

城市绿地降温效应研究进展与展望

孔繁花^a, 尹海伟^b, 刘金勇^a, 闫伟姣^a, 孙常峰^a

(南京大学 a. 国际地球系统科学研究所, b. 建筑与城市规划学院, 南京 210093)

摘要: 全球变暖已是不争的事实, 而且不可能完全被阻止。城市绿地作为城市结构中的自然生产力主体, 在缓解城市热岛、调节城市气候和协助城市应对未来气候变化中扮演着极其重要的角色。如何优化城市绿地空间布局, 从而实现城市绿地降温效应的最大化, 更有效地应对城市气候变化, 已经成为城市绿地布局规划与研究的热点与难点问题。论文从城市绿地降温效应实地观测、城市尺度城市绿地与城市热岛关系、城市绿地降温效应模型模拟和城市绿地降温效应的心理和社会意义4个角度, 对国内外相关研究进行了评述, 并在此基础上总结了目前城市绿地降温效应研究存在的主要问题, 进而提出了该领域未来研究的方向, 以期为深入研究城市绿地的降温效应、更好地规划和设计绿地提供重要的借鉴和参考。

关键词: 城市绿地; 降温效应; 全球气候变化; 城市热岛

中图分类号: S731.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2013)01-0171-11

全球变暖已是不争的事实^[1], IPCC(Intergovernment Panel for Climate Change) 第四次会议(2007)指出, 近100 a地球表面升温0.74℃, 近50 a的平均增温率为0.13℃/10 a, 其中人类活动是近50 a全球变暖的主要原因^[2]。尽管城市所占整个地球面积的比例不大, 然而大多数人类活动集中于城市。快速城市化使城市下垫面原有的自然环境被水泥、沥青等非渗透性地面代替, 从而使得城市环境问题日益突出, 区域气候与天气格局发生改变(如极端灾害天气发生频率明显提高), 加剧城市气候变化特别是城市热岛效应, 危及城市居民的生活与安全^[3-4]。例如, 法国在2003年8月因为热浪死亡人数高达15 000人^[5]。

气候变化的影响已经存在, 且不可能完全被阻止^[6]。城市绿地作为城市结构中的自然生产力主体, 通过影响大气水、热循环等, 在调节城市气候和协助城市应对未来气候变化中扮演着极其重要的角色, 发挥着特殊而重要的作用, 其中城市绿地的降温效应目前受到广泛关注。众多研究表明, 无论在何种尺度上, 城市绿地均能产生绿洲效应, 从而有效降低城市热岛效应, 改善城市气候状况, 缓解城市环境压力, 提高城市宜居性^[7-8]。因而在绿色城市、生态城市、低碳城市的建设浪潮中, 增加城市绿地面积和植被覆盖、优化城市绿地空间格局, 被认为是缓解因气候变化所引起的温度升高导致的人类健康问题的重要策略^[6, 9]。然而如何在挖掘城市绿地景观结构的降温效应及影响机制的基础上, 在快速城市化背景下的不同尺度上进行规划和设计绿地格局, 提高城市绿地协助城市应对气候变化的潜力, 仍是目前需要探讨和解决的热点问题。

收稿日期: 2011-12-04; 修订日期: 2012-04-27。

基金项目: 国家自然科学基金(31170444); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金项目。

第一作者简介: 孔繁花(1975-), 女, 山东日照人, 博士、副教授, 主要从事城市景观生态学的研究。E-mail: fanhua-kong@163.com

本文从城市绿地降温效应实地观测、城市尺度城市绿地与城市热岛关系、城市绿地降温效应模型模拟和城市绿地降温效应的心理与社会意义4个角度,对国内外相关研究进行了评述,并在此基础上总结了目前城市绿地降温效应研究存在的主要问题,进而提出了该领域未来研究的方向,以期为深入研究城市绿地的降温效应、更好地规划和设计绿地提供重要的借鉴和参考。

1 城市绿地降温效应实地观测研究

众多实测研究证实城市绿地与周边区域相比具有明显的降温效应,形成“绿地冷岛”;城市绿地的降温效应与绿地的类型、绿地面积、形状及植被遮荫面积等密切相关^[9-21]。不同绿地类型降温效应存在明显差异,通常乔木>灌木>草坪^[21-24],但一般以定性描述为主,很少建立定量关系^[18, 21]。刘梦飞^[11]曾将北京市区按照500 m×500 m分成网格,计算每个网格内的绿化覆盖率,布置了200多个气象观测点,根据观测点绘制等温线图,然后将绿化覆盖率图和等温线图叠置,通过回归方程分析温度分布格局与绿化覆盖率的关系。Hemid-di^[15]测量了加州大学洛杉矶分校校园内不同绿地的全年表面温度和离地1.5 m处的空气温度,发现在夏季晴天时,公园内灌木丛附近的空气温度比附近无树荫行人道处低约3℃。Kawashima^[14]通过实际调查研究了植被对冬季城市与郊区地表温度的影响,结果表明温度在绿地区较低,而在裸露土地或者建设用地区较高,但绿地在城市的降温效果小于郊区。Nichol^[16]在新加坡的碧山(Bishon)和实龙港(Serangoon)中心,基于Landsat遥感图像和实际调查,发现树林、草坪和沥青路面的平均表面温度分别是32.9、35.6和40.7℃,而且还发现树林覆盖区的平均温度和其周边非林地会有1.5~2℃的差别,但是草坪表面没有发现明显的降温效果。

