的研究大多基于统计数据,采用流行病学的方法量化热岛效应对健康的影响。为了克服统计数据无法反应热岛效应的空间属性的缺陷,越来越多的学者将 GIS 与遥感手段引入到相关的研究中去。遥感为监测热岛提供具有良好的空间分辨率和时间重复性地面温度数据, GIS 为其提供强大的空间分析功能。将流行病学方法与遥感、GIS 结合起来研究城市热岛效应对人体健康的影响将会提高研究结果的科学性与准确度,有助于建立统一的健康风险评价体系,为了更好地量化与评估热岛效应的潜在影响则需要更深入的研究。

参考文献

- [1] MANLEY G. On the frequency of snowfall in metropolitan England[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84(359): 70-72.

- [2] SAILOR D J. Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(7): 1694–1704.
- [3] HOWARD L. The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it, vol 2[M]. London: Harvey and Darton, 1833.
- [4] OKE T R. Boundary layer climate[M]. Cambridge: Great Britain at the University Press, 1987.
- [5] KONOPACKI S, AKBARI H. Energy savings for heat-island reduction strategies in Chicago and Houston (including updates for Baton Rouge, Sacramento, and Salt Lake City) [R]. Lawrence Berkeley National Lab, 2002.
- [6] GOSLING S N, LOWE J A, MCGREGOR G R, et al. Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature[J]. *Climatic Change*, 2009, 92(3-4): 299–341.
- [7] HEAVISIDE C, MACINTYRE H, VARDOULAKIS S. The urban heat island: Implications for health in a changing environment[J]. *Current Environmental Health Reports*, 2017, 4(3): 296–305.
- [8] PIVER W T, ANDO M, YE F, et al. Temperature and air pollution as risk factors for heat stroke in Tokyo, July and August 1980-1995[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1999, 107(11): 911–916.
- [9] SEMENZA J C, RUBIN C H, FALTER K H, et al. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago[J]. *New England Journal of Medicine*, 1996, 335(2): 84–90.
- [10] CURRIERO F C. Temperature and Mortality in 11 Cities of the Eastern United States[J]. *American Journal of Epidemiology*, 2002, 155(1): 80–87.
- [11] MEDINA R, MERCEDES, ZANOBETTI A, et al. Extreme Temperatures and Mortality: Assessing Effect Modification by Personal Characteristics and Specific Cause of Death in a Multi-City Case-Only Analysis[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2006, 114(9): 1331–1336.
- [12] MASTRANGELO G, FEDELI U, VISENTIN C, et al. Pattern and determinants of hospitalization during heat waves: an ecologic study[J]. *BMC Public Health*, 2007, 7(1): 200.
- [13] BRAGA A L F, ZANOBETTI A, SCHWARTZ J. The Time Course of Weather-Related Deaths[J]. *Epidemiology*, 2001, 12(6): 662–667.
- [14] 冯雷, 李旭东. 高温热浪对人类健康影响的研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2016, 33(2): 92–98.
- [15] PATZ J A, CAMPBELL L D, HOLLOWAY T, et al. Impact of regional climate change on human health[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 310–317.
- [16] UNITED N. World urbanization prospects: the 2014 revision[M]. New York: Population Division, Department of Economic and Social Affairs, 2015.
- [17] 李耀锟, 巢纪平, 匡贡献. 城市热岛效应和气溶胶浓度的动力, 热力学分析[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 729–740.
- [18] 杨雅君, 邹振东, 赵文利, 等. 6 种城市下垫面热环境效应对比研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(5): 881–889.
- [19] 江晓燕, 张朝林, 高华, 等. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——个例分析[J]. *气象学报*, 2007, 65(2): 301–307.
- [20] GIRIDHARAN R, GANESAN S, LAU S S Y. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong[J]. *Energy & Buildings*, 2004, 36(6): 525–534.
- [21] KREY V, O'NEILL B C, VAN R B, et al. Urban and rural energy use and carbon dioxide emissions in Asia[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(supp_S3): S272–S283.
- [22] ZHOU Yuyu, WENG Qihao, GURNEY K R, et al. Estimation of the relationship between remotely sensed anthropogenic heat discharge and building energy use[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 67: 65–72.
