

地表城市热岛效应的概念内涵与定量刻画

江 颂¹, 彭 建¹, 董建权¹, 程雪雁¹, 丹宇卓²

(1. 北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055)

摘要: 明晰城市热岛(UHI)效应相关概念内涵、厘清其定量刻画方法是有效开展UHI效应研究的重要基础。全球城市化进程使UHI效应越发普遍, 相关研究数量迅速增长并出现了UHI效应的多样认知, 尤其对具有空间异质性表征优势的地表城市热岛(SUHI)效应开发了多样的定量刻画方法, 但目前尚缺乏对其定量刻画方法的系统梳理。因此, 本文对城市热岛、城市热岛效应、地表温度和城市热环境等易混淆概念进行了辨析, 总结了各类UHI典型空间位置和尺度范围。在SUHI效应定量刻画中, 将SUHI范围识别方法归结为城乡温度阈值、温度等级阈值、高斯拟合参数、温度衰减突变四大类, 指出当前SUHI范围识别研究侧重于对SUHI影响规模的认知。研究同时对各类范围识别方法所对应的SUHI强度表征指标进行了梳理, 认为理解指标本质内涵是掌握指标间潜在差异的前提。未来研究应整合多维度数据以突破单一SUHI监测途径, 发展大尺度SUHI定量刻画方法以拓展定量研究的广度, 认知连通化SUHI空间形态以挖掘范围识别研究的深度。

关键词: 城市热岛; 地表城市热岛效应; 热岛范围; 热岛强度

DOI: 10.11821/dlxb202209008

1 引言

城市地区多样的经济活动和较高的社会活力使城市极具吸引力, 进而驱动了从乡村向城市转型的城市化进程。基于此转型视角, 城市化是一个复杂的社会经济过程: 表现在土地利用类型上, 将原本的裸土、植被、乡村住宅转变为高密度的城市建筑, 城市化由此成为地球系统最显著的土地利用变化形式与驱动力; 进一步作用在人口分布上, 城市化使大量农村人口转移到城市地区, 带来显著的人口增长和聚集。据联合国报告, 2018年全球已有55%的人口居住在城市地区, 与1950年30%的城市人口相比增长显著, 且预计在2050年城市人口会达到68%^[1]。同时, 城市面积仅占全球陆地总面积的3%, 却占据了全球60%~80%的能源消耗和75%的碳排放^[2], 这使得城市化极易导致一系列与人类活动相关的生态环境问题。已有大量研究证明城市发展所引起的物理环境变化与气候变化之间存在不可否认的联系^[3-4]。其中, 城市热岛(Urban Heat Island, UHI)效应便是城市化导致的最明显的气候变化之一, 也是自20世纪以来被广泛调查并记录在案的局地气候变化现象^[5-6]。

收稿日期: 2021-09-22; 修订日期: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130505) [Foundation: Key Project of National Natural Science Foundation of China, No.42130505]

作者简介: 江颂(1995-), 女, 重庆人, 博士生, 研究方向为城市热岛效应。E-mail: jiangsong@pku.edu.cn

通讯作者: 彭建(1976-), 男, 四川彭州人, 博士, 教授, 主要从事景观生态学与综合自然地理学研究。

E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

1833年 Luke Howard 在伦敦首次观察到了“城市热岛”的气候特征,即城区温度高于周围郊区的现象^[7]。UHI效应的产生一方面可归因于城区内密集的人类活动释放了大量人为热,另一方面的原因在于城市的不透水面替代了原有的可渗透裸土、植被、水体等,吸收了更多的太阳辐射、减少了蒸散发、限制了空气流动等^[8]。尽管UHI效应不会像台风、暴雨、干旱等气象灾害那样带来强烈的破坏,但其不利影响会长期作用于城市,包括增加能源消耗、降低空气质量、引发物候异常等^[9];而当UHI效应与极端高温事件相结合时,将极大地影响城市居民的热舒适度,甚至增大与高温相关的心脑血管疾病、呼吸道感染等疾病发病率和死亡率^[10-11]。UHI现象在几乎所有气候类型下各种规模的城市中均有发生,且由于它直接与全球资源环境问题的两大驱动因素(人口增长和气候变化)相关联,近几十年来其研究数量增长十分显著^[12],至今已是最多的城市气候效应^[5]。

目前,UHI效应的监测途径主要包括实地观测、数值模拟和遥感反演。其中,实地观测是最早用于观测UHI现象的途径,包括固定站点上的观测和移动车载装备的观测,也是最传统的研究手段。数值模拟是在实测数据的基础上,以热力学和动力学为理论基础,通过数学物理建模来模拟UHI效应,其优势在于能够在虚拟条件下模拟更复杂多样的情景,不受实测研究中规模和范围的约束;常用的模型包括中尺度天气预报模型(Weather Research and Forecasting Model, WRF)、城市冠层模型(Urban Canopy Model, UCM)和第五代中尺度模型(The Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model, MM5)等大气模型,以及常与中尺度模型结合使用的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模型等^[10, 13-14]。遥感反演则指基于航空、航天、近地遥感提取地表温度信息的方法,其原理是地物对太阳辐射的不同吸收特征会形成不同波段辐射值,而热红外传感器能够捕捉该辐射特征,进而反演地物温度^[15];近年来,由于遥感数据较广的覆盖范围和易获取性,采用遥感反演地表城市热岛(Surface Urban Heat Island, SUHI)的研究数量急剧增长^[13, 16]。不断发展和完善的监测途径使UHI效应成为城市生态学中最受欢迎的话题之一^[16],研究数量的迅速增长不断扩展着UHI效应概念内涵。