城市绿地降温效应与绿地面积有关,但许多统计分析表明它们之间可能并非线性关系^[13, 18, 21, 25-26]。Jauregui^[13]研究发现,墨西哥面积500 hm²的查普尔特佩克公园(Chapultepec Park)对空气温度影响的半径为2 km。Saito等^[25]通过在熊本市调查发现,城市绿色植被能够有效改善夏季城市热环境,绿化率越高的地区温度越低,城市绿地面积比例与大气温度呈负相关,即使面积较小的40 m×60 m的绿地也会有降温效应;绿地内部和外部最大温差能达到3℃。Katayama等^[26]从三个不同尺度(城市、多个不同类型绿地单元和单一绿地单元)采用实地调查与回归分析方法研究证实了绿地的降温效应,并发现随着植被覆盖率从0增加到100%,相应的大气温度会降低2.7℃。

除绿地类型及面积要素外,研究表明绿地遮荫程度与绿地的降温效应之间存在非常明显的相关关系^[20, 27]。Shashua-Bar和Hoffman^[27]在以色列某城市选择了11个较小的绿地斑块,并通过经验性模型模拟和预测了林中的降温效应,发现林下遮荫面积和绿地斑块周边的大气温度是影响绿地降温效应的两个主要因素,而绿地斑块的几何形状和树木本身特征的影响不是很大;绿地对其周边区域的降温效果非常明显,可以应用衰减函数进行量化,即使是较小的绿地斑块,其降温效果也可达到100 m;行道树的降温效应也非常明显,在交通密集区降温效果能达到1 K,且背景温度越高,树荫的降温效应越明显。Giridharan等^[20]利用216个样点的观测数据分析了香港高密度高层住宅区内绿化种类对室外空气温度的影响,结果表明天空可见度(Sky View Factor, SVF)及地形是引起小区内空气温度变化的主要原因,如果所有小区的乔木覆盖率增加到40%,香港白天的热岛强度将会降低0.5℃。但也有研究发现绿地降温效应存在季节差异,如Victor^[28]在墨西哥城南部的调研发现,有植被的区域并不都

对周边地区有降温作用,例如在干季可能因为蒸散作用不足而不能发挥降温作用。

探求城市绿地降温效应强度及影响要素是进行城市绿地规划与布局、应对气候变化的基础,大量研究已尝试揭示它们之间的关系。Ca 等^[29]对东京西部多摩新城 0.6 km² 公园的实地调查研究表明,在中午时间公园温度要比在其下风向 1 km 远的商业区的温度低 1.5 °C。Honjo 和 Takakura^[30]等研究表明城市绿地降温效应所能到达的范围与风速有关,并通过建立二维方程量化了其影响关系。Hamada 和 Ohta^[8]研究表明,在夜间城市绿地降温效应可以从绿地边缘到 200 ~ 300 m;在 8—10 月的白天,绿地降温效应可以达 300 m,但是最远不超过 500 m。

Bowler 等^[9]通过总结 47 篇基于观察和试验调查的案例研究,认为一个公园在白天的平均降温为 0.94 °C,并且大面积公园的降温效果更好。但 Bowler 等的总结也指出,所有的案例研究都没有明确和详细地阐明在城市区域尺度绿化对气温的影响,没有明确地给出在城市尺度如何布局与优化绿地景观才能使其更好地发挥降温效应的具体措施与建议。因而,亟需开展试验和定量模拟研究来量化城市绿地面积、分布格局及绿地类型等要素对绿地降温效应的影响,从而更好地指导城市绿地规划与设计,应对城市气候变化。

2 城市尺度城市绿地与城市热岛关系研究

霍华德在 1918 年首先发现了“城市热岛(Urban Heat Island)”和“热岛效应(Heat-island Effect)”,而 Manley 于 1958 年首次提出了“城市热岛”的概念^[31]。随后,许多学者对城市热岛成因、绿地与热岛的相互作用关系等进行了研究^[32-34]。从城市热岛相关研究来看,主要有两种研究思路与方法:一是通过气温观测值的时空变化来分析城市热岛特征^[32,35-36],这种方法数据可靠性较高,但由于观测数据是点状数据,空间分辨率较低,在表现城市热环境的空间分布上有一定的局限性;二是基于遥感数据,运用计算机技术进行反演,得到地表温度,以反映地面或地物的热量空间分布^[33-34,37]。相对基于定点观测数据的研究,遥感技术能够大面积、同步和动态监测地面热场的分布和变化,并同时获取下垫面详细信息;而且地表温度与大气温度存在非常强烈的关系^[34],因而目前各种遥感资源(例如 NOAA, AVHRR, MODIS, ETM 以及 ASTER 等)被用来反演和模拟城市热岛^[38-43]。

