

地表城市热岛影响因素研究进展*

李元征^{1,2} 尹科³ 王亚婷⁴ 王岚⁵ 于盈盈¹ 胡聃^{*,1}

- (1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085;
2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 九江学院鄱阳湖生态经济研究中心,九江 332005;
4. 成都市环境保护科学研究院,成都 610072; 5. 华南农业大学资源环境学院,广州 510642)

摘要: 全球正在经历快速且高强度的城市化,由此产生了更多的城市热岛现象。它会对城市、区域乃至全球许多的生态环境要素产生直接或间接的影响。掌握城市热岛的影响要素是实现对其趋利避害的前提。遥感现已成为一种被广泛接受和采用的监测城市热岛的方法。针对前人相关综述已经无法全面反映地表城市热岛影响因素的发展现状与趋势的问题,本文首先从土地利用/土地覆盖类型、地表生物物理条件、景观格局、人类活动强度、气象条件和地理位置、政策要素及综合分析七个方面对国内外地表城市热岛(Surface Urban Heat Island, SUHI)影响因素的研究进行系统评述;然后依据现有研究中或空白或结论相互冲突或尚需深化的地方指出几个潜在的关键问题与研究方向,主要包括:(1)应同时开展多类气候带上的多个不同规模城市在多个时刻或时间段内的研究;(2)细化土地覆盖/利用类型;(3)引入更多空间分析方法;(4)发展和完善地表生物物理条件、景观组分和配置、人类活动强度、气象条件或地理位置等方面的指标;(5)采用多学科方法提取大数据里的海量信息;(6)综合分析各影响因素并结合其他城市问题给出最优配置方案。

关键词: 地表温度;土地利用与土地覆盖;地表生物物理条件;景观格局;人类活动强度;气象条件;地理位置

中图分类号: TP79; P954 **文献标识码:** A **doi:** 10.16507/j.issn.1006-6055.2017.02.005

Studies on Influence Factors of Surface Urban Heat Island: a Review*

LI Yuanzheng^{1,2} YIN Ke³ WANG Yating⁴ WANG Lan⁵ YU Yingying¹ HU Dan^{*,1}

- (1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Poyang Lake Eco-Economy Research Centre, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China; 4. Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610072, China; 5. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The rapid urbanization with high intensity is recently occurring in the world, resulting in more urban heat island (UHI) phenomenon. It has a direct or indirect impact on various eco-environment factors of cities, regions and even the whole world. To grasp the influencing factors of urban heat island is the premise to realize its benefit-tending and harm-avoiding. Now the remote sensing method has been widely accepted and used for the UHI monitoring. Aiming at the current issue that the previous reviews could not reflect the developing status and trends of this study field nowadays, the previous studies at home and abroad on the influencing factors of surface urban heat island (SUHI) are firstly reviewed from seven aspects, including the land use and land cover (LULC) types, surface biophysical conditions, landscape pattern, the intensity of human activity, meteorological condition and geographical location, policy factors, and synthetical analysis. Then, several key issues or potential research directions are proposed based on the blank research field in the existing studies, or those are with conflicting conclusions or still needed to be deepen. The main contents are as follows. (1) Synchronously study the surface urban heat island issue for various cities with different sizes at multiple climate zones at various times or during multiple time periods. (2) Refine the LULC types. (3) Introduce more spatial analysis methods. (4) Propose or complete indicators about the surface biophysical conditions, landscape composition and configuration, intensity of human activities, meteorological condition, geographic location, etc. (5) Extract mass information of the big data by methods of multidisciplinary. (6) Synthetically analyse its various affect indicators, and explore the optimal configuration scheme together considering other urban issues.

2016-07-01 收稿, 2016-08-23 接受, 2017-02-13 网络发表

* 国家自然科学基金(41571482)资助

** 通讯作者, E-mail: hudan@rcees.ac.cn

Key words: land surface temperature; land use and land cover; surface biophysical conditions; landscape pattern; the intensity of human activities; meteorological condition; geographic location

1 引言

2014 年,全球有 54% 的人口居住在城市,至 2050 年该比例将上升至 66%^[1]。快速和高强度的城市化进程显著地改变着城市、区域乃至全球的生态环境^[2]。其中城市地区气候的一个显著特征就是产生城市热岛效应,即城区气温明显高于周边农村的现象^[3,4]。城市热岛直接或间接地影响着局地气候^[5]、能源利用^[6]、空气质量^[7]、城市水文^[8]、城市土壤理化性质^[9]、生物空间分布和行为活动^[10]、人类健康和舒适度等^[6,11]。

城市热岛的研究方法主要包括气象站观测^[12]、定点现场观测^[13]、移动样带观测^[14]、数值模拟^[15]和遥感监测法。遥感具有时间同步性好、覆盖宽、可长时间连续监测等优点。随着卫星数量的增多及地球空间信息技术的发展,热红外遥感已经成为一种被广泛接受和采用的城市气候与环境监测方法^[16,17]。虽然基于遥感反演的地表温度(LST)并不等同于地表上面的气温,但两者却是密切相关的^[18,19]。为与传统的基于气温分析的城市热岛相区分,通常将基于 LST 分析的城市热岛称为地表城市热岛(Surface Urban Heat Island, SUHI)^[8,19]。

掌握 SUHI 的影响要素是实现对其趋利避害的前提。文献调研发现,近年来相关研究增长非常迅速,但前人相关的综述已无法全面反映该研究领域的发展现状与趋势^[14,20-22]。据此,本文从土地利用/土地覆盖类型、地表生物物理条件、景观格局、人类活动强度、气象条件和地理位置、政策要素及综合分析七个方面对国内外地表城市热岛的影响因素的研究进展和不足进行综述,并据此指出几个潜在的关键问题或研究方向,以期对相关领域的理论研究及城市规划工作的实践提供一定支撑。

2 地表城市热岛的影响因素

2.1 土地利用/土地覆盖类型

土地利用/土地覆盖(LULC)类型是影响 LST 的关键要素,对白天的影响更大^[23]。通常白天 LST 高值区主要为植被稀少且不透水面较多的工业区、商业区、旧城居住区、机场、拆迁区、裸露和半裸露的旱地和沙地、交通用地周边、及其他未利用地

等^[23-34];低值区为水体和绿地^[23,25,29,32,35,36]。美国印第安纳波利斯白天各土地覆盖(LUCC)类型的 LST 在冬季明显不同,在其他三个季节略有不同。值得注意的是冬季时水体的 LST 最高;草地在春、夏、秋三季 LST 偏高,夏季高于裸地,春秋与其类似^[37]。基于 Aqua/MODIS 数据对伯明翰多年夏季夜间 SUHI 的研究表明,除一处例外,在大气不同的帕斯奎尔稳定类型下, SUHI 幅度按照特定 LUCC 类型顺序上升^[38,39]。基于 Terra/MODIS 数据对德黑兰两年昼夜 SUHI 的研究表明,裸地是导致半干燥气候带城市白天出现冷岛现象的关键要素,水体是降低夜间热岛甚至出现冷岛的因素^[40]。采用热视辐射计对以色列特拉维夫的研究表明,白天时沥青路面和屋顶最热;夜间时外墙和树木最热。开阔空地由于白天可直接接受太阳直射而夜间热量容易流失因而具有最大的日温差^[41]。