当前以UHI效应为研究主题的高引用量综述中,UHI效应的影响因素与缓解措施是受关注最多的话题,既有对具体因素(如路面结构^[17]、树木特性^[18])影响机理的聚焦分析,也有对UHI效应与多种影响因素关系特征的系统归纳^[19-20]。作为关系特征分析的前提,UHI效应的定量刻画却未能成为重点关注内容,仅在少数综述中有所简述。具体而言,Rasul等概述了SUHI量化研究的三大数据源Landsat、MODIS和AVHRR的优缺点,并指出现有研究中用于量化SUHI的城乡温度采用了均值、最值等多种统计方式计算^[21]。Kotharkar等统计了所筛选文献中使用的UHI观测和建模方法,包括气象建模法、能量平衡研究法、固定站点观测法等,而使用卫星观测法的研究占比最高^[22]。Zhou等将当前量化SUHI的方法分为了以地表温度(Land Surface Temperature, LST)为代理、城市与参考区域温度差值、非参数统计模型3类,并强调了参考区域的不同定义为SUHI的量化结果带来了极大的不确定性^[23],促进了研究者对SUHI量化方法的关注;但由于量化方法并非其主要论述内容,该综述未对城市与参考区域温度差值、非参数统计模型大类下的不同方法进一步归纳和详述,也未区分SUHI范围和强度这两种不同量化对象。

同时,Heaviside等强调应对健康风险对UHI效应空间信息提出需求,以准确识别高风险区域^[24]。Mohajerani等指出,尽管UHI研究范围越发广泛,但存在实验和分析方法不一致的问题,UHI强度量化方法尚未统一^[17]。Li等^[25]和Giridharan等^[26]也阐明,不同的

UHI定义和计算方法给研究结果的准确性带来质疑,使不同研究之间的比较变得困难。除高引用量综述外,新近综述研究对UHI效应定量刻画给予了更多关注:Kim等总结了不同类型UHI对应的数据收集方法、平台或仪器,并指出现有UHI时空变化研究存在测量标准不明确的局限性^[10, 27];局地气候分区(Local Climate Zones, LCZ)的提出^[12],使UHI强度量化更为规范,但江斯达等通过Meta分析指出,即使在LCZ框架下也存在不同的UHI强度计算方法^[28]。总体而言,现有综述对UHI量化分析的数据基础和工具进行了较为全面的归纳整理,在UHI相关文献数量激增且研究方法不断更新、研究范围不断扩大的背景下极具价值。然而,尽管多项综述研究均指出不统一的UHI定量刻画方法给UHI量化结果带来了很大不确定性,却尚无综述研究聚焦于UHI效应定量刻画,当前仍缺乏从范围识别和强度表征的角度对UHI定量刻画方法的系统梳理。

UHI范围识别和强度表征方法作为UHI定量刻画的重要步骤,在近年的应用型研究中不断被丰富。例如,Zhou等分别尝试采用与城区相邻^[29]和相隔^[30]的区域作为乡村背景区域,通过指数衰减模型分析SUHI效应影响范围^[31],构建平面模型计算城市群的乡村背景温度^[32]。为避免城乡划分的局限性,LST与不透水面面积的线性函数斜率被用于衡量SUHI强度^[33]。此外,无需定义缓冲区的简化SUHI算法^[34]、用于长时序SUHI量化的动态算法^[35]、避开强烈人类活动区的改进等面积算法^[36]相继出现。可见,为满足不同研究需求,多种SUHI定量刻画方法已在诸多应用型研究中被提出。鉴于此,本文在厘清UHI效应的相关概念和类型的基础上,针对定量刻画研究中最受关注的SUHI,从范围识别方法和强度表征指标两方面梳理SUHI定量刻画方法体系及其近今进展。基于SUHI效应范围识别和强度表征方法的系统理解,有助于明确SUHI效应研究中不确定性的可能来源,从而为SUHI效应研究领域的进一步丰富与深入奠定坚实基础。

2 城市热岛效应概念内涵

2.1 城市热岛与城市热岛效应

尽管大多数研究并未对“城市热岛”和“城市热岛效应”加以刻意区分,两者的表述重点实则存在差别。为区分二者差异,首先需要回顾城市热岛这一概念的起源。19世纪初,英国化学家、气候学家Howard在对伦敦的气象观察中,首次发现并记录了伦敦市中心气温比周围郊区高的现象,但他当时并未对其命名。“热岛”(Heat Island)一词最早出现在1947年Balchin等的研究中,他们在对英国巴斯(Bath)及其周边区域的气候调查中发现海拔对温度有重要影响,但即使在相近海拔高度下,中心城区的温度也比周边农村地区高;他们将其描述为一个建成区内特有的“热岛”^[37]。由于当时UHI现象尚不普遍,其现象和名称在提出后并未受到重视,以至于学术界通常认为“城市热岛”这一术语是1958年由Manley提出。后者在分析伦敦的“人造变暖”是否会影响雪花下落频率时指出,“‘热岛’不可能很深,且大部分降雪可能会在刮风的天气下进行,而那时‘热岛效应’(Heat Island Effect)将会减弱”^[38]。因此,可以认为“城市热岛”这一名称最早是在1947年由Balchin等使用;而“城市热岛效应”这一术语才是由Manley在1958年最早提出。二者对比来看,“城市热岛”描述的是城区内因高温呈现的虚拟岛屿,“城市热岛”关注的对象因此更指向城市区域,强调“岛”的存在和形态特征;而“效应”一词原本是指由某种原因所产生的现象、作用或结果,“城市热岛效应”描述的是因城区内高温而呈现的城市与农村的温差现象,关注的是由城市与农村共同构成的整个区域,强调城乡温差所带来的影响或后果。

尽管城市热岛效应这一概念强调了热岛带来的影响,但由于技术条件的限制,早期研究主要关注对城乡热异常的简单观测,即UHI的实证性研究^[39]。1969年Oke在研究中强调需要理解UHI形成过程、驱动因素,并指出城市结构、人为热、空气污染等因素可能导致UHI^[40]。相近时期,Rao首次在UHI研究中使用了卫星遥感数据^[41]。这使得UHI研究数量快速增长,研究内容越发丰富,涵盖了空气温度和地表温度两类观测数据^[13]。至今,UHI研究已基本形成了“定量刻画—驱动因素—缓解措施”的研究体系。定量刻画作为UHI效应的分析基础,是UHI效应研究中受关注最久的热点主题。为发展科学普适的UHI效应量化方法,Steward在前人研究基础上提出的LCZ框架克服了城乡二分描述的不足^[12],在全球范围得到广泛应用。然而,LCZ框架并不能满足所有UHI效应研究的目的,定量刻画随UHI效应研究主题的逐步丰富而不断面向新挑战。