在城市热岛的研究中,很多学者证实了城市绿地的降温作用^[2,31,44-46],并发现地表温度与植被丰富度^[41]或者植被指数(NDVI)存在负相关^[47-48,49]。Carlson 等^[44]研究发现城市地区比其周围地区具有更温暖的热性质,并可以通过地表热红外辐射进行识别,因而利用 AVHRR 数据研究了美国洛杉矶地区地表温度分布模式,发现城市工业和商业区日夜温差大于植被覆盖度高的郊区,表明植被下垫面对城市地表温度存在较大影响。Oke^[45]研究发现城市下垫面情况是形成城市冠层(Urban Canopy)区域小环境的决定性因素,是城市热岛形成的关键。Hung 等^[48]利用 TERRA/MODIS 卫星数据,绘制了亚洲 18 个大型城市 2001 年和 2003 年无云天的地表温度色块图,分析了这些城市热岛强度的空间分布规律,并基于 Landsat ETM+ 数据研究了地面亮温与植被覆盖之间的关系,结果表明城市绿地覆盖能够有效地降低地表温度。总体来看,目前相关研究多侧重城市绿地对城市热岛的缓解作用大小,但在城市绿地与降温效应相互作用机理及其定量关系方面的研究还有待深入,尚不能为城市规划或者决策者提供详细的量化指标^[50],很难科学制定城市绿地空间结构优化策略。

3 城市绿地降温效应模型模拟与预测研究

目前城市绿地降温效应模拟模型主要有建筑群热时间常数(Cluster Thermal Time Con-

stant ,CTTC) 及其改进模型 ,与计算流体力学(Computational Fluid Dynamics ,CFD) 相关的 ENVI-met 等。CTTC 模型是用于预测和评价建筑、城市设计特征、街道走向等因素对城市覆盖层内热环境影响的解析模型^[17 51] ,能够模拟不同下垫面情况下的全天空气温度变化。在 CTTC 及其改进模型中 ,可以通过调整区域平均绿化覆盖率等参数来研究绿化对气候的调节作用^[52]。Shashua-Bar 和 Hoffman^[53] 考虑植物蒸腾作用及树荫对温度变化的影响 ,提出了绿色 CTTC 模型 ,用以评估绿化分布对街区热环境的影响 ,但模型强调建筑对近地层热环境的影响 ,无法描述植物冠层对遮阳、流动及局部气温的影响 ,网格尺寸较大 ,且模型在开发过程中有较多的物理假设及约束条件 ,限制了其应用^[17 54]。在城市尺度 ,大量的现场实验是非常困难的 ,且无法进行优化分析。近年来 ,随着计算机技术的发展 ,基于 CFD 理论的相关模型取得了长足进展。Honjo 等^[55] 应用二维 $k-\epsilon$ 两方程紊流模型进行数值模拟 ,计算绿地降温的影响强度与影响范围 ,探讨城市绿地降温效应影响范围与绿地面积和绿地单元之间的间隔存在的函数关系 ,并指出 ,即使绿地单元面积较小 ,但只要空间间隔合理 ,也能发挥很好的降温效应。Dimoudi 和 Nikolopoulou^[56] 从植物的基本生理出发 ,利用简化的植物模型和 CFD 平台 ,模拟城市绿地的微气候效应 ,结果表明城市绿地能够降低城市空气温度(森林覆盖率增加 10% ,温度大约降低 0.8 K) ,改善城市微气候 ,缓解城市热岛效应; 城市绿地降温效应能够向其外围延伸 ,尤其是下风区。

德国波鸿大学地理研究所 Michael Bruse 开发的 ENVI-met 模型 ,主要采用三维非流体静力学模型模拟城市环境中构筑物表面-植被-空气的相互关系^[57]。它的水平解析度为 0.5 ~ 10 m ,时间步长为 10 s ,时间量级为 24 ~ 48 h ,特别适用于模拟中小尺度的微环境。Bruse 和 Fler^[57] 应用 ENVI-met 模拟分析了城市规划中的局部变化(如树木、草坪和新建筑群) 在不同尺度条件下对微气候所带来的影响。ENVI-met 模型因为可以方便地进行城市小尺度(住宅区或者街区) 微气候环境尺度的风、热、湿环境和日射环境模拟的耦合计算 ,因而受到城市微气候学和城市环境设计研究领域的欢迎^[58-59]。但目前该模型主要应用在中高纬度寒冷地区的室外热环境科研领域 ,在软件自带的数据库中 ,仅有少量的植物种类 ,且这些植物大多生长在中高纬度的寒冷地区^[52] ,所以该模型在湿热地区应用较少。

