

城市热岛效应与生态系统的关系及减缓措施^{*}

徐 洪^{1)†} 杨世莉²⁾

(1)北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,100875,北京; 2)北京市气象探测中心,100089,北京)

摘要 城市热岛效应是人为影响气候最显著的特征之一. 热岛引起地表温度的升高和水分改变,对城市生态系统的物质能量流动和城市生态系统结构与功能必将产生深远的影响. 城市中的自然生态系统或自然—人工生态系统可通过改善城市下垫面的热属性,对热岛效应有一定的缓解作用. 本文综述了城市热岛效应及其特征、城市热岛对植被物候和碳氮循环的影响及生态系统在减缓热岛效应中的作用. 理解城市热岛效应的特征、影响因素及其与生态系统的关系,对开展缓解城市热岛的策略研究、改善城市生态环境具有重要意义.

关键词 城市热岛; 生态系统; 植被物候; 碳氮循环; 减缓

中图分类号 X171, Q143

DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2018.06.014

城市化和全球气候变化是人类发展的两大特征,以热岛效应为主要特征的城市气候变化对全球环境演变、生态系统结构和功能以及人类健康均具有重要的影响^[1-2]. 广义而言,城市温度高于周边乡村的现象便称为城市热岛效应(urban heat island, UHI). 城市热岛是城市气候最明显的特征之一,是城市化和工业化过程中人类活动对气候影响的重要形式. 伴随着城市化的进程,热岛效应越来越受到科学界的普遍关注.

城市热岛由城市特殊的表面和城市居民活动散发的热量共同产生. 城市内大量人工构建物具有吸热快和热容量小,且吸收的热量易于以感热形式储存等特点^[3],在太阳辐射下,升温快、温度高. 同时,近地层风量小导致被加热的空气不能迅速扩散,使其在相同气候条件下,比绿地和其他自然下垫面温度更高、升温更快,从而形成了城市高温区域. 城市规模越大,人口越多,城市热岛强度也越强^[4-5].

城市热岛可通过影响植被生境条件,影响到生态系统的结构和功能^[6],从而对城市大气环境、水文、土壤、生物习性以及城市居民健康等产生影响. 而作为城市下垫面的重要组成部分,以植被、水体为主的生态系统则通过植被生长以及土壤、植被和开阔水体的蒸散发作用等,影响城市温度和水分^[7],在调节和减缓城市热岛效应中具有重要的地位,承担着越来越重要的生态和社会功能. 客观地评价城市热岛效应特征及生态系统在城市热岛效应中的地位及作用,对减缓城市热岛效应的研究和实践中进行合理的城市绿地规划、提高

植被覆盖度,保护水系和增加湿地,改进城市建筑材料和加强建筑群绿化等均具有指导意义. 同时,可为深入开展多尺度的城市热岛效应机制研究,提高生态系统服务功能,改善城市生态环境、实现城市可持续发展提供理论支持.

1 城市热岛效应的特征及对生态系统的影响

1.1 热岛效应的主要特征 城市热岛是由特定的城市条件下产生的热量引起,具有可控性和不可控性²个方面. 可控性主要是与城市的设计与规划相关,在一定程度上可以人为加以调控,而不可控性则主要与自然和环境相关. 由于城市边界层热力和动力过程的复杂性,不同区域和城市的热岛效应存在很大的差异,同一城市的热岛效应也存在明显的季节变化特征^[8],这是土地覆盖、风速变化、大气和地表湿度状况以及人为活动季节变化共同作用的结果. 如北京城市中心在夏季形成的热岛强度和范围最大,冬季城区中心则变成冷岛^[9]. 在上海,热岛强度总体上以秋季最强,冬季次之,夏季最弱^[4]. 但是在印度南部沿海城市 Kochi,热岛效应则是冬强夏弱^[10]. 热岛效应年际间变化的驱动力则主要源于下垫面性质的改变. 如1991—2000年是上海热岛强度增长最快的时期,达到了 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,是1961—1970年增温速率的2倍多,而这一时期也是上海工业化和城市化发展最迅速的时期^[4].

城市热岛效应受城市植被覆盖率以及城市各个区

^{*} 国家自然科学基金资助项目(41505134)

[†] 通信作者, e-mail: xuhong@bnu.edu.cn

收稿日期:2018-07-17

域的植被遮阴度的直接影响. 对城市土地利用假设情景的模拟结果显示,若西湖和西溪湿地被城市建设取代,杭州市年平均气温将上升 0.5°C ^[11]. 在英国,这种从林地到柏油表面的变化则会使日最高气温上升 3.2°C ^[12]. 虽然城市热岛效应是较小尺度上的局地气候事件,但全球性的气候变暖会进一步强化城市热岛效应对城市居民的影响. 然而,目前对由下垫面改变和气候变暖对热岛效应长期变化的定量贡献还缺乏足够的评估.

1.2 热岛效应对生态系统的影响

1.2.1 热岛效应影响下的植物物候

城市热岛使得城市近地表热量结构发生改变,提高了城市温度,从而对植物的物候、生理活动、种群结构、分布范围以及繁殖活动等产生影响^[13-14]. 光照和温度被认为是植物物候事件的主要触发器,而对城市植物开花物候的研究则显示植物开花时间提前和落叶时间延迟现象由城市热岛效应引发.