2.2 地表温度、城市热环境与城市热岛效应

LST是UHI效应和城市热环境研究的重要数据来源。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)将LST定义为在地球“表面”某一具体位置上触摸所感受到的温度,这里的“表面”是指从卫星角度透过大气看到的地面,包括冰雪、草地、建筑屋顶等^[42]。LST随地表能量平衡的变化而变化,其值是地表辐射和热力学特性的综合结果,整合了地表水分、热导率、地表发射率、来自太阳和大气的辐射、近地表大气等因素的共同影响^[43]。作为地表—大气交界面长波辐射、湍流热通量交换的直接驱动力^[44],LST反演受到遥感学者的重点关注。同时,LST数据对城市气候的研究也至关重要,可直接用于反映城市热环境特征,如UHI强度。因此,有不少研究直接使用LST代替UHI,分析与其他驱动因素的关联特征,以此研究UHI的时空动态影响机理^[19, 45-46]。但必须指出的是,LST与UHI的影响因素并不能完全对等;对LST有负向作用的因素的确具有缓解UHI效应的潜力,但UHI效应强调的是城乡之间温度的差值,从某因素能降低LST到判断该因素是否也能减弱UHI效应,这有赖于该因素是否在城乡之间存在显著差异。

城市热环境是在UHI效应的基础上发展起来的概念,是指与热有关的、能够影响人体热舒适度的物理环境^[47],常用于描述城市热环境的基本物理参数包括温度、热辐射、风速及湿度等^[48],是气候科学的重要研究领域。城市热环境的核心组成是城市下垫面的地表温度和空气温度,同时受到太阳辐射、大气状况、下垫面状况和人类活动的影响^[49]。城市热环境可以是多尺度的,包括城市尺度、街区尺度、建筑尺度、房间尺度及人体尺度,不同尺度上有不同的关注对象^[47]。目前,城市尺度上开展的城市热环境研究较多,并以UHI效应为主要关注对象,二者既有联系又有区别。相较而言,城市热环境和UHI效应均可用LST和空气温度来衡量,UHI的产生是城市化过程改变城市热环境的体现^[50];但城市热环境关注的是整个研究区温度的高低程度及其影响因素,而UHI效应强调的是研究区域内城市与农村的温度差异。而从相互联系来看,LST、城市热环境和UHI效应的时空演变都受到太阳辐射、大气状况、下垫面状况、人类活动等因素的影响;城市热环境、UHI效应都可以LST为表征指标,UHI效应是城市热环境的一种特征表现^[51],城市热环境则是UHI效应的研究载体(图1)。

2.3 城市热岛类型

根据所涉及的环境介质的不同^[13, 52],UHI可分为大气城市热岛(Atmospheric Urban Heat Island, AUHI)、地表城市热岛(SUHI)和地下城市热岛(Subsurface Urban Heat Island, SubUHI)(图2)。尽管不同类型的UHI相互关联,但其潜在形成机制和时间动态

往往不同, 如 SUHI 一般在白天最强, 而 AUHI 可能在夜晚更强^[52]。由于不同类型 UHI 存在于不同垂直高度和水平范围, 进而对应不同观测方法, 准确分析和应对 UHI 效应的一个基本前提是区分 UHI 的不同类型。

AUHI 是以大气温度为数据源测得的热岛, 实地观测和数值模拟是其主要研究方法。按城市大气的分层结构, AUHI 又可进一步分为城市冠层 (Urban Canopy Layer, UCL) 热岛和城市边界层 (Urban Boundary Layer, UBL) 热岛^[52] (图2)。其中, UCL 是指城市地表到建筑屋顶之间的空气层, 通常根据连接建筑物屋顶线计算的平均高度来定义。UCL 会受到城市内部形态特征的直接影 响, 适用于研究城区建筑物高度、街区密度等特征对 UHI 效应的影响。因此, UCL 热岛是最常观测到的热岛类型^[53], 相关研究一般在以建筑、街道为单元的微观、局地尺度上开展, 所用气象观测数据多来自固定气象站点、安装在路灯或建筑屋顶但达到标准气象高度的传感器以及移动的车载传感器。UBL 是城市冠层之上、行星边界层下层且受城市下垫面影响的大气层, 其高度从屋顶一直向上延伸几公里, 主要用于解释以单个城市为单元的中尺度或以区域多个城市为单元的宏观尺度 UHI^[54]。UBL 热岛的观测数据一般来自更专业的观测平台, 如高塔、无线电探空仪等固定设备或系留气球、飞机装载仪器等移动设备^[43]。总体而言, UCL 和 UBL 之间有很强的相互作用, UCL 通过加热、冷却和蒸发的方式影响 UBL, 而 UBL 又从更大的中尺度气象条件来调控 UCL。

相比于 AUHI, 基于热遥感观测的 SUHI 研究起步较晚, 遥感数据于 1972 年才被首次应用于 UHI 研究^[13, 23]。遥感数据实现了从局地到全球的多空间尺度和昼夜、季节、年际等多时间尺度的 SUHI 观测, 弥补了 AUHI 观测站点有限、易忽略空间细节的不足。因此, SUHI 研究数量在过去 30 年间增长迅速^[23]。与 AUHI 不同, SUHI 不具有实际高度范