具体到各要素,绿地昼夜均可缓解 SUHI。但对其各亚类降温效果的研究前人的结论却有所不同。基于地块对南京夏季白天的研究表明,林地与灌木、草坪及杂草三种类型之间的平均 LST 的差异可忽略;每种植被内部地温变异较大。这说明,在城市绿地破碎分布的条件下,虽然植被类型对地块的 LST 有影响,但其受到斑块类型及周边环境的影响更大^[42]。而对广州白天的研究表明,相比灌木和草地,林地可更有效地缓解热岛^[43]。此外,对特拉维夫多年夏季夜间的研究表明,建设中小尺寸(约 2 ~ 40 公顷)的公园不如建立高植被覆盖度的绿色住宅用地降温更为有效。这是因为私人公园比公用公园可更大比例地利用空闲地块来种植植被,并具有更好的灌溉条件。此外,建设高植被覆盖的住宅也更利于人类交互、休闲和保持健康。而公共公园一般临近道路和停车场,降低了其降温效果^[43]。

水体白天可缓解地表热岛,但该作用在夜间并不明显,甚至成为 LST 的高值中心^[25,44,45]。不同类型的工业用地对白天热岛的影响不同,如重工业场地 LST 偏高,而新兴的高技术产业 LST 较低^[46]。新建的现代高层建筑及高植被覆盖的居民小区对增加白天的 LST 的作用并不明显^[29,43]。

热岛强度还深受周边乡村 LUCC 类型的影响。对全球一年内需要制冷时间段的研究表明,强度大

和持续时间长的 SUHI 现象出现在周边乡村为冰雪和落叶林的中亚地区^[47]。这可能是冬季偏低的乡村地温导致的。位于裸地及开阔灌丛地带的城市白天冷岛和夜间热岛均最强。周边乡村 LUC 为裸地、草地、开阔灌木、封闭灌木和热带草原的地方的 SUHI 的昼夜强度差异最大^[47]。沙漠地区城市市区植被相对较多,而郊区却是裸地和沙地相对丰富。白天郊区升温及夜间降温均更快,导致了显著的白天冷岛和夜间热岛现象^[48]。此外,落叶林由于在夏季可利用叶子进行光合降温,而在冬季却无叶子,因此对热岛日变化和季节变化具有明显的调节作用^[49]。对全球三年的研究表明,SUHI 在周边为林地、草地和沙漠生态系统的背景下依次递减^[50]。

LULC 类型直观形象,利于直接和城市规划实践相结合。但其无法反映出同种 LULC 类型内部的差异,包括植被覆盖度、建筑物三维布局及材质等。前人的大多数研究受限于单纯依靠遥感数据源及遥感解译方法的不足,难以获取更为细致的 LULC 数据,但不同类型的居民区、工业区、商业区等对 SUHI 的影响有可能是不同的。由于相关数据源的缺乏,中高分辨率及非晴空条件下的研究较少。

2.2 地表生物物理条件

反映地表植被状况的归一化植被指数 (NDVI)、增强型植被指数 (EVI)、宽动态范围植被指数 (WDRVI)、植被覆盖度 (Fv)、基于普适模型分解的植被指数 (VIUPD)、土壤调整过的植被指数 (SAVI)、基于混合像元分解计算的植被组成指标 (VF) 及森林覆盖度与 LST 关系密切。它们的城郊差也与 SUHI 强度密切相关。VF、Fv 及 VIUPD 比 NDVI 与热力指标的关系更好^[51,52]。但美国密尔沃基多年夏季白天的 NDVI 与 LST 的相关性比 VF 更大,这可能是由于混合像元分解方法本身及端元选择的不确定性引起的^[54]。植被参数和 LST 的关系存在较大的昼夜、季节和尺度变异性,并依赖于背景土地覆盖类型^[51,53]。通常白天植被指标和热力指标为负相关^[53,50-52,56,57]。这不一定是简单线性关系,其中 LST 与 NDVI 及 VF 更倾向于年际稳定的二次函数关系^[58],夏季最强、秋春次之、冬季最弱^[54,56,57]。但一些研究结果有所不同。对美国双子城的研究表明 LST 和 NDVI 构成的散点图仅在夏季和早秋表现为线性负相关的格局;春季的散点图为三角形;冬季的为不规则压实形^[59]。对深圳秋季白天的研究表明 NDVI 在不超过 0.6 时和 LST 负相关,否则为线性

增加关系^[60]。对武汉夏季白天的研究也有类似结论^[61]。对石家庄夏季白天的研究表明 VIUPD 在不超过 0.52 时与 LST 正相关,否则为负相关^[62]。武汉夏季白天水体背景中 NDVI 与 LST 为正相关^[63]。夜间,基于 Terra/MODIS 对北京的研究表明,NDVI 和 LST 夏季负相关,但在其他季节较密集植被处的 LST 反而更高^[64]。基于 Aqua/MODIS 对墨尔本夏季夜间的研究表明 NDVI 对 LST 影响很小,趋势为正相关^[65]。此外尚有其他的相关性研究。对广东 10 个城市冬季白天的研究表明,SUHI 面积与城区平均 NDVI 弱相关^[66];对全球需要制冷时段的研究表明,EVI 小的城市拥有较强的夜间热岛和白天冷岛^[67];对悉尼夏天白天的研究表明增加树木覆盖度比增加混合植被的覆盖度能更有效地降低地温^[68];基于高斯模型对北京多年的研究表明 NDVI 质心变化与夏天白天热岛质心变化正相关,但解释度仅不到 10%^[69]。尺度方面,对印第安纳波利斯夏季白天的研究表明,120m 是分析植被参数和 LST 关系的最佳尺度^[51]。

LST 与反映地表水体状况的参数密切相关。对北京多年白天的研究表明归一化水汽指数 (NDMI) 与 LST 负相关^[63];徐州多年夏季白天的城市地表湿度 (ULSW) 与 LST 负相关^[64];深圳秋季白天的归一化水体指数 (NDWI) 在小于 0.27 时与 LST 线性负相关,而后为二次多项式拟合的负相关关系^[64];福州春季和济南夏季白天的改进的归一化水体指数 (MNDWI) 与 LST 负相关^[67,68];对兰州夏季白天的研究表明 MNDWI 与 LST 不是简单的线性关系,而是先增加后减少的三次多项式拟合关系^[63]。