除上述模型外 ,许多学者应用其它模型进行了一些尝试性研究。Avissar^[60] 应用中尺度气象模型 PLAID(Patchy Land-Atmosphere Interactive Dynamics) 模型分析了植被对城市热环境的潜在影响 ,发现植被在改变城市中风的格局、温度、湿度和降雨方面起着极其重要的作用 ,随着绿地所占面积比例的增加 ,其降温作用也越明显。Bass 和 Krayenhoff^[61] 采用中尺度气象模式 MC2(The Mesoscale Compressible Community Model) 模拟了加拿大多伦多屋顶绿化对缓解城市热岛的影响 ,发现若 5% 的建筑应用绿色屋顶 ,则多伦多城市的温度会下降 0.5 °C ,绿色屋顶在建筑高密度区的降温效果更加明显。Chen 和 Wong^[7] 应用 Hobo 相对湿度和温度观测器与 LAI-2000 植物冠层分析仪进行定点观测结果 ,表明植被的降温作用与叶面积指数(LAI) 关系非常强。Hardin 和 Jensen^[62] 利用线性回归模型分析了叶面积指数和表面动力学温度之间的关系 ,结果表明叶面积指数增加到 1.0 ,表面动力学温度会降低 1.3 °C。但总体来看 ,在应用模型模拟绿地降温效应的研究中很少涉及通过模拟城市土地利用动态变化评价不同绿地格局的潜在降温效应及变化特征 ,更少涉及在分析城市绿地协助城市应对气候变化基础上整合绿地生态、宜人功能的绿地规划和设计研究。

WRF(Weather Research Forecast) 模式系统是由美国国家大气研究中心(NCAR) 、美国国家大气海洋总署-预报系统实验室、国家环境预报中心(FSL ,NCEP/NOAA) 等联合开发

的重点考虑从云尺度到天气尺度等的天气过程模拟,水平分辨率重点考虑 1~10 km,适用于城市尺度的模拟。WRF 模型是非静力平衡、高分辨率、科研和业务预报统一的中尺度预报模式和同化系统。目前 WRF 模型的应用主要有数值天气预报、区域气候的应急响应,空气质量评价和区域水资源分析等^[63]。WRF 模型与其它模型集成应用于不同研究领域,例如,WRF 模型与洪水径流模型耦合可对径流过程进行预报^[64-65],与化学模型结合(WRF-Chem)模拟臭氧、气溶胶等变化特征及其对气候的影响^[66-68],WRF 模型还与城市模拟系统耦合预测和评价快速城市化及未来气候变化对人们居住环境的影响^[69-70]。WRF 模型能够在城市尺度的天气预报过程中充分考虑复杂地表水热气交换的物理过程、下垫面粗糙度等因素的影响,在分析城市绿地协助城市应对气候变化的潜力分析中将是非常有利的工具。但目前在城市尺度,以高分辨率遥感数据为基础,应用 WRF 模型分析快速城市化背景下城市绿地应对未来气候变化的能力的相关研究还比较少见。

4 基于热舒适度的城市绿地降温效应心理和社会意义研究

随着城市极端高温天气的增加,目前这一方面的研究越来越得到学者的关注^[50]。Sherer^[71]在《公园的益处:美国人为什么需要更多的城市公园和开放空间》中特别强调其重要原因之一就是有利于城市居民的身心健康,减轻城市生活的压力。Nicholls 和 Alexander^[72]通过对 1992—2006 年气温数据的统计分析,发现全球和区域气候变化所导致的热胁迫强度是影响欧洲城市居民生活质量的重要因子之一。Lafotezza 等^[73]通过在意大利和英国的问卷调查,发现经常使用绿地与长时间使用绿地对产生健康愉悦的心情大有裨益,在炎热时期绿地能够有效缓解热环境给人造成的不适感。Hwang 等^[74]基于气象数据和调研数据应用 Rayman 模型预测了热环境变化和路边遮荫对长期的户外热舒适度的季节性影响,并采用 SVF 与热舒适度值建立回归关系,发现在夏季越热的天气,SVF 越大,热舒适度越低,因而建议在城市中增加遮荫面积以改善城市热环境。城市绿地具有重要的社会意义,许多学者因而指出城市绿地的规划应充分考虑人们利用的方便性与可达性,从而更好地为居民服务,改善居民的身心健康^[75]。

5 城市绿地降温效应研究存在问题与展望

国内外城市绿地降温效应的研究表明:①在全球气候变化及快速城市化背景下,人们愈来愈意识到城市绿地在协助城市应对气候变化方面的重要作用,以及如何科学规划和管理绿地的重要意义;②在新的技术和理论支持下,城市绿地降温效应研究方法、手段不断完善,研究内容不断深入和拓展。但概括起来仍然存在以下几点问题:

(1)大都通过定点观测分析降温效应及影响要素,但尚没有明确量化降温效应与影响要素之间的关系,更没有阐明在区域尺度如何考虑绿地的丰富度、类型及其空间布局,更好地发挥其降温效应。

基于定点观测的案例研究大多在小尺度证明了城市绿地具有降温效应,分析了导致降温效应差异的可能因素,这对城市绿地的设计和规划有一定的指导作用^[9]。但大都没有明确降温效应与影响要素之间的定量关系,绿地面积与降温效应之间的关系是否为线性?产生明显降温效应的最小绿地面积为多大?绿地降温的影响距离与绿地面积之间关系如何?在已有的研究中,这些问题尚未能很好回答。绿地景观结构要素与降温效应的定量关系研究对在城市区域内规划和设计绿地至关重要,因为城市绿化最终追求的是在城市区域范围