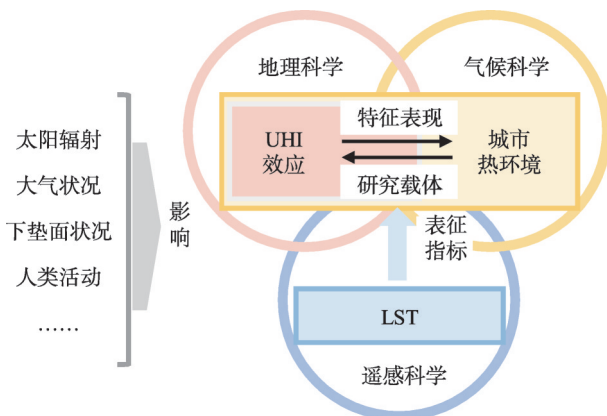


图1 地表温度、城市热环境与城市热岛效应的逻辑关联

Fig. 1 The relationship between land surface temperature, urban thermal environment and urban heat island effect

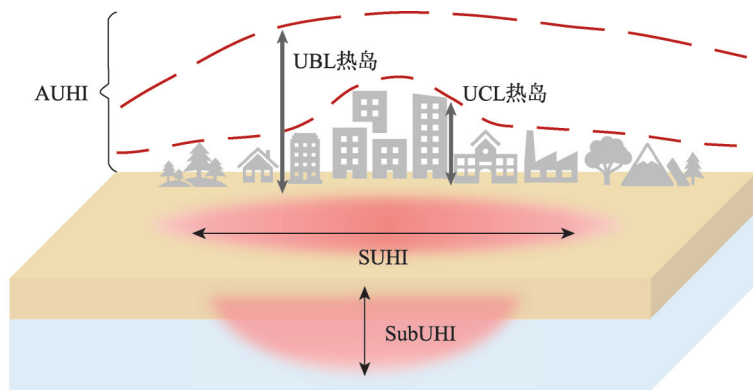


图2 不同类型城市热岛示意

Fig. 2 Illustration of different types of urban heat island

围, 其水平范围则由地表高温区域决定。由于所处海拔高度不同, SUHI 和 AUHI 在观测原理上差异较大, 两者不可直接比较。总体来看, SUHI 和 AUHI 的差异及其峰值时间取决于湿度、空气动力学粗糙度、反照率、发射率等城乡地表特性, 这些因素会随不同城乡背景而变化, 因此很难在 SUHI 和 AUHI 之间建立一个简单、普遍的关联关系, 现有研究多以经验性关系构建为主^[23, 55]。

UHI 效应主要起源于地表附近, 其所产生的城市热通量不仅向上传播到大气中, 也会向下传递到地下^[56]。若对地下温度进行测量, 当靠近居民地或进入到城市, 会发现地下热环境将发生显著改变。这种由于人类活动及其引起的城市土地利用变化导致地下出现的大规模热异常, 被称为地下城市热岛^[57]。地下温度主要由地球内部的热流和地表温度共同驱动, 因此理论上 SubUHI 和 SUHI 有着紧密联系, 但 SubUHI 的热量是通过地下传导的方式产生, 对 SUHI 和 AUHI 有重要影响的对流和辐射可能对 SubUHI 的影响并不显著。相较于 SUHI 与 AUHI, 由于缺乏合适的观测传感器网络提供稳定的测量数据, 目前 SubUHI 研究相对较少^[23]。

此外, 城市群的发展使 UHI 突破了原有的以单一城市为对象的空间范围, 为描述由于城市群的发展而形成的大尺度热岛现象, 区域热岛 (Regional Heat Island, RHI) 这一新概念被提出^[58-59]。城市群是高度发达且聚集的城市空间形态, 通常由一个以上的特大城市为核心, 3 个以上的大城市为构成单元在特定区域内共同组成^[60]。已有研究证明, UHI 效应并不会禁锢于城市的物理边界, 即使是郊区或农村地区也可能受到 UHI 效应的影响^[60]。在城市群地区的城市化过程中, 大城市间距离越来越小, 处于它们之间的农村地区更容易受到城区高温的影响, 且相邻城市间热岛的相互作用可能增大热岛强度^[61-63]。这种情况下, 整个城市群已构成一个紧密相连的热环境。因此, 按单一城市的视角来分析城市群的 UHI 效应已不适用, 可能造成对 UHI 强度的低估。相比于传统的城市热岛研究关注单一城市的局部现象, 由相互连接的多个 UHI 构成的 RHI^[58], 更关注城市群内部城市间 UHI 效应的交互影响, 强调以整体视角来看待城市群产生的 UHI 聚合效应。

3 地表城市热岛效应定量刻画

UHI 效应研究主要基于大气温度和地表温度观测两种途径^[36, 64]。然而, 大气温度观测受到地面气象站数量有限且分布不均的限制, 难以捕捉 UHI 的空间变异性^[36], 适用于研究局部指标对 UHI 效应的影响^[65]。相比之下, 基于热遥感观测的 LST 能够提供详细而全面的 UHI 空间格局, 是 UHI 效应定量刻画研究的主要组成^[29, 43, 66-67]。因此, 本文以 SUHI 为关注对象, 系统梳理 SUHI 范围识别方法与强度表征指标。

3.1 热岛范围识别: 影响规模认知

SUHI 产生于城区, 但其影响范围并不局限于城区的物理边界, 识别 SUHI 实际影响范围是 SUHI 效应研究中一个重要而基础的问题^[62]。SUHI 范围识别不仅是测度其面积规模、反映其影响大小、认知其空间形态的基础, 而且有利于准确计算 SUHI 强度, 也便于为 SUHI 效应缓解措施提供空间落位依据。SUHI 范围和 SUHI 强度都是定量刻画 SUHI 效应的重要参数, 但现有研究中前者受到的关注远远少于后者^[68], 以致较多研究中 SUHI 只是一个抽象概念, 而未能呈现出实际 SUHI 的空间覆盖范围, 忽视了 SUHI 作为“岛”或“群岛”的空间形态特征^[61, 69]。SUHI 范围识别方法的不统一, 必然会影响 SUHI 效应研究结果间的可比性。此外, 缺乏对 SUHI 范围识别方法的重视, 会削弱对 SUHI 效应影响面积规模、空间形态特征及其对城市发展模式响应方式的深入认知^[70]。现有 SUHI 范围识别