- [23] HUANG Liangmei, LI Jianlong, ZHAO Dehua, et al. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 7–17.
- [24] 叶有华, 彭少麟, 周凯, 等. 功能区对热岛发生频率及其强度的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(5): 1868–1874.
- [25] 程迪, 王咏薇, 刘寿东, 等. 1959~2012 年夏季珠三角地区高温热浪的时空分布特征及其城市热岛效应的影响分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(1): 278–288.
- [26] 刘勇洪, 栾庆祖, 权维俊, 等. 基于多源卫星资料的京津唐城市群热环境研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(7): 1150–1158.
- [27] 李军, 赵彤, 朱维, 等. 基于 Landsat8 的重庆主城区城市热岛效应研究[J]. *山地学报*, 2018, 2018(3): 452–461.

- [28] ZHANG Yuzhou, CHENG Jie. Spatio-Temporal Analysis of Urban Heat Island Using Multisource Remote Sensing Data: A Case Study in Hangzhou, China[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(9): 3317-3326.
- [29] 白杨, 王晓云, 姜海梅, 等. 城市热岛效应研究进展[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(2): 101-106.
- [30] 李兴荣, 胡非, 舒文军. 北京夏季强热岛分析及数值模拟研究[J]. 气象, 2007, 33(6): 25-31.
- [31] GERGELY M, ANDRÁS Z G, TAMÁS G. Integration of an LCZ-based classification into WRF to assess the intra-urban temperature pattern under a heatwave period in Szeged, Hungary[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 138(1-2): 1139-1158.
- [32] 孙永, 王咏薇, 高阳华, 等. 复杂地形条件下城市热岛及局地环流特征的数值模拟[J]. 大气科学学报, 2019, 42(02): 122-134.
- [33] 洪传洁, 阚海东, 陈秉衡. 城市大气污染健康危险度评价的方法, 第五讲, 大气污染对城市居民健康危害的定量评估(续五)[J]. 环境与健康杂志, 2005, 22(1): 62-64.
- [34] 钱孝琳, 阚海东. 大气颗粒物污染对心血管系统影响的流行病学研究进展[J]. Chinese journal of Epidemiology, 2005, 26(12): 999-1001.
- [35] 陈慧, 王建生, 尚琪. 大气颗粒物污染对人群心脑血管疾病死亡急性效应的 Meta 分析[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(5): 417-421.
- [36] CURRIERO F C, HEINER K S, SAMET J M, et al. Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States[J]. American Journal of Epidemiology, 2002, 155(1): 80-87.
- [37] AI I, HAJAT S, KOVATS R S, et al. An ecological time-series study of heat-related mortality in three European cities[J]. Environmental Health, 2008, 7(1): 5-5.
- [38] WANG Dan, LAU K K L, REN Chao, et al. The impact of extremely hot weather events on all-cause mortality in a highly urbanized and densely populated subtropical city: A 10-year time-series study (2006-2015)[J]. Science of the Total Environment, 2019, 690: 923-931.
- [39] MACLURE M. The case-crossover design: a method for studying transient effects on the risk of acute events[J]. American journal of epidemiology, 1991, 133(2): 144-153.
- [40] STAFOGGIA M, FORASTIERE F, AGOSTINI D, et al. Vulnerability to heat-related mortality: a multicity, population-based, case-crossover analysis[J]. Epidemiology, 2006, 17(3): 315-323.
- [41] XU Rongbin, ZHAO Qi, COELHO M S Z S, et al. The association between heat exposure and hospitalization for undernutrition in Brazil during 2000-2015: A nationwide case-crossover study[J]. PLoS Medicine. 2019, 16(10): 1-16.
- [42] VARGHESE B M, BARNETT A G, HANSEN A L, et al. Geographical variation in risk of work-related injuries and illnesses associated with ambient temperatures: A multi-city case-crossover study in Australia, 2005-2016[J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 898-906.