内降温效应的最大化而非某一特殊位置的降温效果。另外,通过单一案例的调查一般无法推及到在城市复杂下垫面背景下绿地的降温潜力,这需要多尺度的综合研究。

(2) 基于降温效应的绿地规划和设计,大都未能对绿地的生态、宜人等其他多种功能兼顾。

在城市绿地协助城市应对气候变化的规划与设计,如何布局城市绿地,实现其降温效应的最大化是目前国内外研究的主要目的和内容之一。目前研究比较活跃的领域是在能源和建筑方面,研究尺度较小,而在降温效应研究基础上融合绿地的生态、社会经济功能,从区域尺度规划与设计城市绿地方面的研究较少。然而绿地的规划和建设不应片面地只考虑其降温功能,而应实现多种功能的兼容^[76]。例如,城市绿地是城市生物多样性的重要载体,需要确定并连接重要的绿地斑块和廊道来保护生物多样性;城市绿地大都是由人工建造的,应该成为人文景观的重要一部分^[77];绿地的规划设计应在实际调查的基础上充分考虑到人们利用的便捷性和促进城市发展的和谐性等。

(3) 城市绿地对未来气候影响研究大都没有科学考虑城市绿地和城市发展趋势及形态之间的相互作用机制,更较少考虑城市快速发展对城市绿地及绿地降温效应的潜在影响。

一方面,快速城市化是城市绿地空间格局与城市气候变化的根本驱动力之一^[78];另一方面,城市绿地还会阻隔或引导城市的发展,塑造城市发展结构与形态,影响城市微气候。然而目前城市绿地规划大都没有科学考虑城市绿地和城市发展趋势及形态之间的相互作用机制,更忽视了在城市化过程中城市绿地协助城市应对气候变化的潜力。规划是基于对现状分析和将来预测基础上的对未来情景的一种期望^[79],城市规划应该融合气候要素,特别是城市微气候特征^[80]。合理的城市绿地系统规划和管理需要理清城市绿地格局-过程-功能的相互作用机制,从而明确如何进行规划设计和相关政策的制定,以使城市绿地系统的发展适应快速城市化,更好地协助城市应对气候变化。

(4) 城市绿地降温效应数值模拟模型大都适合在小尺度上进行,研究结果难以指导城市尺度绿地空间优化布局,大尺度城市绿地降温效应数值模拟研究有待深入。

城市绿地不仅能够对其周边热环境产生影响,它产生的“冷岛”还能直接影响近地层大气和下垫面间的能量、水分交换,从而影响城市气候变化。目前应用广泛的 CTTC 及与 CFD 相关的 ENVI-met 等模型在城市绿地对城市热环境影响的数值模拟主要在小尺度上进行,且在时间尺度上往往很难挖掘城市绿地降温效应的动态变化规律,在空间尺度上也很难上推到城市尺度复杂下垫面背景下绿地的降温潜力,无法在城市尺度上优化城市绿地空间格局、科学提升其应对城市气候变化的能力。如何优化城市绿地空间布局,实现城市绿地降温效应的最大化,更有效地应对城市气候变化,已经成为城市绿地布局规划与研究的热点与难点问题。因而城市绿地降温效应研究需要深入挖掘不同尺度上绿地景观结构对城市热环境影响的机理,定量评价不同绿地景观及其格局的降温效应差异。

参考文献(References):

- [1] Oreskes N. The scientific consensus on climate change [J]. *Science*, 2004, 306(5702): 1686.
- [2] 刘剡. 基于遥感和 GIS 的观测气温订正及对 LUCC 响应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010. [LIU Ke. A Study of Air Temperature Correction and Its Response due to LUCC Based on Remote Sensing and GIS. Shanghai: East China Normal University, 2010.]
- [3] Lambin E F, Turner B I, Geist H J. The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths [J]. *Global Environment Change*, 2001, 11: 261-269.