Menzel 研究发现^[15],1950 年以来,欧美地区植物开花和展叶期每 10 a 提前 $1.2\sim 3.8$ d. 2001 年 MODIS 数据显示北美中高纬度地区城市内植被返青期比郊区提前 $4\sim 9$ d,休眠期则推迟 $2\sim 16$ d^[16]. 对北美洲东部地区 70 个城市的研究发现:植物生长期比周边的郊区延长了大约 15 d;早春每增加 1°C ,植物开花会提前 3 d;春天市区地表温度比乡村平均高 2.3°C ,植物变绿时间提前了 7 d,而秋天市区温度较郊区高出 1.5°C ,植物落叶则延迟了 8 d. White 等^[17]借助城市植被覆盖度、均一化植被指数 (NDVI) 数据,对 1990—2000 年美国东部城市生态系统进行了研究,发现植物开始生长提前了 5.7 d,总生命长度延长了 7.6 d. Fisher 等^[18]基于 MODIS 数据也得到了类似的结果.

Han 等^[19]对中国长江流域 6 个城市的研究结果显示,植被开始生长平均提前了 5.9 d,总生命长度延长了 12 d. 对上海城市植被的研究发现,与周边农村地区相比,城市中心的植被生长季起始日提前 $5\sim 10$ d,生长季终止日推迟 $5\sim 11$ d^[20]. 王静等^[21]对北京市 7 种早春草本植物开花期物候的观测也发现:温度因子和早春草本植物开花物候期均随城市化梯度发生变化,越靠近城市中心区,温度和积温越高;早春草本植物开花物候期出现时间越早,平均提前了 $2\sim 4$ d,但开花期持续时间与开花速率并不随城市化梯度发生明显变化. 城市郊区物候的差异具有很大的年际变化,且不能完全由温度的差异来解释,但温度可解释物候起始日中超过 $2/3$ 的差异^[22].

基于 MODIS 数据,Zhang 等^[16]研究了温度对不同土地覆盖类型植物开花物候影响的差异,发现林地

最为敏感,而草地覆盖的区域则最不敏感. Roger 等^[23]指出,城市植物开花提前与城市的温度和 CO_2 浓度均具有相关性. Mimet 等^[14]发现,相对于乡村而言,城市环境使得植被物候提前,特别是春季物候期和花期. Jochner 等^[13]和 Mimet 等^[14]均指出:气温对植物物候的影响最大,城市区域日较差(日最高温减日最低温)的降低是春季物候期提前的主要原因. 然而,对近郊农作物而言,受其影响开花提前和花期缩短,可使植株徒长、株体变弱,从而产量降低. 城市热岛造成的温度升高还可促进近地层臭氧形成,导致近郊农作物减产 $5\%\sim 10\%$ ^[24]. 对印度的研究也显示,城市对热量的集中,特别是夜间的热岛效应对农作物的影响范围更大^[25].

1.2.2 热岛效应对植物生长和物质循环的影响

城市热岛改变了地表能量结构,提高了城市区域的温度,改变了植被的生命周期,且与农村环境相比,城市地区较高的 CO_2 浓度、大气氮沉降和较低的臭氧浓度,均可进一步促进城市植被的生长^[26]. Sugden^[27]发现,城市温度升高更利于 C_4 植物生长. Son 等^[28]利用 2000—2009 年首尔 NDVI 数据评价了温度改变对城市植被的影响,结果发现,若年均温度增加 1°C ,低 NDVI 植被的死亡率最高. 温度升高也促进了外来植物入侵,而城市热岛效应加剧了这些影响,使本不属于该区系的植物在城市中慢慢得到驯化,并得以繁殖生长^[29]. 另一方面,由于温度的升高,尤其是极端高温的增加,又限制了一些植物的生长,降低了土著植物的多样性^[30].

城市温度上升使得植被生长速率改变,生命周期延长,城市地区的植物需水量明显高于周围的农村地区,从而造成与之紧密联系的生物地球化学过程也随之改变. Zipper 等^[31]研究发现,美国威斯康辛州的城市生长季植被潜在蒸散量较周边农村地区增加了 10% ,这对城市生态系统中的水和碳循环势必产生影响. 此外,热岛效应在提高城市植被的生产力的同时,相应的也增加了生态系统呼吸,造成土壤碳储量下降^[29]. 例如 Meineke 等^[32]对北美的研究发现,城市的高温减缓了树木生长,使树木固碳量下降了 12% . 此外,尽管城市的湿度比周边郊区要低,但由于灌溉等原因,城市内的土壤湿度普遍高于郊区^[33],从而影响植物凋落物的分解和植物土壤间营养的流动.

相对于碳循环而言,城市热岛对氮循环的影响比较复杂. 城市是大气的氮源,包括由燃烧排放的 NO 转化而来的 NO_2 、 HNO 和气态 NO_3 ,以及源于城市农用地的 NH_3 和 NH_4^+ ^[34]. 温度升高也加快了土壤中的硝化、反硝化、有机质分解和 N 的矿化作用速率. 而土壤

水分的升高则将土壤硝酸盐转化为氮气的能力降低,从而人为地增加了反硝化作用,对 N_2O 气体的产生和排放产生影响。

总体来看,城市热岛效应使植物春季物候和花期提前,秋季物候延后,植物生长季延长。植物生长的改变无疑将对城市生态环境和物质与能量流动产生影响,而后者通过改变城市表面粗糙度、风速和风向,截获太阳辐射及改变水汽通量,对局地小气候产生影响进而影响城市热岛效应的强度和空间格局。