反映城市人工构筑物二维和三维特征的地表参数与 LST 密切相关。通常白天 LST 和归一化建筑指数 (NDBI)、归一化不透水面指数 (NDISI)、基于混合像元分解的不透水面面积比例 (ISA)、基于植被调整的夜间灯光城市指数推演的 ISA、地表生物物理组分指数 (BCI)、建筑用地指数 (IBI)、增强型的建筑用地指数 (EIBI)、基于现有指数组合发展的一种可以反映硬化地表状况的指数、锋面指数、构筑物体积、最大建筑高度、建筑物平均高度、高宽比、道路长度、道路面积、道路结点数及面积加权道路结点数四季均正相关,大部分为显著的线性关系,少数为指数、指数、二次函数及其他不规则的非线性关系^[26,29,35,47,58-60,65,67-80]。NDBI 与 LST 相关性的大小还与土地覆盖有关,由高到低依次为建筑用地、植被

和水体^[53]。夜间不透水面面积百分比和人工构筑物体积与 LST 正相关^[76,81]。但夏季白天石家庄的 LST 与 ISA 相关性微弱,这可能与各类型硬化不透水面的格局有关^[60]。但若以 1% 为间隔重新分析,则 ISA 与 LST 平均值、最大值和最小值呈现明显的正向关系,虽然不是简单的线性关系^[60]。也有研究发现 ISA 在冬季白天与 LST 负相关,其与 LST 的相关度夏季强于冬季,夜间强于白天。对美国密尔沃基多年夏季白天的研究表明,在考虑周边环境的情况下,ISA 与 LST 的关系会更强^[54]。此外,前人的研究还表明随着建筑高度和建筑密度的增加导致建筑遮阴面积增加、日照时间和太阳短波辐射量减少,进而导致 LST 下降^[82,83]。

其他的地表参数,如归一化裸土指数(NDBaI)、增强型裸土指数(EBSI)、地表反照度和天空视场角,也与 LST 密切相关。兰州夏季白天及广州冬季白天的 NDBaI 及春季宿州白天的 EBSI 均与 LST 显著正相关^[31,35,84]。但对深圳秋季白天的研究表明两者为非线性负相关^[64]。反照度方面,对鹿特丹夏季白天的研究表明强热岛会出现在低反照度的地方^[85];对北京多年的研究表明夜间反照度的质心变化对其 SUHI 质心变动的解释度近 50%^[64],白色天空反照度(WSA)对 LST 季节变化的解释度为 54%^[84];基于 Aqua/MODIS 对全球的研究表明夜间热岛强度与反照度城郊差正相关^[83];基于 Terra/MODIS 对全球的研究表明夏季城区反照度比农田和林地明显要低,冬季城区却与林地类似^[86];城市高度的污染可以增加反照度和长波辐射^[87]。天空视场角则与白天的 SUHI 强度负相关^[88]。

地表生物物理参数更能定量详尽地反映多种地表状况的连续变化,通常与 LST 的相关性更好^[21,88]。前人发展了数量众多的指标,但对不少指标的多地区验证及各指标间的比对研究依然较为缺乏。此外,应当注重发展和完善围绕生态学过程,涵盖更多维度、空间范围、考虑时间累计效应及整合多个地表要素信息的指标。

2.3 景观格局

景观格局包括景观组分和景观配置,分别指各景观要素所占面积的百分比及其空间布局。景观格局分析法可分为景观指数法和空间统计法。景观组分及配置对 LST 的影响均要考虑背景环境的影响^[89]。没有任何单独的景观配置指数和 LST 在所有的土地利用类型下均显著相关。

从综合考虑多类景观要素的研究来看,景观组分与配置均与 LST 密切相关。采用单层次普通最小二乘法(OLS)对巴尔地摩夏季白天的研究表明景观组分比配置重要^[60],但采用 OLS 对美国凤凰多个人口普查区夏季白天及采用多层次方差组分模型对珠海秋季白天的研究却得到相反的结果^[91,92]。这可能与所采用的方法及研究区的背景环境有关^[91]。具体到景观组分,对巴尔的摩四季白天的研究表明所有土地覆盖变量对 LST 解释作用的正负方向性在四季均一致,但效应的幅度却具有很大的季节变化^[57],夏季解释能力最强,冬季最弱。研究还表明在 LST 分辨率粗糙不变的前提下,LUCC 分辨率的提高并不显著影响 LUCC 类型变量与 LST 的关系^[57]。空间分辨率为 0.6m 和 30m 的数据具有相似的解释能力。从综合考虑多类景观要素空间配置的研究来看,平均 LST 与 Shannon 多样性指数(SH-DI)和 Shannon 均匀性指数(SHEI)负相关^[33]。这表明 LUCC 类型越多、各类型丰度越均衡,越利于缓解热岛。反之,与聚集度指数正相关^[33]。这表明少量的大面积的连续的 LUCC 斑块会加剧热岛,混合的 LUCC 类型和空间分布格局会缓解热岛。基于半径分形分析法对从高温区中央往研究区边界的剖线的研究表明仅不透水面的组成显著减少,裸地分布均匀,水体、林地和农田均显著增加,导致白天的 LST 明显降低^[33]。

对于植被要素,基于植被斑块前人分析了南京夏季白天的对数变化后的 LST 和景观指数的关系^[42]。结果显示,LST 与植被斑块的面积非线性负相关,和周长及形状指数(LSI)负相关。这说明植被斑块越大、形状越规则或越接近正方形,降温效果越好。其中 LST 与面积的非线性关系表明面积小的植被斑块随着面积的增加开始降温效果改善较慢,而后改善较快。前人更多的是基于栅格、格网或土地利用地块尺度上开展 LST 和景观指数的分析。研究表明景观组分和配置均对 LST 有较大影响^[52,93-96]。基于不同尺度格网对长春夏季白天的研究表明 LST 与景观配置的关系依赖于尺度,尺度越大,相关性越强^[52]。也就是当尺度变大的时候,植被配置的作用更加重要^[52]。但过大的尺度可能导致大量信息的流失,导致偏差性的解释和不准确的推断^[64]。据此,通过分析美国凤凰不同窗口大小林地和草地局地墨兰指数与 LST 的关系后认为 200m 为最佳分析尺度^[64]。但基于不同分辨率 LUCC 数