- [4] Patz J A ,Campbell-Lendrum D ,Holloway T *et al.* Impact of regional climate change on human health [J]. *Nature* ,2005 , 438: 310-317.
- [5] Fouillet A ,Rey G ,Laurent F *et al.* Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health* ,2006 ,80: 16-24.
- [6] Gill S E ,Handley J F ,Ennos A R *et al.* Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure [J]. *Built Environment* ,2007 ,33(1) : 115-133.
- [7] Chen Y ,Wong N H. Thermal benefits of city parks [J]. *Energy and Buildings* ,2006 ,38: 105-120.
- [8] Hamada S ,Ohta T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas [J]. *Urban Forestry & Urban Greening* ,2010 ,9: 15-24.
- [9] Bowler D E ,Buyung-Alia L ,Knight T M *et al.* Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence [J]. *Landscape and Urban Planning* ,2010 ,97(3) : 147-155.
- [10] 陈健,崔森,刘镇宇. 北京夏季绿地小气候效应[J]. 北京林学院学报,1983(1) : 15-25. [CHEN Jian ,CUI Sen ,LIU Zhen-yu. Summer effect of streets and lawns on microclimate in Beijing. *Journal of Beijing Forestry College* ,1983 (1) : 15-25.]
- [11] 刘梦飞. 城市绿化覆盖率与气温的关系[J]. 城市规划,1988(3) : 59-60. [LIU Meng-fei. Research on the relationship of urban forest coverage rate and air temperature. *City Planning Review* ,1988(3) : 59-60.]
- [12] 张景哲,刘启明. 北京城市气温与下垫面结构关系的时相变化[J]. 地理学报,1988 ,43(2) : 159-168. [ZHANG Jing-zhe ,LIU Qi-ming. Temporal variations in the relationship between urban temperature and the structure of urban surface in Beijing. *Acta Geographica Sinica* ,1988 ,43(2) : 159-168.]
- [13] Jauregui E. Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city [J]. *Journal of Energy and Buildings* ,1990/1991 ,15/16: 457-463.
- [14] Kawashima S. Effect of vegetation on surface temperature in urban and suburban areas in winter [J]. *Energy and Buildings* ,1990/1991 ,15(3/4) : 465-469.
- [15] Hemididi N A. Measurement of surface and air temperature over sites with different land treatments [C]//Proceeding of Passive and Low Energy Conference. Spain ,1991.
- [16] Nichol J E. High-resolution surface temperature related to urban morphology in a tropical city: A satellite-based study [J]. *Journal of Applied Meteorology* ,1996 ,35: 135-146.
- [17] 林荣波. 绿化对室外热环境影响的研究[D]. 北京: 清华大学建筑学院,2004. [LIN Rong-bo Study of Greening's Effects on Outdoor Thermal Environment. Beijing: School of Architecture ,Tsinghua University ,2004.]
- [18] Chang C ,Li M H ,Chang S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks [J]. *Landscape and Urban Planning* ,2007 ,80: 386-395.
- [19] 黄良美,黄海霞,项东云,等. 南京市四种下垫面气温日变化规律及城市热岛效应[J]. 生态环境,2007 ,16(5) : 1411-1420. [HUANG Liang-mei ,HUANG Hai-xia ,XIANG Dong-yun *et al.* The diurnal change of air temperature in four types of land cover and urban heat island effect in Nanjing ,China. *Ecology and Environment* ,2007 ,16(5) : 1411-1420.]
- [20] Giridharan R ,Lau S S Y ,Ganesan S *et al.* Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence [J]. *Building and Environment* ,2008 ,43: 1583-1595.
- [21] Cao X ,Onishi A ,Chen J *et al.* Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data [J]. *Landscape and Urban Planning* ,2010 ,96: 224-231.
- [22] 杜克勤,刘步军,吴昊. 不同绿化树种温湿度效应的研究[J]. 农业环境保护,1997 ,16(6) : 266-268. [DU Ke-qin ,LIU Bu-jun ,WU Hao. Temperature and humidity effects of different plants. *Agro-environmental Protection* ,1997 ,16 (6) : 266-268.]
- [23] Per Jonsson. Vegetation as an urban climate control in the subtropical city of Gaborone ,Botswana [J]. *International Journal of Climatology* ,2004 ,24(10) : 1307-1322.
- [24] Wong N H ,Jusuf S K ,La-Win A A *et al.* Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics [J]. *Building and Environment* ,2007 ,42: 294-2970.
- [25] Saito I ,Ishihara O ,Katayama T. Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area [J]. *Jour-*