2 生态系统在缓解城市热岛效应中的作用

2.1 城市绿地有利于缓解城市热岛效应 城市绿地对当地微气候的调节明显,在缓解城市热岛效应中具有积极的作用。植被可通过夏季遮蔽房屋和冬季降低风速,大幅减少城市地区供暖和空调的能源消耗。此外,还可通过改变反照率,提高植物遮阴度和改变潜热通量等降低城市温度。一个规模大于 3 hm^2 且绿化覆盖率达到 60% 的绿地,其内部的热辐射强度会达到与郊区自然下垫面的热辐射强度相当的程度^[35]。McPherson 等^[36] 研究显示,芝加哥树木覆盖率增加 10%,或单位建筑场地植树 3 棵,可减少每户 50~90 美元的供暖和供冷总能量。基于对纽约 50 a 反照率的分析,Susca 等^[37] 指出,对植被和建筑物并存的城市地区,植被面积最大化的降温幅度为 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 。对美国 4 种不同气候城市的研究表明:在寒冷的地区,具有浓密树荫的树和针叶树一样,可增加 21% 的采暖成本,但落叶树的影响不大;而在温带和炎热气候的城市,浓荫树使每年的制冷成本降低 53%~61%,峰值冷负荷降低 32%~49%^[36]。

城市绿化覆盖率越高降温效应越明显,而在绿化覆盖率相当的情况下,大面积集中的绿地的降温效应明显高于面积小的绿地。对北京市的研究也发现,城市绿化地区月平均气温比高层建筑与柏油路面集中区偏低约 $1.0\text{ }^\circ\text{C}$ ^[38]。城市陆面模式的对比研究认为,减少人为热排放、增加反照率和城市绿化,均能不同程度地减缓热岛效应。城区内的植被,特别是树木,可通过冠层降低到达地表的太阳辐射,从而遏制地表温度的上升;同时通过林木的蒸腾作用吸收热量增加潜热交换,从而有利于缓解热岛效应。Ballinas 等^[39] 研发了一个较为成熟的气候和物理生物模型,并据此计算了树木个体通过日蒸散发的形式对热岛效应的深远影响。基于遥感数据的能量平衡模式计算结果显示,北京市地表温度、感热通量和波文比(Bowen ratio)均与地表植被覆盖度呈负相关,因而表现为这些特征值从城区向

近郊和远郊区的递减趋势^[40]。

不同类型的绿地,其对城市热岛的降温效果不同,通常乔木的降温作用高于灌木和草本植物。对北京市 52 种针叶树、阔叶树、灌木和花卉等植物表面温度的测定表明,各种植物表面在暖季均有明显降温作用,而冷季有升温效应,其作用由大到小分别为阔叶树、花卉植物和灌木、针叶树^[41],这一顺序与植被的水分蒸腾强度相一致。张明丽等^[42] 基于对上海市植物群落的广泛调查,选取了 14 个典型群落进行降温增湿效果的测定,结果表明:结构复杂、郁闭度高、叶面积指数大、植株高的群落降温增湿作用明显。唐罗忠等^[43] 对南京市不同类型绿地对城市热岛效应的缓解作用的研究显示,树林最强,行道树次之,草坪较弱。李英汉等^[44] 通过对城市内不同结构的植物绿化三维量与温度相关性的分析,指出乔木的遮阳作用是植物降温效应的主要影响因子。对荷兰鹿特丹市的相关数据测定表明,阔叶林木生长期内的日蒸腾水量约为 $4.5\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[45],是冠层能够保持温度偏低的主要原因。对加拿大蒙特利尔市而言,树冠直径大的群落比树高的群落在夏季更能有效降低城市温度^[46]。

2.2 城市湿地也是缓解城市热岛效应的主要贡献者

与植被覆盖的绿地相似,具有开放水面的湿地也是缓解城市热岛效应的主要贡献者,且同样具有显著的季节和昼夜差异。Steenefeld 等^[47] 通过对鹿特丹市的气象测定数据分析发现,城市开放水域有利于抑制水体上方及附近的昼夜温差和季节变幅,有利于抑制城市极端高温。

由于水体具有较大的储热能力,总体上说,低温期(季节变化时的冬季、日变化时的夜晚)湿地反而可能增加城市热岛效应。Hathway 和 Sharples 的研究^[48] 给出了类似的结果:在春季,河流水温度较低,其降温效应约为 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$,但是到了夏季,随着水体温度的升高,水体的凉岛(cool island)作用也会相应减弱;即便如此,夏季湿地地表温度可比城市建成区(指建筑物和陆面)地表温度低。康晓明等^[49] 基于遥感影像和野外观测,对北京市不同地表类型的温度频率和不同湿地类型的降温效果进行了研究,发现湿地可显著缓解城市热岛效应,其降温效果高于植被和裸地,且湖库湿地降温效果高于河流湿地。

通常而言,水体温度比周围城市环境低 $2\sim6\text{ }^\circ\text{C}$ ^[50]。城市中根植于植被和水体中的蒸发蒸腾量的增加,可以有效地减小热岛效应的影响。而关于水体对城市温度的影响,特别是水体在白天和夜晚影响之间的差异,以及城市对水体这种移动冷却器的规划和设计问题还没有得到充分的评估^[50]。