据对北京秋季白天的研究表明,无论是简单的相关分析还是控制绿地面积百分比后的偏相关分析均表明,所有的景观指数和 LST 均在不同分辨率下显示出差异,甚至得出完全相反的结论^[67]。这表明两者关系在不同尺度上的复杂性。基于标准化互信息方法对阿克苏夏季白天的研究表明,虽然景观面积百分比(PLAND)是影响 LST 改变最重要的变量,但绿色空间的空间配置,如边界密度(ED)和斑块密度(PD),对 LST 影响也很显著^[68]。两类结合具有更决定性的作用。基于方差分解对北京秋季白天的研究表明,LST 的最大影响因素为景观组分和配置的交互作用,其次为它们与空间自相关的交互作用。景观配置的作用仅略低于景观组成^[69]。绝大多数情况下,绿地面积百分比与昼夜对应斑块 LST 负相关,绿量影响更为明显,林地的降温效果比草地更强^[28,52,57,93,98,99]。基于地块对鹿特丹夏季多个白天的研究表明,绿色区域百分比对地块平均地温影响最大,其值每增加 10%,则平均地温下降 1.3℃^[28]。对武汉或长春夏季白天的研究表明,LST 和绿地景观面积百分比负相关^[33,52]。树冠百分比是影响巴尔的摩春秋白天 LST 的一个重要因素^[57]。对美国凤凰城中心地带夏冬昼夜的研究表明,林地比草地更能有效缓解热岛^[68]。草地面积百分比对冬季夜间 LST 无太强影响,但在夏季夜间却与 LST 强烈线性负相关。它与夏冬白天 LST 均非线性负相关。当它不超过 0.4 时,对 LST 影响不大;否则在夏冬白天均有显著的降温效果。林地面积比则在除冬季夜间外均和 LST 线性负相关。但夏季白天北京公园内部温度与其林地、草地面积无显著相关性,而与三维绿量有关,并随其数量增加而使得公园内温度的下降趋势趋于缓和;对周边降温范围与绿量的相关性不显著,但与林地面积显著正相关^[69]。景观配置方面,LST 与边界密度(ED)、平均面积密度(MAD)、最大斑块指数(LPI)、聚集度(CONT)、平均形状指数(MLSI)、局地墨兰指数为负相关^[33,42,52,93,94,96];与分裂度(SPLIT)正相关^[52]。这表明绿地数量、总周长及子斑块面积越大,越离散分布,降温效果越好。前人还分析了美国凤凰 LST 和局地墨兰指数的相关性强弱的昼夜及季节变动。结果是夏季白天关系最强,冬季夜间最弱^[69]。对 LST 和斑块密度(PD)或景观形状指数(LSI)的研究却有着完全相反的结论,其中对夏季长春和全年北京的白天研究显示为正相关关系^[52,93,94,99],北京公园内

部林地和草地还与其对周边降温范围显著负相关^[69];但在夏季的武汉白天却为负相关关系^[33]。

前人基于地块层面研究了水体面积比例对 SUHI 强度和面积关系的影响,但所得结论不同。对印第安纳波利斯四季四天利用主成分分析的研究表明其中一个主成分因素与水体比例关系密切^[88];水体比例与武汉夏秋白天的 SUHI 强度显著负相关^[33,43];与美国凤凰城夏冬白天的 LST 和广东 10 个城市的冬季白天的热岛面积弱相关^[62,98];与鹿特丹多年夏季白天的热岛强度的相关性不显著且相关系数很小^[28];对美国凤凰城夏冬夜间的 LST 无明显作用^[68];北京夏季白天公园水体面积与其内部地温、对周边区域降温幅度和范围均显著正相关^[69]。这可能是由于各地的水体组成及配置差异较大造成的。景观配置方面,对河湖湿地大面积广泛分布的武汉夏秋白天的研究表明,LST 与 ED、平均水体大小(MPS)、LPI、水体隔离和破碎度(MPI)负相关。这表明水体边界越长、斑块面积越大、分布越离散,降温越显著^[33,43]。上海春季的 LST 与水体 PD、结合度及 LSI 显著相关,且 LST 与前两者存在回归关系^[100]。

基于地块和格网分析的结果表明,除沙漠及干燥疏灌丛生态区外的城市里的硬化地表面积比例通常与白天 LST 正相关,并在各个季节对 LST 均有很好的解释能力^[28,33,49,50,57,101]。但墨尔本夏季白天的 LST 与城市基础设施百分比关系不大^[61]。在沙漠及干燥疏灌丛生态区的城市里,这种关系比较复杂且前人的研究结论有所不同。对美国大陆此类多个城市的研究表明该关系为非典型的 U 型模式,即从市中心到郊区有所减少,而后从郊区再到乡村有所增加^[69]。两者的线性关系不显著,需要进行二次多项式拟合。并且由于城市数量太少,拟合系数的变动也比较大。沙漠城市里适当的 ISA 反而比周边的沙漠边缘的乡村 LST 低^[69]。但对单个该类型的美国凤凰城中心地带的研究表明,两者为非线性正相关关系。当不透水面面积比例不超过 0.4 时,LST 随其数值的增加而较快增加,而后较慢增加^[68]。进一步将不透水面细分来看,夏冬季节的 LST 与建筑物面积比和商业区面积比分别弱线性正相关和弱线性负相关;与居民区面积比为较大的线性正相关关系^[68]。夜间,对美国凤凰城中心地带的研究表明不透水面比例和夏冬季的 LST 线性正相关;建筑物面积比和夏季 LST 弱负相关,和冬季的基本没关系;

商业区面积比与夏冬季的 LST 负相关;住宅区面积比在夏季和 LST 正相关,在冬季关系极弱^[6]。墨尔本夏季夜间两者也是正相关的^[6]。考虑了环境背景后对美国凤凰城夏季夜间的研究表明,在土地利用为工业或商业用地的地方,建筑面积比与 LST 负相关;在湿生环境背景下和住宅区面积比为正相关,干生环境背景下则关系不显著;平面硬化地表面积比仅在工业或商业用地里正相关,其他不显著^[8]。景观配置指数方面,武汉夏季白天不透水面的 PD 和 ED 与 LST 负相关。这表明它的斑块数量越多、周长越长,增温越明显^[3]。而北京白天的全年 LST 与不透水面多种景观指数的相关系数序列表明两者相关度很小但时间变化趋势一致^[3]。此外,前人还利用局地墨兰指数分析了美国凤凰昼夜的 SUHI 和人工构筑物空间格局的关系。结果表示建筑物的组成和配置对昼夜 LST 影响很弱,即建筑物对 SUHI 影响很小。而平整地面的组成和配置与 LST 显著相关,对夜间影响更强。LST 随着局地墨兰指数的增加而增加,即聚合的配置会提高 LST。不同 LUCC 面积比例下,平整地面的局地墨兰指数对 LST 相关系数有所不同。当建筑物组成超过 50%,平整地面格局对 LST 影响微弱,原因可能是建筑阴影的制冷效应。当平整地面比例超过 50% 或者平整地面与土壤的比例超过 90%,两者的关系更强。设计者应避免建立大型的停车场地块,而应考虑建立狭窄的街道和道路^[10]。

其他景观要素方面,在美国凤凰城中心地带,无人管理的土壤面积比与夏冬白天和夏季夜晚的 LST 非线性正相关,与冬季夜晚的不相关^[6]。

景观组分与配置可很大程度上指导城市规划实践。前人已经取得很大的进展,但仍有几点不足。首先,现有的景观指数多数是二维的,难以详尽反映地表情况。其次,大多数研究是采用基于遥感反演的土地覆盖计算的景观组分和配置的参数与 LST 进行简单的回归,尚未对生态学过程开展研究。应注重围绕生态学过程发展和选取指数,并与数值模拟相结合,更好地揭示驱动机制及指导实践。此外,受限于数据源和方法的局限,前人研究仍存在结论相互冲突或急需深化的地方,应采用多源数据,同时对全球多个代表性城市开展研究。