研究多以影响规模认知为导向, 识别思路大致有两种: 一种是在界定城乡范围的基础上, 提取一定温度差作为 SUHI 范围的识别阈值, 该思路下的 SUHI 范围识别方法称为城乡温度阈值法; 另一种思路是无需提前区分城乡范围, 直接以温度分布特征为基础提取 SUHI 范围, 该思路下的方法包括温度等级阈值法、高斯拟合参数法和温度衰减突变法 (图3)。

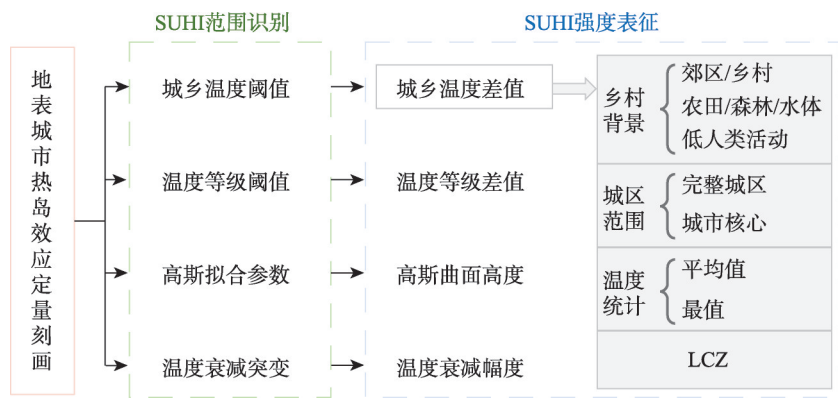


图3 地表城市热岛范围识别方法与强度表征指标

Fig. 3 Range identification methods and intensity indicators of surface urban heat island

城乡温度阈值法是使用最为普遍的热岛范围识别方法。该方法依据SUHI的定义, 将城区温度与乡村温度作差, 提取差值大于一定阈值的区域识别为SUHI影响范围^[58]。例如, Chen等在长三角城市群中选取与市区海拔高度差低于50 m、夜间灯光小于等于15、NDVI大于0.7的所有农田像元, 并认为这些像元是受周围城市干扰最小的像元, 将这些像元的LST平均值作为乡村背景温度值, 高于该背景值2℃的区域均认为属于热岛范围^[59]。总体而言, 城乡温度阈值法简单快捷、便于理解, 但存在两个缺点。一是该方法依赖于城乡二分法; 在城市扩张迅速的时代, 难以准确界定城乡边界, 从而不易找到代表乡村的背景温度值; 即使采用选取乡村代表性像元的方式替代对整个乡村范围的识别, 也存在代表性像元对应土地覆盖类型难以抉择的问题。二是该方法的阈值设定较为主观; 对于不同城市或同一城市不同年份, 提取阈值是否应当有所差异, 如何确保不同阈值下识别的SUHI具有可比性, 仍需慎重考量。

相比于城乡温度阈值, 温度等级阈值法的优势在于摆脱了城乡用地区分的难题, 该方法根据研究区温度的不同等级来识别高温区域, 进而将达到一定阈值的高温区域定义为SUHI影响范围。最常见的等级划分是通过绝对温度或相对温度进行等分, 也有研究结合用地类型占比对温度的等级区间进行调整^[71]。不过, 等级区间间隔和SUHI判定阈值的设定都存在一定主观性。张伟等为避免这一主观性, 基于地表温度的空间统计特征, 通过热点分析识别高温空间聚集区和低温空间聚集区, 并将其分别判定为研究区的热岛和冷岛^[62]。该方法的确较为客观, 但识别的SUHI可能过于破碎, 且未能考虑土地覆被类型和地形条件等因素的影响。Zhang等则以研究区LST的标准差为等级区间间隔, 以均值加减若干倍标准差的方法将研究区LST划分为11个等级, 并考虑统计稳健性, 将LST高于均值加一倍标准差的区域识别为热岛范围, 低于均值减一倍标准差的区域识别为冷岛范围^[72]。该方法也减少了等级划分和阈值选取的主观性, 但对于城乡温差两极分化大的区域, 基于标准差的统计方法可能会低估热岛、冷岛范围。

2002年 Streutker 提出高斯拟合参数法,其原理是在乡村背景平面上将 SUHI 建模为一个二维高斯曲面,得出曲面的拟合参数以描述 SUHI 的空间特征。具体而言,首先对典型乡村温度数据进行最小二乘平面拟合,获取高斯拟合方程的常数和线性分量;然后,在研究区温度图像中减去乡村拟合平面,通过最小二乘将剩余温度的自然对数拟合为一个高斯曲面;最后,高斯曲面部分在平面上的投影范围即为 SUHI 范围,它近似于一个椭圆,从拟合的高斯方程中可提取出椭圆的长、短半轴参数,以反映 SUHI 的范围特征,也被称为 SUHI 足迹^[73]。Huang 等使用高斯拟合参数法计算了亚洲 8 个特大城市的 SUHI 空间范围,发现 SUHI 空间范围与人口规模高度正相关^[74]。Quan 等进一步在高斯曲面的基础上,将高斯曲面及其对应的椭圆底所构成的高斯体积的几何质心定义为 SUHI 质心,以综合反映 SUHI 的强度和空间范围^[75]。高斯拟合的方法将整个 SUHI 量化为一个连续变化的表面,使 SUHI 的整体空间范围能够被测量,但该方法的缺点在于仅适合单中心城市的 SUHI 拟合,且拟合得到的椭圆只能反映 SUHI 的大致范围,不能界定 SUHI 的准确边界。