2.3 城市覆盖特性改变可减缓城市热岛效应 城市土地蒸发冷却的减少是热岛效应的直接驱动力。Zhao等^[51]采用气候模型研究发现,对北美各地城市白天温差的地理变化,可主要由城市和周边农村地区将热量传递到低层大气的效率变化来解释。这种对流效应取决于当地的背景气候,且受当地气候干燥程度的影响。Luber和GcGeihin提出给城市“降温”的概念以减缓热岛效应^[52]。“城市降温”的策略包括:提高树木覆盖率以遮蔽建筑物;增加社区、街道公园及屋顶花园等绿地面积;采用具有高反照率材料的屋顶和路面以减少太阳辐射造成的热累积等。

城区绿化造林可通过冠层对太阳辐射的截获和冠层蒸发的潜热吸收减缓地表升温,从而有效缓解热岛效应导致的局域气温偏高。增加公园(绿地和湿地综合分布区)面积也是减缓城市热岛行之有效的手段。Sugawara等^[53]指出,大面积的公园可降低东京市的热岛效应,且静风条件下,公园的降温面积可延伸到周边200 m的区域。对上海市15个公园的研究表明,公园面积和植物群落结构对秋季公园气温和公园凉岛强度均有显著影响,而后者则存在显著的定量关系^[54]。公园内不同植物群落类型的降温效果存在差异,以乔木、灌木、草丛降温效果最好。对埃塞俄比亚首都21个公园的研究结果显示,从较大的空间尺度而言,公园的降温效果与NDVI和公园面积显著正相关^[55]。

3 探讨缓减城市热岛效应的措施

降低城市热岛效应及相应的环境风险,对制定气候变化背景下的城市热岛缓解策略,提高城市居民舒适性和城市宜居性具有重要意义。不同的研究者将城市热岛减缓措施分为不同的层面^[56-57]。总体而言,在特定的自然地貌和水系网、有限的城市土地资源和水资源约束下,植被群落组成和分布格局、可持续的城市水体管理、建筑物材料选择和外形设计等,对减缓城市热岛具有直接的影响^[58]。近30年来,城市热岛及其减缓技术研究的主要特征之一也是注重开发改变城市结构和景观的材料、方法和政策^[59]。

3.1 调整与厘定城市及其所在区域土地利用格局

基于合理城市覆盖特性的土地利用格局是有效应对热岛效应的核心,有利于提高对城市热岛的降温效果。建筑物、街道、房顶等的结构和布局,决定了其对太阳能的吸收和风流的形成,而绿地建设则有利于提高城市景观,增加宜居性,并可明显改善城市下垫面的热属性。城区一年内不同季节太阳高度角、主要风向均有不同;一天内的不同时刻,环境因子也在变化。因而调整城市及其所在区域土地利用总体布局,厘定其各类土

地利用比例,优化绿地、街区、道路、建筑等格局,兼顾夏季阴影覆盖面积,提高冬季太阳辐射接收量,并适当设置通风渠道(城市风道建设),通过增加空气流动提高潜热输送而降低空气温度,对改善全年热舒适度具有较好的效果。

增加城市绿地面积无疑是减缓热岛效应的最直接有效的措施,而如何在有限的土地资源下,保持绿地面积不变而使得土地利用格局效益最大化也是很多城市面临的实际问题。相对于草本植物而言,增加乔木种植除可降低空气温度外,更重要的是其通过对辐射的吸收和拦截降低平均辐射温度,从而有利于提高热舒适度。植物群落结构越复杂、郁闭度越高、叶面积指数(LAI)越大,其降温增湿效果越明显^[60]。在优化绿地建设中,仅仅种植草地,其对热岛效应的减缓效果不佳,而“灌丛草地”“乔木草地”和“乔木灌丛草地”等绿地组合可以提高降温增湿效果,从而有效降低城市温度和舒适度^[60]。同时,也应根据城市本身的特点,采取“适地适树”的原则,选择合适的绿地类型和植被物种。

对于绿地布局在建筑物设计和城市规划的作用,研究者通过确定合理的绿容积率(GPR)^[61],提出草地、灌丛、成年树的LAI宜为1.36~10.00。Cao等^[62]利用遥感数据分析了城市绿地的几何特征对缓解热岛效应的影响。城市公园的凉岛效应会随着辐射强度的季节变化而有所不同,并随着绿地面积的增加呈现非线性增强。就其组成来说,树和灌木越多,表现出的凉岛效应越强。Onishi等^[63]使用多变量线性回归模型研究了日本不同季节的地表温度和土地利用/土地覆盖之间的关系,并基于2个植被类型情景分析了热岛效应的减缓潜力。研究发现,不同土地利用类型具有显著的季节和时间差异,平均而言,夏季和春节2个情景的地表温度均有下降,夏季最大地表温度下降可超过7℃。有学者也指出采取特定的土地利用规划策略可以有效地减缓约40%的城市热岛效应^[64]。

虽然增加绿地覆盖可有效降低环境温度,但相应地提高了城市的需水量,对处于较干旱地区的城市意义不大。对那些干旱的地区,改变建筑物形状和格局,提高建筑表面材料的反照率降低热容量,或许是更好的选择^[65]。因此,在城市土地利用格局设计及优化绿地建设时,需综合考虑市内公园、草坪、街道、广场、道路等热状况,并结合环境因子定量评价其总体降温效果。