- [43] 阚海东, CIFUENTS L, 汪宏, 等. 城市大气污染健康危险度评价的方法第六讲大气污染健康危害的经济学评价及其计算机平台的建立(续六) [J]. 环境与健康杂志, 2005, 22(2): 146-148.
- [44] REID C E, O'NEILL M S, GRONLUND C J, et al. Mapping community determinants of heat vulnerability[J]. Environ Health Perspect, 2009, 117(11): 1730-1736.
- [45] TOMLINSON C J, CHAPMAN L, THORNES J E, et al. Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: a case study for Birmingham, UK[J]. International Journal of Health Geographics, 2011, 10(1): 42-55.
- [46] 陈倩, 丁明军, 杨续超, 等. 长江三角洲地区高温热浪人群健康风险评价[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(11): 1475-1484.
- [47] MACINTYRE H L, HEAVISIDE C, VARDOULAKIS S. Modelling the health impacts of the Urban Heat Island, and the potential benefits of mitigation interventions in a UK city[C]// International Conference on Urban Risks. 2016.
- [48] HEAVISIDE C, VARDOULAKIS S, CAI X M. Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK[J]. Environmental Health, 2016, 15(1): 49-59.
- [49] STONE JR. B, HABEEB D, VARGO J, et al. Avoided heat-related mortality through climate adaptation strategies in three US cities[J]. PLoS ONE, 2014, 9(6): e100852.
- [50] KOVATS R S, HAJAT S. Heat stress and public health: a critical review[J]. Annual Review of Public Health, 2008, 29: 41-55.
- [51] 尚琪, 王金敖, 刘颖, 等. 中国热环境与健康研究的进展[J]. 卫生研究, 2001, 30(6): 383-384.
- [52] PETITTI D B, HONDULA D M, YANG S, et al. Multiple trigger points for quantifying heat-health impacts: new

- evidence from a hot climate[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2016, 124(2): 176–183.
- [53] ROONEY C, MCMICHAEL A J, KOVATS R S, et al. Excess mortality in England and Wales, and in Greater London, during the 1995 heatwave[J]. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 1998, 52(8): 482–486.
- [54] DE U S, KHOLE M, DANDEKAR M M. Meteorological Office, Pune-411 005[J]. *Natural Hazards*, 2004, 31(2): 487–497.
- [55] SCHÄR C, VIDALE P L, LÜTHI D, et al. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves[J]. *Nature*, 2004, 427(6972): 332–336.
- [56] MEEHL G A, TEBALDI C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century[J]. *Science*, 2004, 305(5686): 994–997.
- [57] 徐祥德. 城市化环境大气污染模型动力学问题[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(U01): 1–12.
- [58] WANG Xuemei, HAN Zhiwei. Surface ozone concentration in Guangzhou under different meteorological conditions[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20(5): 571–578.
- [59] ASLAM M Y, KRISHNA K R, BEIG G, et al. Diurnal Evolution of Urban Heat Island and Its Impact on Air Quality by Using Ground Observations (SAFAR) over New Delhi[J]. *Open Journal of Air Pollution*, 2017, 6(02): 52–64.
- [60] XU Linyu, YIN Hao, XIE Xiaodong. Health risk assessment of inhalable particulate matter in Beijing based on the thermal environment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(12): 12368–12388.
- [61] RAINHAM D G C, SMOYER-TOMIC K E. The role of air pollution in the relationship between a heat stress index and human mortality in Toronto[J]. *Environmental Research*, 2003, 93(1): 9–19.
- [62] 李湉湉, 杜宗豪, 程艳丽. 气候变化下热浪对人群健康的风险及健康经济损失预估研究进展[J]. *中华预防医学杂志*, 2014, 9: 845–848.
- [63] BUNYAVANICH S, LANDRIGAN C P, MCMICHAEL A J, et al. The impact of climate change on child health[J]. *Ambul Pediatr*, 2003, 3(1): 44–52.
- [64] CUTTER S L, FINCH C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(7): 2301–2306.
- [65] NAKAI S, ITOH T, MORIMOTO T. Deaths from heat-stroke in Japan: 1968–1994[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 43(3): 124–127.