温度衰减突变法本质上和温度等级阈值法相似,均根据研究区温度本身的变化特征来划定 SUHI 范围,但温度衰减突变法更强调寻找城市向乡村过渡中温度衰减的突变点,以反映 UHI 的温度显著高于周边区域的特征。Zhou 等以中国 32 个主要城市为研究对象,发现绝大多数城市的温度均呈现出随距城区距离增长而衰减的特征,且在这个衰减过程中存在一个“陡崖”,即城乡之间的温度会出现突变点^[31]。突变点的发现为 UHI 范围的识别奠定了基础。Peng 等以北京核心城区的质心为起点建立多个同心缓冲区,使用分段线性回归的方法寻找温度衰减过程中的突变点,以区分受 SUHI 影响显著和不显著的区域,并以该突变点为阈值,识别 SUHI 的空间范围^[69]。Qiao 等通过曲线变化率的计算从衰减曲线中识别出一个突变点,该点之后温度不再继续下降,而开始保持平稳态势;将该突变点对应的缓冲区平均温度作为乡村背景参考值,凡是温度大于该值的像元均识别为 SUHI 影响范围^[76]。相较而言,温度衰减突变法根据数据特征获取 SUHI 的识别阈值,相对更为客观;但缓冲区面积的设定是否会影响提取的阈值结果还有待探讨;此外,在考虑城市是单中心还是多中心的背景下建立若干等面积缓冲区的过程较为繁琐,可能会限制该方法在涉及多城市的大尺度 SUHI 研究中的适用性。

3.2 热岛强度表征:本质内涵理解

SUHI 强度是定量刻画 SUHI 效应的另一个重要指标。SUHI 强度一直是人们关注的焦点,相关研究最早可追溯到 20 世纪 70 年代,近年来更为活跃,是目前评估 SUHI 效应最常用的指标^[10]。关注 SUHI 强度既是对区域高温热浪潜在风险的认知,也是定量分析 SUHI 效应缓解措施有效性的研究前提。然而,现有研究所采用的 SUHI 强度表征指标并不相同,多样的表征指标给不同研究或不同城市的 SUHI 强度对比带来困难。Schwarz 等比较了 11 个最常用的 SUHI 强度量化指标,尽管这些指标理论上应当量化同一现象,但指标间仅显示出很弱的相关性^[77]。Zhou 等也发现忽略 SUHI 足迹的情况下计算的 SUHI 强度指标可能会造成对 SUHI 强度的低估^[32]。为掌握各指标所衡量的 SUHI 强度的可能差异,有必要理解不同表征指标的本质内涵^[31]。与 SUHI 范围识别方法相对应, SUHI 强度的表征指标也可分为四大类(图 3)。

对应于城乡温度阈值的范围识别方法, UHI 强度最常用、最普遍的表征指标即为城乡温度差值。早在 1973 年, Oke 即将 UHI 强度定义为城市最高温度与乡村背景温度的差值^[78]。但这使得 SUHI 强度的计算也面临和 SUHI 范围识别同样的难题,即如何界定乡村背景。Yao 等以中国 31 个城市为研究对象,对比不同乡村背景的定义方法下 SUHI 强度差异,指出不同界定方法下计算的 SUHI 强度会在季节特征、年际变化和空间分异方面带来

明确影响^[79]。较多研究选取城区外围缓冲区的平均温度作为乡村背景温度,缓冲区以与城区等面积为标准划定^[29, 80-81],或以人为设定宽度划定^[82]。Zhou等指出选取城市周边郊区而不是距离较远的乡村作为参考位置,能减少各城市特定乡村条件带来的不确定性,如地形、用地类型、水体的存在等^[29]。但也有研究认为与城区相邻的缓冲区属于郊区范围,不是真正的乡村地区,因为郊区很可能也在SUHI影响范围之内,使得以郊区为背景温度的方法会低估SUHI强度^[30, 79]。因此,Peng等对城市建立两大缓冲区,一个代表郊区,另一个离城区更远的缓冲区作为选取背景温度的乡村地区^[83];Zhou等在距城区40~45 km远的地方建立缓冲区以供乡村背景温度的计算^[30]。对于所选乡村背景的用地类型在不同研究中也有所差异,乡村地区的农田^[84-85]、森林^[77, 84]、水体^[85]对应的温度分别都被作为背景参考温度。有研究认为乡村地区不仅可能受其所对应城区的影响,还可能受到相邻城市的影响,这种现象在城市群地区更为突出;尤其是对于经济水平较高的城市群而言,其周边的农村地区可能也存在较为集中的人类活动,从而会产生小范围的UHI;因此,低夜间灯光强度和高植被覆盖度被作为背景像元的选取标准,以尽可能排除人类活动的影响^[58-59]。

除了乡村背景选取,城区范围选取和温度统计方式在城乡温度差值这一指标的计算过程中也带来不确定性。在城区范围选取方面,较多研究使用所识别的整个城区范围的温度来计算SUHI强度^[29, 80-81],也有研究仅选取城市核心区的若干像素作为城区温度的代表^[86-87]。在温度统计方式上,温度的平均值和最大值被用于计算平均SUHI强度和最大SUHI强度^[88-89]。此外,与热岛范围识别不同,评估热岛强度无需很多空间细节信息,因此热岛强度研究并不局限于SUHI,也常用于AUHI研究,且AUHI强度评估也多以城乡温度差值为表征指标。计算AUHI强度的基础数据一般是气象站点监测数据,而气象站点所处位置的景观往往难以简单地用“城市”和“乡村”来区分,因为从城市到乡村实则是一个连续、动态的景观变化过程^[12]。Stewart对190项UHI研究进行了方法质量评估,指出3/4的研究未能描述监测站点实地特征^[90]。Ramakreshnan等也指出许多研究所计算的UHI强度是源自模糊分类的站点,严重影响了UHI强度的准确评估^[65]。为解决这一问题,Stewart等开发的LCZ分类系统,根据地表覆盖、地表结构、地表材质和人类活动等方面的差异,将城乡下垫面划分为了17种类型,使UHI强度可表征为两个LCZ间的温差^[12]。尽管LCZ源起于AUHI研究,但目前使用LCZ的SUHI研究也迅速增长^[28]。