2.4 人类活动强度

人类活动产生热源越多的地方 LST 越高并且季节性变化越小^[24,33,41,88,103]。SUHI 强度或面积与

城市大小、总的人口密度、不同种族人口密度、人口数量、建成区面积、夜间灯光强度及其城郊差正相关^[47,62,85,92,101,104]。空调在夏季会释放热源而在冬季释放冷源,从而加剧夏季而削减冬季热岛^[8]。LST 还会受到交通负载量的影响^[4]。武汉夏季白天绝大多数的高 LST 像元分布在不透水面上,但却有 6% 分布在水体边上^[3]。经实地调查,这些地方有工业废液或生活污水的排放,因而具有人为热源。

由于定量计算人为热所需的人口数据、各类行业的煤、油、电、气等消耗量、车流量及车辆类型、详细的建筑物三维数据等较难获取^[105],通常获取的社会经济统计数据也都是基于行政单元搜集的面上数据,而遥感可获取详尽的场数据,这使得较难开展两类数据的相关分析。除尝试获取更详尽的数据源外,基于大数据提取相关信息应是一种潜力较大的手段。

2.5 气象条件和地理位置

基于 Aqua/MODIS 数据对伯明翰夏季夜间的研究表明大气稳定性越高,SUHI 越强。云量和风速的增加会降低热岛强度。不同大气模式下的 SUHI 强度显著不同,空间分布也会发生相当大的变化^[8,39]。对超大城市台北和中等城市宜兰的研究表明,热浪时城乡昼夜的 LST 均会增加。虽然这在一定程度上可削弱热岛效应,但热浪时期的 SUHI 还是多比非热浪时期要高,且台北和宜兰的热岛强度差距很小,仅约 1℃^[6]。还有学者关注了塞浦路斯冬季一次热浪事件与同时段多年平均夜间 SUHI 强度的区别,其中 2 个行政区明显增强,2 个则变化不大^[106]。利用高斯模型对东亚和东南亚 8 个城市的研究表明由于受到海风的影响,海边城市热岛强度的日变化是不同的;海风还会影响热岛形状,靠海面的区域比内陆热^[10]。内陆地区城市的 SUHI 形状则昼夜类似。距离海岸线的远近可解释悉尼夏季白天 LST38% 的变化,两者为二次回归关系。LST 先随离海岸线距离的增加而增加而后减小^[6]。此外,墨尔本夏季白天的 LST 随至水体距离的增加而增加,而在夜间却无明显趋势^[6]。对全球需要制冷时间段内的研究表明位置经度和纬度对昼夜热岛强度的影响都比较大;经度是影响白天地表冷岛强度最重要的要素^[47]。广州冬季白天的 LST 与海拔高度负相关^[6]。

受限于星载数据源在非晴空条件下无法监测 LST 的不足,该天气条件下的 SUHI 研究极少,但其

未必就不重要。应基于机载数据或采用热红外辐射仪以弥补该方面的不足。

2.6 政策要素

政策要素很大程度上影响着其他要素,进而影响到 SUHI 的时空变化。它主要包括绿色空间扩张、建筑用地比例和密度的下调、清洁能源推广、城市功能区的空间调整等^[27,65,79,103,107]。现有研究绝大多数是对特定研究区实施政策前后的 LST 进行对比研究,缺乏对政府及规划部门政策倾向的分析。应尝试采用文本挖掘的方法分析政策动向,并结合遥感手段和数值模拟方法提前开展情景分析,进而为规划实践服务。

2.7 综合分析

分析单个要素对 LST 影响的时候经常难免会去考虑其他要素的类别。这种情况已在上文中加以述评。本小节主要综述前人对多个影响要素同等考虑的研究。

基于变量选择和排序法对全球需要制冷时间段内的研究表明,位置经度、纬度和城市大小对昼夜热岛强度的影响都比较大。之后,EVI 及夜间灯光常排在位置或城市大小之后为第二或第三重要因素。城市形态指标影响的排序较靠后。人口密度的重要性较小。经度是影响白天热汇最重要的要素;EVI 的影响也较大;城区面积的影响要小些。夜间主导要素为城区面积、EVI 和夜间灯光强度^[47]。基于 Aqua/MODIS 数据对中国的多年研究表明,白天 SUHI 的分布在夏季主要与植被活跃度及人为热有关,在冬季与气温和降水有关;夜间则在各个季节均与反照度、人为热、建成区密度及气候密切相关^[108]。所有因素对白天与夜间热岛变动的解释度分别为 57% 和 72%,对夏季和冬季分别为 61% 和 90%^[108]。

前人建立了悉尼夏季白天 LST 与植被覆盖率、距离海岸线远近及城市结构类型的模型,并发现在综合考虑各要素后植被覆盖率只有在大于 40% 的情况下才有价值^[63]。前人建立了上海春季白天 LST 与各主成分变换后主要组分的回归关系,并利用这些组分与各要素的线性关系将其转换为与建筑物面积百分比、基于混合像元分解的不透水面面积百分比、人口密度、道路密度、工业用地面积百分比、NDVI、NDWI、SHDI 和蔓延度指数(CI)的回归关系^[64]。结果表明景观格局对 LST 作用显著,特别是在正在经历城市化过程的斑块破碎化严重的地区。

与其他要素相比,人口密度和道路密度的影响不大。人口密度高的旧城区中心的热岛强度甚至反而会降低;道路的作用可能被其两旁的植被所削弱。前人基于现有的 NDBI、土壤调节植被指数(SAVI)和 MNDWI 发展了一种可以反映硬化地表状况的指数^[73],并建立了伊斯坦布尔秋季 LST 和该指数、SAVI 和 MNDWI 之间的回归关系。前人还建立了广州冬季白天 LST 与多个地表生物物理参数及海拔高度的回归关系^[61],以及福州春季白天 LST 与 NDISI、MNDWI 和 NDVI 的关系^[67],济南夏季白天 LST 与 NDISI、MNDWI 和 SAVI 的关系^[68]。值得注意的是在对多个要素利用逐步回归方法进行分析时,由于要素彼此间的相关性,会导致一些与 LST 相关的影响因素未进入方程^[68]。

综合分析是统筹各影响因子并找出关键改良措施的重要方法。除上文提到的问题外,还有以下几点值得注意:应同时对不同背景环境下的多个城市开展研究并找出其关键的影响要素;除气温外,空气湿度、风速、辐射强度等也是影响热舒适度的要素^[109],应协同考虑它们的交互影响,以判定何时何地应缓解、无视、甚至是增强 SUHI 以提高热舒适度;应统筹协调同一地区多个时间段内的福祉;最后,除考虑热环境问题外,不能忽视采光、空气污染等问题^[109-111],避免顾此失彼,因小失大。