- nal of Energy and Buildings* ,1990/1991 ,15/16: 493-498.
- [26] Katayama T ,Ishii A ,Hayashi T *et al.* Field surveys in cooling effects of vegetation in an urban area [J]. *Journal of Thermal Biology* ,1993 ,18: 571-576.
- [27] Shashua-Bar L ,Hoffman M E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees [J]. *Energy and Buildings* ,2000 ,31: 221-235.
- [28] Barradas Victor L ,Adalberto Tejeda-Martinez ,Ernesto Jauregui. Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico City [J]. *Atmospheric Environment* ,1999 ,33: 4109-4113.
- [29] Ca V T ,Asaeda T ,Abu E M. Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park [J]. *Energy and Buildings* ,1998 ,29: 83-92.
- [30] Honjo T ,Takakura T. Simulation of the influence of urban green areas at various scales and all scales [J]. *Journal of Agricultural Meteorology* ,2000 ,56(4) : 253-260.
- [31] 彭少麟,周凯,叶有华,等. 城市热岛效应研究进展[J]. 生态环境,2005,14(4): 574-579. [PENG Shao-lin ,ZHOU Kai ,YE You-hua ,*et al.* Research progress in urban heat island. *Ecology and Environment* ,2005 ,14(4) : 574-579.]
- [32] Yow D M. Urban heat islands: Observations ,impacts ,and adaptation [J]. *Geography Compass* ,2007 ,1(6) : 1227-1251.
- [33] Rizwan A M ,Dennis L Y C ,Liu C H. A review on the generation ,determination and mitigation of urban heat island [J]. *Journal of Environmental Sciences* ,2008 ,20(1) : 120-128.
- [34] Cristóbal J ,Ninyerola M ,Pons X. Modeling air temperature through a combination of remote sensing and GIS data [J]. *Journal of Geophysical Research* ,2008 ,113 ,D13106.
- [35] Camuffo D. History of the long series of daily air temperature in Padova (1725-1998) [J]. *Climatic Change* ,2002 ,53(1/3) : 7-75.
- [36] Kim Y ,Baik J. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul [J]. *Journal of applied meteorology* 2005 ,44(5) : 591-605.
- [37] Voogt J A ,Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates [J]. *Remote Sensing of Environment* ,2003 ,86(3) : 370-384.
- [38] Streutker D R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston ,Texas [J]. *International Journal of Remote Sensing* 2002 ,23(13) : 2595-2608.
- [39] Weng Q ,Lu D ,Schubring J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies [J]. *Remote Sensing of Environment* ,2004 ,89: 467-483.
- [40] Kato S ,Yamaguchi Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM + data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux [J]. *Remote Sensing of Environment* ,2005 ,99: 44-54.
- [41] Lu D ,Weng Q. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis ,Indiana ,USA [J]. *Remote Sensing of Environment* ,2006 ,104: 157-167.
- [42] Liu H ,Weng Q. Seasonal variations in the relationship between landscape pattern and land surface temperature in Indianapolis ,USA [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* ,2008 ,144: 199-219.
- [43] Lin C-Y ,Chen F ,Huang J C *et al.* Urban Heat Island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan [J]. *Atmospheric Environment* ,2008 ,42: 5635-5649.
- [44] Carlson T N ,Augustin J A ,Boland F E. Potential application of satellite temperatures measurements in the analysis of land use over urban areas [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* ,1977 ,58: 1301-1303.
- [45] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island [J]. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society* ,1982 ,108(455) : 1-24.
- [46] 马雪梅,张友静,黄浩. 城市热场与绿地景观相关性定量分析[J]. 国土资源遥感,2005,16(3): 10-13. [MA Xue-mei ,ZHANG You-jing ,HUANG Hao. A quantitative study of the relationship between urban vegetation and urban heat island. *Remote Sensing for Land and Resources* ,2005 ,16(3) : 10-13.]
- [47] Gallo K P ,Tarpley J D. The comparison of vegetation index and surface temperature composites for urban heat island analysis [J]. *International Journal of Remote Sensing* ,1996 ,17: 3071-3076.

- [48] Hung T ,Uchiama D ,Ochi S *et al.* Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* ,2006 ,8: 34–48.
- [49] Amiri R ,Weng Q H ,Alimohammadi A *et al.* Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area ,Iran [J]. *Remote Sensing of Environment* ,2009 ,113(12) : 2606–2617.
- [50] 陈卓伦. 绿化体系对湿热地区建筑组团室外热环境影响研究[D]. 广州: 华南理工大学 ,2010. [CHEN Zhuo-lun. Research of Vegetation System' S Effects on Outdoor Thermal Environment of Residential Communities in Hot-Humid Climate. Guangzhou: South China University of Technology ,2010.]
- [51] Swaida H ,Milo E ,Hoffman M E. Prediction of urban air temperature variations using the analytical CTTC model [J]. *Energy and Buildings* ,1990 ,14(4) : 313–324.
- [52] 李莹. 建筑群及单栋建筑周围空气温度的理论和实验研究[D]. 北京: 清华大学 ,2000. [LI Ying. Research on the Air Temperature around the Building Group or the Single Building. Beijing: Tsinghua University ,2000.]
- [53] Shashua-Bar L ,Hoffman M E. The Green CTTC model for predicting the air temperature in small urban wooded sites [J]. *Building and Environment* ,2002 ,37: 1279–1288.
- [54] Elnahas M M ,Williamson T J. An improvement of the CTTC model for predicting urban air temperatures [J]. *Energy and Buildings* ,1997 ,25: 41–49.
- [55] Honjo T ,Takakura T. Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas [J]. *Energy and Buildings* ,1990/1991 ,15(3/4) : 443–446.
- [56] Dimoudi A ,Nikolopoulou M. Vegetation in the urban environment: Microclimatic analysis and benefits [J]. *Energy and Buildings* 2003 ,35: 69–76.
- [57] Bruse M ,Fleer H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model [J]. *Environmental Modelling & Software* ,1998 ,13: 272–284.
- [58] Emmanuel R ,Rosenlund H ,Johansson E. Urban shading—A design option for the tropics? A study in Colombo ,Sri Lanka [J]. *International Journal of Climatology* ,2007 ,27: 1995–2004.
- [59] Wong N H ,Jusuf S K. GIS-based greenery evaluation on campus master plan [J]. *Landscape and Urban Planning* ,2008 ,84(2) : 166–182.
- [60] Avissar B. Potential effects of vegetation on the urban thermal environment [J]. *Atmospheric Environment* ,1996 ,30(3) : 437–448.
- [61] Bass B ,Krayenhoff S. Mitigating the urban heat island with green roof infrastructure [R]. North American Urban Heat Island Summit. Toronto ,Ontario 2002.
- [62] Hardin P J ,Jensen R R. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: A Terre Haute case study [J]. *Urban Forestry & Urban Greening* ,2007 ,6: 63–72.
- [63] Chen F ,Kusaka H ,Bornstein R *et al.* The integrated WRF/urban modeling system: Development ,evaluation and applications to urban environmental problems [J]. *International Journal of Climatology* ,2011 ,31: 273–288.
- [64] Wang S C ,Huang S X ,Li Y. Sensitive numerical simulation and analysis of rainstorm using nested WRF model [J]. *Journal of Hydrodynamics* ,2006 ,18(5) : 578–586.
- [65] Hong S-Y ,Lee J-W. Assessment of the WRF model in reproducing a flash-flood heavy rainfall event over Korea [J]. *Atmospheric Research* ,2009 ,93: 818–831.
- [66] Grell G A ,Peckham S E ,Schmitz R *et al.* Fully coupled online chemistry within the WRF model [J]. *Atmospheric Environment* 2005 ,39: 6957–6975.
- [67] Zhang Y ,Wen X Y ,Jang C J. Simulating chemistry-aerosol-cloud-radiation-climate feedbacks over the continental U. S. using the online-coupled Weather Research Forecasting Model with chemistry (WRF/Chem) [J]. *Atmospheric Environment* ,2010 ,44(29) : 3568–3582.
- [68] Saide P E ,Carmichael G R ,Spak S N *et al.* Forecasting urban PM 10 and PM 2. 5 pollution episodes in very stable nocturnal conditions and complex terrain using WRF-Chem CO tracer model [J]. *Atmospheric Environment* ,2011 ,45: 2769–2780.
- [69] Jiang X Y ,Wiedinmyer C ,Chen F *et al.* Predicted impacts of climate and land-use change on surface ozone in the Hous-