温度等级差值是对基于温度等级阈值提取的SUHI的强度表征指标,其计算不完全依赖于城乡温度的区分,而是根据研究区温度的相对大小、等级来计算。例如,Ramakreshnan等使用研究区最高温度与平均温度的差值表征SUHI强度^[88];Xu等将研究区温度划分为5个等级,计算各温度等级与郊区平均温度的差值,并乘以各温度等级面积占比,作为面积加权的SUHI强度^[91]。用于拟合SUHI的高斯曲面的高度也被用于表征SUHI强度^[73-75, 92],该高度代表曲面最高点到乡村背景平面的距离,本质上也是最高温度与乡村平均温度的差值。在使用温度衰减突变方法识别SUHI范围的过程中,所找到的突变点对应温度不仅是SUHI范围的提取阈值,也是计算SUHI强度的背景参考值,衰减曲线的最大值与该背景值的差值被用于反映最大SUHI强度^[76],其本质是温度衰减的幅度。

4 地表城市热岛效应定量刻画研究展望

本文辨析了UHI效应及其相关易混淆概念,从范围识别和强度表征两个方面梳理了SUHI效应的定量刻画方法,分析了各方法的优点和缺点。定量刻画作为SUHI效应研究的重要基础,未来研究应进一步整合多源SUHI监测途径、发展大尺度SUHI定量刻画方

法、认知趋于连通化的 SUHI 空间形态,拓展 SUHI 效应定量刻画研究的维度、广度和深度(图4)。

4.1 整合维度:突破单一 SUHI 监测途径

实地观测、数值模拟、遥感反演共同构成 UHI 效应的多源监测途径,但各途径均存在一定局限性。具体而言,实地观测数据可信度高,但有限的观测站点使其无法捕捉精细的空间信息,难以全面描述城市地域的热环境特征。数值模拟方法可高效获得高空间分辨率结果,且能反映 UHI 环流的动力学特征,但模型模拟一般基于一系列理想假设条件,可能会忽略实际应用中的复杂场景,不能完全替代现实的观测过程。遥感反演数据覆盖范围广,但由于城市内部密集立体建筑的遮挡^[93],部分城市表面无法被卫星传感器探测,且云层覆盖^[36]以及当前 LST 遥感数据的时空权衡^[94]也构成了监测限制。因此,实地观测数据、数值模拟结果、遥感反演图像都只提供了对实际 UHI 效应的片面描述^[13]。遥感数据的易获取性使 SUHI 效应研究越发受青睐,而实地观测与数值模拟依然主要应用于 AUHI 研究,造成 SUHI 研究对另两种监测途径以及对多源监测途径整合研究的关注相对不足,使源于不同监测途径的研究结果间形成无形壁垒。突破这一壁垒,整合多维度监测途径,集成多源数据,既有利于提高 SUHI 效应监测数据精度,也便于获取更多互补性数据信息以实现研究的进一步完善与深化(图5)。

具体而言,近年来 SUHI 效应量化研究对遥感技术的需求不断增加,但实地观测作为研究基础同样重要,遥感反演结果和数值模拟结果都依赖于实地观测数据验证其结果有效性,且实地观测还为数值模拟提供模型输入参数^[88, 95]。同时,实地观测与数值模拟或遥感反演整合,既能呈现 SUHI 效应大范围的空间特征,也能更可靠地解析重点区域精细尺度的细节变化。遥感反演结果和实地观测数据也有助于参数化、改进和评估数值模拟结果,而数值模拟具有为遥感反演结果提供热力学机理解释的潜力。如, Zhao 等将 MODIS 遥感数据结合气候模型 CESM (Community Earth System Model) 模拟结果,计算 SUHI 强度的同时进行地表能量平衡分析,实现对 SUHI 效应的热力学定量归因^[87]; Li 等通过耦合的城市冠层模型 UCM 和土地模型 LM3 (Land Model),分析了不同归因方法下 SUHI 效应主导因素的差异^[96]。数值模拟与遥感反演相

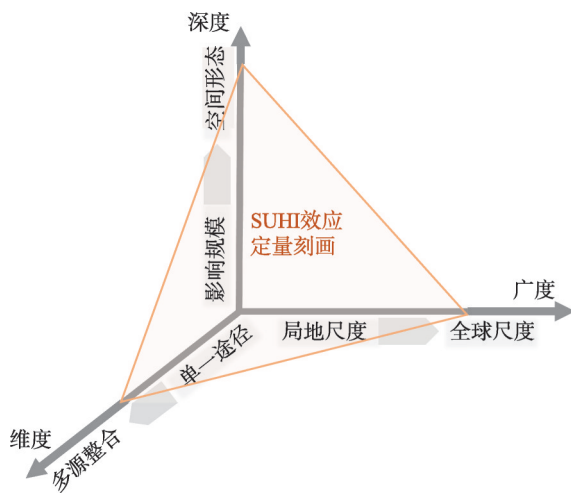


图4 地表城市热岛效应定量刻画未来研究方向

Fig. 4 Research prospects of the quantitative characterization of surface urban heat island effect

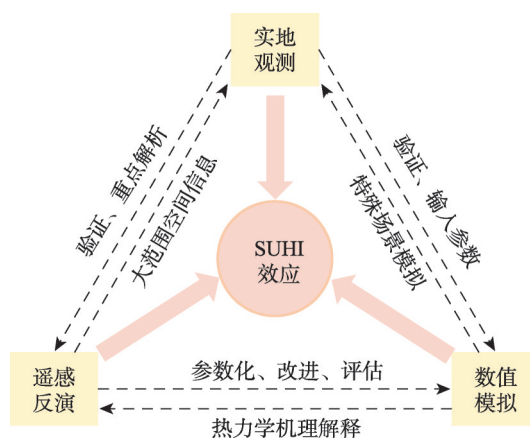


图5 地表城市热岛效应多源监测途径整合

Fig. 5 Integration of multi-source monitoring methods for surface urban heat island effect