3 结束语

虽然国内外已经开展了许多 SUHI 影响要素的研究工作,但是依然有不少或空白或尚需深化或现有结论相互冲突的领域。为更好地理解 SUHI 的影响要素,基于上述综述和讨论,本文提出几个潜在的关键问题或研究方向。

1) 为详细掌握全球 SUHI 时空变化的影响因素,应进一步开展对多类气候带上的多种条件下的多级大小的多个城市在多个季节多个时刻或时间段内的研究。特别注重研发和利用相关热红外数据源来分析夜间或非晴空条件下的 SUHI 影响因素。

2) 细化 LULC 类型,发展和完善二维或三维的景观格局指数,引入更多的空间分析方法,深化 LULC 类型及景观组分和配置对 LST 的影响研究。

3) 完善和发展反映地表生物物理条件、人类活动强度、气象条件和地理位置的指标。指标的空间维度应从二维转向三维并适当考虑时间维度,空间范围应同时包括地上和地下。指标内涵应从单一环

境要素走向多要素的整合。特别应注重围绕生态过程发展或选择指标,如接收和释放的瞬时及累计辐射量、建筑材料的热力学参数、蒸散发量等。此外,应同时注重自然、社会及经济影响要素的研究,更多地采用更加详实的社会经济数据。

4) 海量的大数据类型众多,蕴含着极为丰富的信息。例如详细的店铺信息有利于获取详尽的土地利用类型分布及人为热排放、手机定位信息指示着人口数量、网页新闻可揭示人类对热环境的需求及政府与规划部门的解决方向等。应不拘一格,采用多学科方法开展信息提取。

5) 综合分析 LST 与各影响因素的关系,找出实现对 SUHI 趋利避害的关键因子,并结合其他采光、空气污染等城市问题的影响要素给出最优配置方案。此外,据此关系实现 LST 尺度的下推^[12-14],并用其提供的时空分辨率均高的数据监测 SUHI 的时空变化。

6) 气温数据与人类关系更为直接。虽然地表温度和气温关系密切,但在城市环境背景下依然无法直接转换^[25,27,115]。结合气象站数据、LST 数据、LULC 数据、地表生物物理参数、景观格局、地理位置等预测气温分布的方法依然值得探索^[16,117]。

7) SUHI 直接或间接产生的影响不一定完全是负面的,特别是对寒带地区^[6]。应继续研究热岛对全球不同气候带不同季节的正向、中性或负向的影响,并利用综合寻优模型来判别应在何时何地缓解、无视,甚至增强热岛,达到趋利避害的目的。

参考文献

- [1] ANON. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights [R]. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2014: 20-20.
- [2] ROBERTO S R, KAREN C S, DAVID S, et al. Science plan: urbanization and global environmental change [R]. Bonn: International Human Dimensions Programme, 2005: 18-25.
- [3] HOWARD L. Climate of London deduced from metrological observations (Vol. 1) [M]. 3rd ed. London: Harvey and Dolton Press, 1833.
- [4] MANLEY G. On the frequency of snowfall in metropolitan England [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84 (359): 70-72.
- [5] KANDA M, KANDA M. Progress in Urban Meteorology : A Review [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2007, 85 (7): 363-383.
- [6] UNGER J. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach [J]. Climate Research, 2004, 27 (3): 253-264.
- [7] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, et al. Global change and the ecology of cities [J]. Science, 2008, 319 (5864): 756-760.
- [8] SHI B, TANG C S, GAO L, et al. Observation and analysis of the urban heat island effect on soil in Nanjing, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67 (1): 215-229.
- [9] KNAPP S. Changes in the functional composition of a central Europe-an urban Flora over three centuries [J]. Perspectives in Plant Ecology Evolution & Systematics, 2010, 12 (3): 235-244.
- [10] WONG K V, PADDON A, JIMENEZ A. Review of world urban heat islands: many linked to increased mortality [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2013, 135 (2): 82-90.
- [11] MEMON R A, LEUNG D Y C, LIU C H. An investigation of urban heat island intensity (UHI) as an indicator of urban heating [J]. Atmospheric Research, 2009, 94 (3): 491-500.
- [12] HUANG L, ZHAO D, WANG J, et al. Scale impacts of land cover and vegetation corridors on urban thermal behavior in Nanjing, China [J]. Theoretical & Applied Climatology, 2008, 94 (3): 241-257.
- [13] ZEHNDER J A. Simple modifications to improve fifth-generation Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model performance for the Phoenix, Arizona, metropolitan area [J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41 (9): 971-979.
- [14] WENG Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64 (4): 335-344.
- [15] RAO P. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1972, 53 (7): 647-648.
- [16] SCHWARZ N, LAUTENBACH S, SEPPELT R. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115 (12): 3175-3186.
- [17] MOSTOVOY G V, KING R L, REDDY K R, et al. Statistical estimation of daily maximum and minimum air temperatures from MODIS LST data over the state of Mississippi [J]. GIScience & Remote Sensing, 2006, 43 (1): 78-110.
- [18] VOOGT J A, OKE T R. Thermal remote sensing of urban climates [J]. Remote sensing of environment, 2003, 86 (3): 370-384.
- [19] ZHAN W, JU W, HAI S, et al. Satellite-derived subsurface urban heat island [J]. Environmental science & technology, 2014, 48 (20): 12134-12140.
- [20] 胡华浪, 陈云浩, 宫阿都. 城市热岛的遥感研究进展 [J]. 国土资源遥感, 2005, 65 (3): 5-9.
- [21] 谢苗苗, 王仰麟, 付梅臣. 城市地表温度热岛影响因素研究进展 [J]. 地理科学进展, 2011, 30 (1): 35-41.
- [22] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展 [J]. 生态学报, 2012, 32 (14): 4553-4565.
- [23] ROTH M, OKE T R, EMERY W J. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology [J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10 (11): 1699-1720.
- [24] 徐涵秋, 陈本清. 不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法 [J]. 遥感技术与应用, 2003, 18 (3): 129-