- ton ,Texas area [J]. *Journal of Geophysical Research* ,2008 ,113: D20312.
- [70] Kusaka H ,Chen F ,Tewari M *et al.* Performance of the WRF model as a high resolution regional climate model: Model intercomparison study [C]//Proceedings of ICUC-7: The Seventh International Conference on Urban Climate. Yokohama , Japan 29 June-3 July 2009.
- [71] Sherer P. The Benefit of Parks: Why America Needs More City Parks and Open Space [M]. San Francisco ,USA: Trust for Public Land 2006.
- [72] Nicholls N ,Alexander L. Has the climate become more variable or extreme? Progress 1992-2006 [J]. *Progress in Physical Geography* ,2007 ,31(1) : 77-87.
- [73] Laforteza R ,Carrus G ,Sanesi G *et al.* Benefits and well-being perceived by people visiting green spaces in periods of heat stress [J]. *Urban Forestry & Urban Greening* ,2009 ,8(2) : 97-108.
- [74] Hwang R L ,Lin T P ,Matzarakis A. Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort [J]. *Building and Environment* ,2011 ,46(4) : 863-870.
- [75] Kaplan R ,Stephen Kaplan S ,Robert L *et al.* With People in Mind: Design and Management of Everyday Nature [M]. Washington D C: Island Press ,1998.
- [76] Sandström U G ,Angelstam P ,Khakee A. Urban comprehensive planning—Identifying barriers for the maintenance of functional habitat networks [J]. *Landscape and Urban Planning* ,2006 ,75(1/2) : 43-57.
- [77] Ahern J. Greenways as a planning strategy [J]. *Landscape and Urban Planning* ,1995 ,33: 131-155.
- [78] Foley J A ,DeFries R ,Asner G P *et al.* Global consequences of land use [J]. *Science* ,2005 ,22: 570-574.
- [79] Miller R W. Urban Forestry: Planning and Managing Urban Green Spaces [M]. 2nd Edition. Prentice-Hall ,Englewood Cliffs ,NJ ,1997: 502.
- [80] Eliasson I. The use of climate knowledge in urban planning [J]. *Landscape and Urban Planning* ,2000 ,48: 31-44.

A Review of Research on the Urban Green Space Cooling Effect

KONG Fan-hua^a, YIN Hai-wei^b, LIU Jin-yong^a, YAN Wei-jiao^a, SUN Chang-feng^a

(a. International Institute for Earth System Science b. School of Architecture and Urban Planning ,
Nanjing University ,Nanjing 210093 ,China)

Abstract: Since the global warming is now accepted by the majority of the scientific community , and it is unlikely that these effects can be fully prevented ,it is essential that related strategies are identified early so they can be implemented to adapt to such change. Urban green spaces are the important green infrastructure in a city. Urban green space can reduce the surface water runoff and provide the cooler microclimates as well as other environmental functions ,therefore ,it will play an important role to mitigate the urban heat island ,and cope with future climate change. However little is known about the quality and quantity of the green spaces required and what kind of the green space spatial pattern will be the best. Consequently ,how to plan and design the green spaces in different spatial scales is always a key topic. This paper examined research progress in the field of green space cooling effect ,identified existing problems ,and accordingly tried to explore the potential of urban green space in adapting cities to climate change in the future.

Key words: urban green spaces; cooling effect; global climate change; urban heat island