3.2 发挥城市水体与湿地降温效果 在城市地区,水体通过蒸发过程对环境小气候有积极的影响。水体热容量大,白天通过大量水分蒸发,将能量以潜热的方式向外输送,在一定程度上降低水体周边区域温度。此

外,水体通过吸收太阳短波辐射及向大气中输送潜热的方式降低周围尤其是下风向气温,提高热舒适程度,同时也会增加空气湿度,对热环境具有一定抵消作用。城市水体可通过 2 种方式缓解热岛效应:通过蒸发,利用水的冷却效果降温(如池塘和喷泉);通过河流和运河,将热量从城市中心传送出去。水体的冷却效应根据类型(海洋、河口、河流、湖泊和沼泽)和几何形状而变化。例如,流动/分散的水(例如喷泉)比停滞水更冷^[66]。除了冷却效果之外,水体(如水池)为城市居民提供了降低其体温的场所,从而减少热岛对人类健康(如呼吸问题和与高温有关的死亡率)的负面影响。

城市内水体面积和分布对减缓城市热岛效应具有直接的影响,特别是城市湿地的形状和位置及其与城市主导风向间的走向关系,通过调节微气候,对城市凉岛的影响非常重要。Sun 等^[67]采用 ASTER 图像对北京市 10 个水库/湖泊和 5 条河流的研究显示,城市的冷岛强度与湿地景观形状指数呈正相关,此外,该强度也由市区的湿地分布位置决定。因此,湿地形状和位置是影响城市区域冷岛强度的重要指标,其在量化湿地小气候调节服务以及设计城市景观以减轻热岛效应方面有重要意义。Cai 等^[68]以福州市天然湿地分布区为例,定量分析了土地利用/土地覆被变化对城市热岛格局的影响,结果显示:1989—2009 年土地利用发生了显著变化,改变了城市热岛的地表特征和时空格局;小尺寸的碎片湿地斑块对应的地表温度较高,而大尺寸的聚集斑块则对应更低和更稳定的地表温度。

城市湿地有较大的比热容和较强的水分蒸散度,对周边的空气温度和湿度都起到显著的调节作用,其气候调节的功能价值最高可达湿地生态系统服务总价值的 32%^[69]。但目前的研究成果多以定性和半定量为主,缺乏结合景观尺度的湿地面积或组成与降温距离、季节动态等的定量关系的研究。在城市生态建设中,如何充分发挥恢复湿地和未来新增湿地在调节城市区域小气候、减缓城市热岛效应的功能,特别是开展城市湿地风岛效应、雨岛效应的幅度、范围、影响因素等方面的研究,是未来值得关注的方向。

3.3 改进城市建筑材料并加强建筑屋顶绿化 应对城市热岛效应还可通过建筑技术、工艺、材料改性等来实现。如使用可提高对太阳光反射率的建筑物表面材料,使用能降温节能、缓解热岛强度的户外建筑材料和渗透性较好的地面铺装材料、改变城市建筑物的形状等。Francis 和 Jensen^[70]对 17 组研究数据的再分析发现,绿色屋顶可降低街区尺度温度 0.03~3.00℃,且主要集中在一年中温度较高的阶段。而 Taleghani 等^[71]比较了冷屋顶(cool roof)、绿色屋顶(green

roof)、冷铺路面(cool pavement)和提高街道植被覆盖(increased street-level vegetation)4 种不同措施的有效性,指出:由于冷屋顶和绿色屋顶改变的是屋顶尺度即高于行人高度的能量平衡,因此对城市内行人的热舒适性影响最小。Coutts 等^[72]比较了 4 个实验屋顶的隔热性、辐射收支和地表能量平衡,指出:结合绝缘设计的冷屋顶,可对城市热缓解提供最大的整体效益。对澳大利亚南部的研究显示,增加绿屋顶面积 30%可有效降低电消耗^[73]。基于模型和高分辨率数据模拟,Li 等^[74]指出,若城市热岛的地表温度降低 1℃,华盛顿市区 30%的屋顶面积需要替换为绿屋顶,或反照率为 0.7 的冷屋顶。

城市化和道路建设是导致热岛现象的重要原因之一,因此改进城市道路路面、人行道路面、停车场等硬化地面部分的建筑材料,或透水混凝土铺装系统,对减缓热岛效应有积极的意义。现有的研究显示,使用表面温度显著降低、对大气显热通量减少的冷铺路的降温潜力十分显著,对降低城市环境温度有很大贡献^[75]。在雅典西部一个总占地面积 37 000 m² 的主要交通枢纽中大规模实施冷沥青混凝土路面设计,是目前世界上最大的城市缓解项目之一。通过整个夏季对该区域的监测,并基于流体动力学模拟评估应用的热影响结果显示,冷却的非老化沥青可降低空气温度达 1.5℃,最大表面温度降低可达 11.5℃,较大地改善了热舒适条件^[76]。此外,无论是否有植物,透水性路面更适合于雨水和潮湿地区,目前该方面的研究主要涉及在生物制品钢、高炉细粉、细质透水砂浆、底灰和粉煤灰、泥炭苔藓和工业废料等路面中添加助剂等,旨在提高路面的毛细能力,以增加材料的含水量和蒸发能力^[75]。