- [66] FLYNN A, MCGREEVY C, MULKERRIN E C. Why do older patients die in a heatwave? [J]. *Qjm-an International Journal of Medicine*, 2005, 98(3): 227–229.
- [67] TAN Jianguo. Commentary: People's vulnerability to heat wave[J]. *International Journal of Epidemiology*, 2008, 37(2): 318–320.
- [68] VANHEMS P, GAMBOTTI L, FABRY J. Excess rate of in-hospital death in Lyons, France, during the August 2003 heat wave[J]. *New England Journal of Medicine*, 2003, 349(21): 2077–2078.
- [69] KNOWLTON K, ROTKIN-ELLMAN M, KING G, et al. The 2006 California Heat Wave: Impacts on Hospitalizations and Emergency Department Visits[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2009, 117(1): 61–67.
- [70] ROCKLÖV J, FORSBERG B, EBI K, et al. Susceptibility to mortality related to temperature and heat and cold wave duration in the population of Stockholm County, Sweden[J]. *Global Health Action*, 2014, 7(1): 22737.
- [71] 谈建国, 黄家鑫. 热浪对人体健康的影响及其研究方法[J]. *气候与环境研究*, 2004, 9(4): 680–686.
- [72] NAUGHTON M P, HENDERSON A, MIRABELLI M C, et al. Heat-related mortality during a 1999 heat wave in Chicago[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2002, 22(4): 221–227.
- [73] SOUCH C, GRIMMOND C S B. Applied Climatology: 'heat waves'[J]. *Progress in Physical Geography*, 2004, 28(4): 599–606.
- [74] O'NEILL M S, ZANOBETTI A, SCHWARTZ J. Modifiers of the temperature and mortality association in seven US cities[J]. *American Journal of Epidemiology*, 2003, 157(12): 1074–1082.
- [75] SPECTOR J T, BONAUTO D K, SHEPPARD L, et al. A case-crossover study of heat exposure and injury risk in outdoor agricultural workers[J]. *PLoS One*, 2016, 11(10): e0164498.
- [76] SEMENZA J C, MCCULLOUGH J E, FLANDERS W D, et al. Excess hospital admissions during the July 1995 heat wave in Chicago[J]. *American Journal of Preventive medicine*, 1999, 16(4): 269–277.

- [77] KHAMCHIANGTA D, DHAKAL S. Physical and non-physical factors driving urban heat island: Case of Bangkok Metropolitan Administration, Thailand[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 248: 109285.
- [78] 徐洪伟. 济南城市热岛动态变化遥感定量监测及其驱动因素分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(10): 80–85.
- [79] ZHOU Weiqi, HUANG Ganlin, CADENASSO M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(1), 54–63.
- [80] CAO Kai, HUANG Bo, WANG Shaowen, et al. Sustainable land use optimization using Boundary-based Fast Genetic Algorithm[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2012, 36(3), 257–269.
- [81] ZHANG Wenting, HUANG Bo. Land use optimization for a rapidly urbanizing city with regard to local climate change: Shenzhen as a case study[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2014, 141(1), 05014007.
- [82] 王刚, 张秋平, 肖荣波, 等. 城市绿地对热岛效应的调控功能研究——以广州为例[J]. *生态科学*, 2017, 36(1): 170–176.
- [83] 张新乐, 张树文, 李颖, 等. 城市热环境与土地利用类型格局的相关性分析[J]. *资源科学*, 2008, 30(10): 390–396.
- [84] FALLMANN J, EMEIS S, SUPPAN P. Mitigation of urban heat stress—a modelling case study for the area of Stuttgart[J]. *DIE ERDE—Journal of the Geographical Society of Berlin*, 2014, 144(3–4): 202–216.
- [85] TAHA H. Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(11): 1667–1676.
- [86] AKBARI H, POMERANTZ M, TAHA H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas[J]. *Solar Energy*, 2001, 70(3): 295–310.
- [87] BRETZ S, AKBARI H, ROSENFELD A. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands[J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(1): 95–101.
- [88] 陈宏, 周雪帆, 戴菲, 等. 应对城市热岛效应及空气污染的通风道规划研究[J]. *现代城市研究*, 2014, 7: 24–30.