- 133.
- [25] WEN Q, YANG S. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city [J]. Journal of Environmental Management, 2004, 70(2): 145-156.
- [26] CHEN X L, ZHAO H M, LI P X, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2): 133-146.
- [27] 张金区. 珠江三角洲地区地表热环境的遥感探测及时空演化研究 [D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2006.
- [28] KLOK L, ZWART S, VERHAGEN H, et al. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics [J]. Resources Conservation & Recycling, 2012, 64(7): 23-29.
- [29] 郭振, 胡响, 李元征, 等. 北京市城区地表温度冷热斑块空间格局分析 [J]. 城市发展研究, 2014, 21(2): 60-60.
- [30] 刘玉安, 唐志勇, 程涛, 等. 基于 HJ-1B 数据的武汉市 LST 反演及热环境分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 526-533.
- [31] SUN Q, WU Z, TAN J. The relationship between land surface temperature and land use/land cover in Guangzhou, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(6): 1687-1694.
- [32] LUCENA A J D, FILHO O C R, PERES L D F, et al. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro [J]. Theoretical & Applied Climatology, 2013, 111(3-4): 497-511.
- [33] WU H, YE L P, SHI W Z, et al. Assessing the effects of land use spatial structure on urban heat islands using HJ-1B remote sensing imagery in Wuhan, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 32(1): 67-78.
- [34] DOBROVOLNY P. The surface urban heat island in the city of Brno (Czech Republic) derived from land surface temperatures and selected reasons for its spatial variability [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 112(1-2): 89-98.
- [35] 张建明, 王鹏龙, 马宁, 等. 河谷地形下兰州市城市热岛效应的时空演变研究 [J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1530-1537.
- [36] 张晓莉, 赵鹏祥, 高凌寒, 等. 基于 Landsat 影像的西宁市主城区热岛效应分析 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 183-190.
- [37] HUA L, WENG Q. Seasonal variations in the relationship between landscape pattern and land surface temperature in Indianapolis, USA [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2007, 144(1-3): 199-219.
- [38] MORRIS C J G, SIMMONDS I, PLUMMER N. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(2): 169-182.
- [39] TOMLINSON C J, CHAPMAN L, THORNES J E, et al. Derivation of Birmingham's summer surface urban heat island from MODIS satellite images [J]. International Journal of Climatology, 2010, 32(2): 214-224.
- [40] HAASHEMI S, WENG Q, DARVISHI A, et al. Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city [J]. Remote Sensing, 2016, 8(4): 352-352.
- [41] CHUDNOVSKY A, BEN-DOR E, SAARONI H. Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements [J]. Energy & Buildings, 2004, 36(11): 1063-1074.
- [42] ZHANG X Y, ZHONG T Y, FENG X Z, et al. Estimation of the relationship between vegetation patches and urban land surface temperature with remote sensing [J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(8): 2105-2118.
- [43] ROTEM-MINDALI O, MICHAEL Y, HELMAN D, et al. The role of local land-use on the urban heat island effect of Tel Aviv as assessed from satellite remote sensing [J]. Applied Geography, 2015, 56: 145-153.
- [44] 石涛, 杨元建, 马菊, 等. 基于 MODIS 的安徽省代表城市热岛效应时空特征 [J]. 应用气象学报, 2013, 24(4): 484-494.
- [45] YANG B, MENG F, KE X, et al. The impact analysis of water body landscape pattern on urban heat island: A case study of Wuhan City [J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015: 1-7.
- [46] YUE W, LIU Y, FAN P, et al. Assessing spatial pattern of urban thermal environment in Shanghai, China [J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2012, 26(7): 899-911.
- [47] CLINTON N, GONG P. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134(5): 294-304.
- [48] LAZZARINI M, MARPU P R, GHEDIRA H. Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 130(4): 136-152.
- [49] IMHOFF M L, ZHANG P, WOLFE R E, et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(3): 504-513.
- [50] ZHANG P, IMHOFF M L, WOLFE R E, et al. Characterizing urban heat islands of global settlements using MODIS and nighttime lights products [J]. Canadian Journal of Remote Sensing Journal Canadien De Télédétection, 2010, 36(3): 185-196.
- [51] WENG Q, LIU H, LIANG B, et al. The spatial variations of urban land surface temperatures: pertinent factors, zoning Effect, and seasonal variability [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2008, 1(2): 154-166.
- [52] REN Z, ZHENG H, HE X, et al. Estimation of the relationship between urban vegetation configuration and land surface temperature with remote sensing [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2015, 43(1): 89-100.
- [53] RAMDANI F, SETIANI P. Spatio-temporal analysis of urban temperature in Bandung City, Indonesia [J]. Urban Ecosystems, 2014, 17(2): 473-487.
- [54] SONG Y, WU C. Examining the impact of urban biophysical composition and neighboring environment on surface urban heat island effect [J]. Advances in Space Research, 2016, 57(1): 96-109.
- [55] 尤艳丽, 周敬宣, 李湘梅. 基于 RS 的武汉市夏季热岛效应与土地覆盖关系的研究 [J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2014, 45(3): 393-398.
- [56] QIAO Z, TIAN G, XIAO L. Diurnal and seasonal impacts of urbanization on the urban thermal environment: A case study of Beijing using MODIS data [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2013, 85(2): 93-101.
- [57] ZHOU W, QIAN Y, LI X, et al. Relationships between land cover