借助于城市绿地的降温效果,在建筑屋顶加入绿化设计(green-roof vegetation,指建筑物顶部部分或全部覆盖植被),可降低感热,从而有效降低建筑物温度。由于蒸发蒸腾和降低下部屋顶边界热通量的附加绝缘效应的共同作用,覆盖有植被的屋顶比传统的屋顶对周围环境的温度降低效果更明显。Lundholm 等^[77]通过研究绿色屋顶搭配种植单一和多种植被评价其对城市的降温作用,结果显示绿色屋顶的降温功能可随种植植物多样性的增加而得到提高,由此把绿色屋顶混合种植高大的禾本植物、草和肉质植物作为推荐方案。Dvorak 和 Volder^[78]总结了北美绿屋顶的 28 项研究,提出适宜绿化屋顶的植被类型,并指出虽然房顶绿化具有较好的效果和可观的前景,但是对屋顶植被和生态系统研究仍然存在不足,生态区和植物多样性方面仍有大量的研究需要开展。

传统用于降温的屋顶为具有高反照率的白色反射

屋顶,在阳光充足的气候下,传统的反射式屋顶具有重要的优势.而在温暖或寒冷的气候条件下,植被屋顶似乎具有更好的减缓城市热岛的效果.目前反射屋顶技术已经比较成熟,而绿色屋顶技术较为复杂,绿色屋顶的植被类别、结构、数量和分布对其降温效果有重要影响.这方面的研究,特别是对不同气候区城市屋顶植被的选择和植被生长介质的研究目前尚为欠缺^[79].未来的研究需同时关注开发新的和更有效的材料以及科学的绿色屋顶设计方案,建筑外墙藤本植物的覆盖设计等,为城市气候改善提供重要的选择.

尽管城市热岛对全球气候的影响还存在争议,但其对局地气候的影响已成为共识.研究发现,在城市化发展迅速的地区,城市热岛对局地增温的贡献从10%~40%^[80-81]提高到80%^[82].在全球气候变暖的大背景下,城市热岛效应也可能变得更加严重,尤其是在特大城市,伴随着快速的城市扩张,加剧的热岛效应对城市居民来说,无疑是不可忽视的环境风险问题.因此,在评估热岛效应和制定减缓措施时,需充分考虑生态系统的调节和降温作用,增加绿地、水体、湿地的面积,并进行合理化布局;此外,在改进建筑材料的同时,强化屋顶绿化的作用,有效地发挥其生态效应,为改善热环境、提高空气质量和城市宜居性服务.

4 参考文献

- [1] XIE M M, WANG Y L, Fu M C. An overview and perspective about causative factors of surface urban heat island effects [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30 (1): 35
- [2] ESTRADA F, BOTZEN W J W, TOL R S J. A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 403
- [3] SANTAMOURIS M. Cooling the cities : a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments [J]. *Solar Energy*, 2014, 103: 682
- [4] 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 等. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律:以上海市为例[J]. *地理学报*, 2013, 68 (11): 1461
- [5] 刘勇洪, 徐永明, 马京津, 等. 北京城市热岛的定量监测及规划模拟研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1156
- [6] WILLIS K J, PETROKOFISKY G. The natural capital of city trees[J]. *Science*, 2017, 356(6336): 374
- [7] VAHMANI P, JONES A D. Water conservation benefits of urban heat mitigation[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 1072
- [8] SANTOS A R, DE OLIVEIRA F S, DA SILVA A G. Spatial and temporal distribution of urban heat islands [J]. *Science of the Total Environment* 2017, 605/606: 946956
- [9] 刘帅, 李琦, 朱亚杰. 基于 HJ-1B 的城市热岛季节变化研究:以北京市为例[J]. *地理学报*, 2014, 34(1): 84
- [10] THOMAS G, ZACHARIAH E J. Urban heat island in a tropical city interlaced by wetlands[J]. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2011, 5: 234
- [11] SHEN T, CHOW D H C, DARKWA J. Simulating the influence of microclimatic design on mitigating the urban heat island effect in the Hangzhou metropolitan area of China [J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2013, 11: 130
- [12] SKELHORN C, LINDLEYA S, LEVERMORE G. The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: a fine scale assessment in Manchester, UK [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 121: 129
- [13] JOCHNER S, ALVES-EIGENHEER M, MENZEL A, et al. Using phenology to assess urban heat islands in tropical and temperate regions[J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(15): 3141
- [14] MIMET A, PELLISSIER V, QUÉNOL H. et al. Urbanisation induces early flowering: evidence from *Platanus acerifolia* and *Prunus cerasus*[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2009, 53(3): 287
- [15] MENZEL A. Phenology: its importance to the global change community [J]. *Climatic Change*, 2002, 54 (4): 379
- [16] ZHANG X Y, FRIEDL M A, SCHAAF C B, et al. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid-and high latitudes inferred from MODIS data[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(7): 1133
- [17] WHITE M A, NEMANI R R, THORNTON P E, et al. Satellite evidence of phenological differences between urbanised and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest [J]. *Ecosystems*, 2002, 5: 260
- [18] FISHER J I, MUSTARD J F, VADEBONCOEUR M A. Green leaf phenology at Landsat resolution: scaling from the field to the satellite[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100: 265
- [19] HAN G, XU J. Land surface phenology and land surface temperature changes along an urban-rural gradient in Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Management*, 2013, 52: 234
- [20] QIU T, SONG C, LI J. Impacts of urbanization on vegetation phenology over the past three decades in Shanghai, China[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 970

- [21] 王静, 常青, 柳冬良. 早春草本植物开花物候期对城市化进程的响应: 以北京市为例[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6701
- [22] JOCHNER S, CAFFARRA A, MENZEL A. Can spatial data substitute temporal data in phenological modelling? a survey using birch flowering [J]. Tree Physiology, 2013, 33(12): 1256
- [23] ROGERS C A, WAYNE P, MACKLIN E, et al. Interaction of onset of spring and elevated atmospheric CO₂ on ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen production [J]. Environmental Health Perspectives, 2006, 114: 865
- [24] CHAMEIDES W L, KASIBHATLA P S, YIENGER J, et al. Growth of continental-scale metro-agro-plexes, regional ozone pollution, and world food production[J]. Science, 1994, 264: 74
- [25] KUMAR R, MISHRA V, BUZAN J, et al. Dominant control of agriculture and irrigation on urban heat island in India[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 14054
- [26] IMHOFF M A, BOUNOUA L, DEFRIES R, et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States[J]. Remote Sensing of Environment, 2004 89: 434
- [27] SUGDEN A M. C₄ plants in the heat of the city[J]. Science, 2016, 354(6314): 844
- [28] SON J Y, LANE K J, LEE J T, et al. Urban vegetation and heat-related mortality in Seoul, Korea [J]. Environmental Research, 2016, 151: 728
- [29] POUYAT R V, CARREIRO M M. Controls on mass loss and nitrogen dynamics of oak leaf litter along an urban-rural land-use gradient [J]. Oecologia, 2003, 135: 288
- [30] McKinney M L. Urbanization, biodiversity and conservation[J]. Bio Science, 2002, 52(10): 883
- [31] ZIPPER S C, SCHATZ J, KUCHARIK C J, et al. Urban heat island-induced increases in evapotranspirative demand [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44. DOI: 10.1002/2016GL072190
- [32] MEINEKE E, YOUNGSTEADT E, DUNN R R, et al. Urban warming reduced aboveground carbon storage [J]. Proceedings of the Royal Society B, 2016, 283: 1574
- [33] GEORGE K, ZISKA L H, BUNCE J A, et al. Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban-rural transect[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(35): 7654
- [34] KAYE J P, GROFFMAN P M, GRIMM N B, et al. A distinct urban biogeochemistry? [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2006, 21(4): 192
- [35] 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[J]. 中国园林, 2004, 20(1): 72
- [36] MCPHERSON E G, NOWAK D, HEISLER G, et al. Quantifying urban forest structure, function and value: the Chicago Urban Forest Climate Project [J]. Urban Ecosystems, 1997, 1: 49
- [37] SUSCA T, GAFFIN S R, DELL'OSSO G R. Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs [J]. Environmental Pollution, 2011, 159: 2119
- [38] 张本志, 任国玉, 张子曰. 等北京中心商务区夏季近地面气温时空分布特征[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(5): 26
- [39] BALLINAS M, BARRADAS V. The urban tree as a tool to mitigate the urban heat island in Mexico City: a simple phenomological model [J]. Journal of Environmental Quality, 2016, 45: 157
- [40] KUANG W, DOU Y, ZHANG C, et al. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land use/land cover components by coupling remote sensing modeling with in situ measurement [J]. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 2015, 120: 113
- [41] 贺庆棠, 阎海平, 任云卯, 等. 北京地区植物表面温度的初步研究[J]. 北京林业大学学报 2005, 27(3): 30
- [42] 张明丽, 秦俊, 胡永红. 上海市植物群落降温增湿效果的研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 39
- [43] 唐罗忠, 李职奇, 严春风, 等. 不同类型绿地对南京热岛效应的缓解作用[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 23
- [44] 李英汉, 王俊坚, 李贵才, 等. 居住区植物绿量与其气温调控效应的关系[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 830
- [45] SLINGERLAND J. Mitigation of the urban heat island effect by using water and vegetation [D]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2012
- [46] WANG Y, AKBARI H. The effects of street tree planting on urban heat island mitigation in Montreal[J]. Sustainable Cities and Society, 2016, 27: 122
- [47] STEENEVELD G J, KOOPMANS S, HEUSINKVELD B G, et al. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 121: 92
- [48] HATHWAY E A, SHARPLES S. The interaction of rivers and urban form in mitigating the urban heat island effect: a UK case study[J]. Building and Environment, 2012, 58: 1422
- [49] 康晓明, 崔丽娟, 赵欣胜, 等. 北京市湿地缓解热岛效应功能分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(22): 199
- [50] TAHA H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat[J]. Energy Build, 1997, 25: 99