- and the surface urban heat island: Seasonal variability and effects of spatial and thematic resolution of land cover data on predicting land surface temperatures [J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(1): 153-167.
- [58] SHEN H, HUANG L, ZHANG L, et al. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: a 26-year case study of the city of Wuhan in China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 172: 109-125.
- [59] YUAN F, BAUER M E. Comparison of impervious surface area and Normalized Difference Vegetation Index as indicators of surface Urban Heat Island effects in Landsat Imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3): 375-386.
- [60] LIU K, SU H, ZHANG L, et al. Analysis of the urban heat island effect in Shijiazhuang, China using satellite and airborne data [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(4): 4804-4833.
- [61] CHEN D, WANG X, YONG B K, et al. Assessment of urban heat island and mitigation by urban green coverage [M/OL]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 247-257.
- [62] ZHANG J, WANG Y. Study of the relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristic factors based on Landsat ETM + data [J]. *Sensors*, 2008, 8(11): 7453-7468.
- [63] ADAMS M P, SMITH P L. A systematic approach to model the influence of the type and density of vegetation cover on urban heat using remote sensing [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 132: 47-54.
- [64] QUAN J, CHEN Y, ZHAN W, et al. Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149(7): 33-46.
- [65] 王艳慧, 肖瑶. 北京市 1989-2010 年地表温度时空分异特征分析 [J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(3): 146-152.
- [66] 张宇, 陈龙乾, 王雨辰, 等. 基于 TM 影像的城市地表湿度对城市热岛效应的调控机理研究 [J]. *自然资源学报*, 2015, 30(4): 629-640.
- [67] XU H Q. Analysis of Impervious Surface and its Impact on Urban Heat Environment using the Normalized Difference Impervious Surface Index (NDISI) [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2010, 76(5): 557-565.
- [68] MENG F, SHAN B, LIU M. Remote-sensing evaluation of the relationship between urban heat islands and urban biophysical descriptors in Jinan, China [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 083693-083693.
- [69] WENG Q, LIU H, LU D. Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in city of Indianapolis, United States [J]. *Urban Ecosystems*, 2007, 10(2): 203-219.
- [70] PAN J. Area delineation and spatial-temporal dynamics of urban heat island in Lanzhou City, China using remote sensing imagery [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2016, 44(1): 111-127.
- [71] LIU A K, ZHANG X, LI X, et al. Multiscale analysis of urban thermal characteristics: case study of Shijiazhuang, China [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(8): 2910-2926.
- [72] MAN S W, NICHOL J E, TO P H, et al. A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis [J]. *Building & Environment*, 2010, 45(8): 1880-1889.
- [73] ESSA W, VERBEIREN B, KWAST J V D, et al. Evaluation of the DisTrad thermal sharpening methodology for urban areas [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2012, 19(10): 163-172.
- [74] STANGANELLI M, SORAVIA M. Connections between urban structure and urban heat island generation: an analysis through remote sensing and GIS [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2012, 7334(7334): 599-608.
- [75] FILIZ B B I. Determining the impact of urban components on land surface temperature of Istanbul by using remote sensing indices [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2014, 186(2): 859-872.
- [76] MA Q, WU J, HE C. A hierarchical analysis of the relationship between urban impervious surfaces and land surface temperatures: spatial scale dependence, temporal variations, and bioclimatic modulation [J]. *Landscape Ecology*, 2016, 31(5): 1139-1153.
- [77] 张好, 徐涵秋, 李乐, 等. 成都市热岛效应与城市空间发展关系分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(1): 70-78.
- [78] 曾胜兰. 道路建设对成都市热岛效应的影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(10): 1622-1627.
- [79] 李乐, 徐涵秋. 杭州市城市空间扩展及其热环境变化 [J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(2): 264-272.
- [80] 方刚. 基于 Landsat 8 卫星影像和地表参数的宿州市城市热岛效应分析 [J]. *土壤通报*, 2014, 45(5): 1241-1246.
- [81] WU C D, LUNG S C C, JAN J F. Development of a 3-D urbanization index using digital terrain models for surface urban heat island effects [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2013, 81(7): 1-11.
- [82] 叶智威. 基于遥感的高层密集街区与热景观关系研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- [83] 张佳华, 侯英雨, 李贵才, 等. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析 [J]. *中国科学*, 2005, 35(21): 187-194.
- [84] QUAN J, ZHAN W, CHEN Y, et al. Time series decomposition of remotely sensed land surface temperature and investigation of trends and seasonal variations in surface urban heat islands [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2016, 121: 2638-2657.
- [85] PENG S, PIAO S, CIAIS P, et al. Surface urban heat island across 419 global big cities [J]. *Environ. sci. technol*, 2011, 46(2): 696-703.
- [86] JIN M, DICKINSON R E, ZHANG D. The footprint of urban areas on global climate as characterized by MODIS [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(10): 1551-1565.
- [87] BADARINATH K V S, CHAND T R K, MADHAVILATHA K, et al. Studies on urban heat islands using envisat AATSR data [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2005, 33(4): 495-501.
- [88] WENG Q, LIU H, LIANG B, et al. The spatial variations of urban land surface temperatures: pertinent factors, zoning Effect, and seasonal variability [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2008, 1(2): 154-166.

- [89] CONNORS J P, GALLETTI C S, CHOW W T L. Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona [J]. Landscape Ecology, 2013, 28(2): 271-283.
- [90] ZHOU W, HUANG G, CADENASSO M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes [J]. Landscape & Urban Planning, 2011, 102(1): 54-63.
- [91] DU S, XIONG Z, WANG Y C, et al. Quantifying the multilevel effects of landscape composition and configuration on land surface temperature [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 178: 84-92.
- [92] LI X, LI W, MIDDEL A, et al. Remote sensing of the surface urban heat island and land architecture in Phoenix, Arizona: Combined effects of land composition and configuration and cadastral-demographic-economic factors [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174(2): 233-243.
- [93] YANG K, TANG M, LIU Y, et al. Analysis of microclimate effects around river and waterbody in Shanghai urban district [J]. Journal of East China Normal University. Natural Science, 2004, (3): 105-114.
- [94] LI X, ZHOU W, OUYANG Z, et al. Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: Evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China [J]. Landscape Ecology, 2012, 27(6): 887-898.
- [95] MAIMAITIYIMING M, GHULAM A, TIYIP T, et al. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2014, 89(3): 59-66.
- [96] FAN C, MYINT S W, ZHENG B. Measuring the spatial arrangement of urban vegetation and its impacts on seasonal surface temperatures [J]. Progress in Physical Geography, 2015, 39(2): 199-219.
- [97] 李小马. 北京城市景观格局的生态环境效应 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [98] MYINT S W, WENTZ E A, BRAZEL A J, et al. The impact of distinct anthropogenic and vegetation features on urban warming [J]. Landscape Ecology, 2013, 28(5): 959-978.
- [99] 冯悦怡, 胡潭高, 张力小. 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3179-3187.
- [100] 胡云. 上海城区不同类型水体与地表温度关系研究 [J]. 人民长江, 2013, 44(19): 88-90.
- [101] TRAN H, UCHIHAMA 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(1): 34-48.
- [102] ZHENG B, MYINT S W, FAN C. Spatial configuration of anthropogenic land cover impacts on urban warming [J]. Landscape & Urban Planning, 2014, 130(5): 104-111.
- [103] 但尚铭, 但玻, 许辉熙, 等. 环形热岛格局演变过程的遥感分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1125-1130.
- [104] CHEN L, JIANG R, XIANG W N. Surface heat island in Shanghai and its relationship with urban development from 1989 to 2013 [J]. Advances in Meteorology, 2015, 2016: 1-15.
- [105] 王业宁. 北京市区人为热输入估算及其对局地温度的影响研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [106] RETALIS A, PARONIS D, MICHAELIDES S, et al. Study of the august 2010 heat event in Cyprus [M/OI]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 265-270.
- [107] 王天星, 陈松林, 阎广建. 地表参数反演及城市热岛时空演变分析 [J]. 地理科学, 2009, 29(5): 697-702.
- [108] DU Z, LI W, ZHOU D, et al. Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping [J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(7): 672-681.
- [109] 吴志丰, 陈利顶. 热舒适度评价与城市热环境研究: 现状、特点与展望 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1364-1371.
- [110] JOHANSSON E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco [J]. Building & Environment, 2006, 41(10): 1326-1338.
- [111] VOS P E J, MAIHEU B, VANKERKOM J, et al. Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? [J]. Environmental Pollution, 2013, 183(4): 113-22.
- [112] STATHOPOULOU M, CARTALIS C. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(12): 2592-2605.
- [113] ZAKSEK K, OSTIR K. Downscaling land surface temperature for urban heat island diurnal cycle analysis [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 117(1): 114-124.
- [114] WENG Q, FU P. Modeling diurnal land temperature cycles over Los Angeles using downscaled GOES imagery [J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 97: 78-88.
- [115] SCHWARZ N, SCHLINK U, FRANCK U, et al. Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators—an application for the city of Leipzig (Germany) [J]. Ecological Indicators, 2012, 18(4): 693-704.
- [116] WONG N H, JUSUF S K, SYAFII N I, et al. Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption [J]. Solar Energy, 2011, 85(1): 57-71.
- [117] HENGL T, HEUVELINK G B M, TADIC M P, et al. Spatio-temporal prediction of daily temperatures using time-series of MODIS LST images [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 107(1-2): 265-277.