- [51] ZHAO L, LEE X, SMITH R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands[J]. *Nature*, 2014, 511: 216
- [52] LUBER G, MCGEEHIN M. Climate change and extreme heat events[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2008, 35(5): 429
- [53] SUGAWARA H, SHIMIZU S, TAKAHASHI H, et al. Thermal influence of a large green space on a hot urban environment [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1): 125
- [54] 陈朱, 陈方敏, 朱飞鸽, 等. 面积与植物群落结构对城市公园气温的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2590
- [55] FEYISA G L, DONS K, MEILBY H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: an example from Addis Ababa[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 87
- [56] WONG N H, JUSUF S K. Urban heat island and mitigation strategies at city and building level[M] // Kilokotsa D D, Santamouris M, Akbari H. *Advances in the Development of Cool Materials for the Built Environment*. Oak Park, IL: Bentham Science Publishers Ltd Bentham eBooks, 2013: 3-32
- [57] NURUZZAMAN M. Urban heat island: causes, effects and mitigation measures: a review[J]. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 2015, 3(2): 67
- [58] ALEKSANDROWICZ O, VUCKIOVIC M, KIESEL K, et al. Current trends in urban heat island mitigation research: Observations based on a comprehensive research repository[J]. *Urban Climate*, 2017, 21: 1
- [59] AKBARI H, KOLOKOTSA D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 133: 834
- [60] 龙珊, 苏欣, 王亚楠, 等. 城市绿地降温增湿效益研究进展[J]. *森林工程*, 2016, 32(1): 21
- [61] BUYANTUYEV A, WU J. Urbanization diversifies land surface phenology in arid environments: interactions among vegetation, climatic variation, and land use pattern in the Phoenix metropolitan region, USA [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 105: 149
- [62] CAO C, LEE X, LIU S, et al. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12509
- [63] ONISHI A, CAO X, ITO T, et al. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9: 323
- [64] STONE B, NORMAN J M. Landuse planning and surface heat island formation: a parcel-based radiation flux approach[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(19): 3561
- [65] JENERETTE G D, HARLAN S L, STEFANOV W L, et al. Ecosystem services and urban heat riskscape moderation: water, green spaces, and social inequality in Phoenix, USA[J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(7): 2637
- [66] STEENEVELD G J, KOOPMANS S, HEUSINKVELD B G. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect [J]. *Landscape Urban Planning*, 2014, 121: 92
- [67] SUN R, CHEN A, CHEN L, et al. Cooling effects of wetlands in an urban region: the case of Beijing[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 20: 57
- [68] CAI Y, ZHANG H, ZHENG P, et al. Quantifying the impact of land use/land cover changes on the urban heat island: a case study of the natural wetlands distribution area of Fuzhou City, China [J]. *Wetlands*, 2016, 36: 285
- [69] 杨一鹏, 曹广真, 侯鹏, 等. 城市湿地气候调节功能遥感监测评估[J]. *地理研究*, 2013, 32(1): 73
- [70] FRANCIS L F M, JENSEN M B. Benefits of green roofs: a systematic review of evidence for three ecosystem services [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 28: 167
- [71] TALEGHANI M, SAILOR D, BAN-WEISS G A. Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11: 024003
- [72] COUTTS A M, DALY E, BERINGER J, et al. Assessing practical measures to reduce urban heat: green and cool roofs[J]. *Building and Environment*, 2013, 70: 266
- [73] RAZZAGHMANESH M, BEECHAM S, SALEMI T. The role of green roofs in mitigating urban heat island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 15: 89
- [74] LI D, ZEID E B, OPPENHEIMER M. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9: 055002
- [75] SANTAMOURIS M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island: a review of the actual developments [J]. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews, 2013, 26: 224
- [76] KYRIAKODIS G E, SANTAMOURIS M. Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates: results from a large scale urban mitigation project[J]. Urban Climate, 2018, 24: 326
- [77] LUNDHOLM J, MACLVOR J S, MACDOUGALL Z, et al. Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions[J]. PLoS ONE, 2010, 5(3): e9677
- [78] DVORAK B, VOLDER A. Green roof vegetation for North American ecoregions: a literature review [J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 96: 197
- [79] KAZEMI F, MOHORKO R. Review on the roles and effects of growing media on plant performance in green roofs in world climates[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 23: 13
- [80] GAFFIN S R, ROSENZWEIG C, KHANBILVARDI R, et al. Variations in New York city's urban heat island strength over time and space[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2008, 94: 111
- [81] JIN K, WANG F, CHEN D, et al. Assessment of urban effect on observed warming trends during 1955–2012 over China: a case of 45 cities [J]. Climate Change, 2015, 132: 631
- [82] REN G, CHU Z Y, CHEN Z H, et al. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations[J]. Geophysical Research Letters 2007, 34: 89

Urban heat island effect and urban ecosystems

XU Hong¹⁾ YANG Shili²⁾

(1)State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2)Beijing Municipal Meteorological Observation Center, 100089, Beijing, China)

Abstract Urban heat island (UHI) is a well-known form of anthropogenic climate modification, which is studied in large cities around the world. UHI influences material and energy flows, structure and function of urban ecosystems by changing land surface temperature and hydrology. Impacts of UHI on urban ecosystems, the physical, chemical and biological characters of soil and vegetation, are profound, with influences on the urban biogeochemical cycle. Urban natural ecosystem, on the other hand, could mitigate UHI effect by modifying urban surface thermal properties. UHI characters and seasonal variations, impact of UHI on urban ecosystems, role of ecosystem in mitigating UHI effect are reviewed in the present work. Research in related fields should be considered when planning future research directions, to deepen the understanding of UHI, and to correlate UHI and ecosystems. Mitigation strategies of UHI should also be encouraged to improve urban environment and livability levels. Regarding the heat island phenomenon, further development and application of efficient mitigation technologies are needed. The mitigation potential of cooling systems should involve all major factors. We recommend the following: to deepen studies on urban heat islands, to determine optimum land-use patterns, to meliorate cooling effect of urban water body and wetland, to develop new and more efficient materials and procedures, to improve green roofs. Future research and development are necessary to enhance scientific and technological measures to counterbalance the impact of UHI and to improve comfort in urban environments.

Keywords urban heat island; ecosystem; plant phenology; carbon and nitrogen cycles; mitigation