结合的热力学过程解析正在成为SUHI效应研究的新趋势^[97-98], 因此两种监测途径的整合在SUHI效应定量刻画中将越发普遍。

4.2 拓宽广度: 发展大尺度SUHI定量刻画

SUHI效应存在于多个尺度, 但现有研究对不同尺度的关注并不均衡。Zhou等通过文献计量发现局地尺度UHI效应受到的关注最多, 相比之下区域和全球尺度UHI效应的相关研究较少^[23]; Yu等也指出大多数研究都集中在单个城市或大城市内的局地尺度上, 对大尺度UHI效应的时空模式和特征知之甚少^[58]。一些关于大尺度UHI效应的关键问题仍未解决, 例如, 局地、区域、全球尺度UHI效应的主导因素有何差异^[23]? 全球气候变化与不同城市UHI效应之间是否具有协同效应, 潜在协同效应的驱动机制是什么^[10]? UHI效应在大尺度上的分异规律尚未厘清, 不利于相同缓解策略在不同城市背景下的有效外推。鉴于遥感数据广泛的空间覆盖范围, 在3种UHI类型中, SUHI无疑最适于开展大尺度分析。

探究SUHI大尺度分异规律的关键基础是准确的定量刻画方法, 以控制方法学上的系统误差, 关注内部因素带来的分异规律。城乡温度差值作为SUHI强度的核心表征指标, 是目前在大尺度SUHI效应研究中使用最多的定量刻画方法。已有大尺度研究多基于建立缓冲区的方式提取乡村或郊区温度, 但缓冲区位置的选择和宽度的设置应当根据城市环境特征确定。首先, 缓冲区不应离城市核心建成区过近, 以避免处于SUHI效应实际影响范围; 其次, 缓冲区若离城市核心建成区过远, 气象条件的差异、邻近大型水体与否等环境条件也会给SUHI效应定量刻画结果带来干扰^[34]; 此外, 缓冲区内还需考虑地形条件、土地覆被类型等因素的影响; 同时, 城市群的发展所带来的相邻城市的影响则进一步增加了环境复杂性。因此, 在大尺度SUHI效应的定量刻画中, 很难确定一个对大尺度下所有城市都合理的固定缓冲区位置和宽度。不同缓冲区范围给SUHI效应量化带来的不可比性和不确定性已被频频指出^[36, 99], 而将固定缓冲区简单应用于具有不同地理和社会经济特征的城市也被认为有失公允^[100-101], 两者的权衡对发展合理的大尺度SUHI定量刻画方法提出迫切需求。未来研究中, 探索如何在综合考虑城市SUHI实际影响范围、城乡气象差异、地形差异等环境特征条件的情况下优选缓冲区位置和宽度, 并开发根据城市环境特征自动确立缓冲区位置和宽度的新算法, 是完善大尺度SUHI定量刻画方法的重要途径。

4.3 挖掘深度: 认知连通化SUHI空间形态

SUHI的强度和范围作为定量刻画SUHI效应的两个主要因素, 范围特征受到的关注远不及强度特征; 而现有的SUHI范围识别研究, 也多以认知SUHI影响规模为导向, 使用SUHI面积来衡量SUHI影响规模, 缺乏对SUHI空间形态的定量识别, 忽视SUHI空间形态变化及其可能带来的影响。已有研究发现SUHI强度会被城市要素(如不透水面)的空间连续性所放大, 即城市要素发展的空间连通性是影响SUHI效应大小的关键因素^[102], 但该研究未能直接对SUHI的形态特征进行量化, 也未能直接关注SUHI的空间连通性。也有研究将SUHI视为一种热力景观, 一系列景观指标被用来表征SUHI的空间属性, 但多个SUHI间的连通性等空间特征往往被忽视^[69, 103]。

城市扩张过程中SUHI的空间形态必然会发生变化^[70], 尤其是在城市群地区, 城市间联系日益紧密, 相邻城市的SUHI会随之连通化^[63]。SUHI在空间形态上的连通会影响热量流动路径的改变, 空间连通的SUHI之间, 热量流动会更为容易。因此, SUHI空间连通性增强, 会扩大SUHI影响范围; 在SUHI强度方面, 对原本较大的SUHI而言可能会疏散热压力, 但对原本小型SUHI而言会增强SUHI强度。总之, SUHI的空间连通性是

影响区域内部温度空间分布规律、区域平均温度变化的重要因素。基于SUHI的连通化空间特征,寻找缓解SUHI效应的关键节点,是应对城市化增强SUHI效应的有效策略^[104-105]。未来研究应重视SUHI范围识别,关注SUHI空间形态的定量刻画;从过去关注局地SUHI强度的斑块视角向关注区域SUHI群岛的景观视角转换,强调SUHI群岛空间演化过程中连通性变化,挖掘SUHI间的交互影响。此外,通过数值建模方法模拟SUHI连通性变化所引起的热量流动、扩散、聚集过程,为深入解析连通化SUHI空间形态对SUHI强度的影响提供了可行途径,进而为城市SUHI效应的监测、预测与防范提供科学依据。

5 结论

理解SUHI效应定量刻画的主要方法与核心指标是准确、深入研究SUHI效应的前提条件。SUHI效应越发多样的研究需求,促使多种SUHI定量刻画方法在应用型研究中被提出,有必要开展综述研究对其系统梳理。已有综述指出了基础数据与采集方法给SUHI量化结果带来的不确定性,但对SUHI范围识别和强度表征方法关注不足。本文在梳理UHI效应概念内涵的基础上,总结SUHI范围识别方法的优缺点,认知强度表征指标的本质内涵,并指出定量刻画研究的维度、广度和深度三维发展方向。本文致力于弥补SUHI效应综述研究中对定量刻画方法缺乏系统梳理的不足,有助于未来在热岛效应的适应与缓解研究中选择更为合适的量化方法。但需要指出的是,SUHI概念本身是一个不断演化的过程,随着气候、地理、遥感科学的快速发展,SUHI从最初的城乡观测温度的简单差值,发展为具有时空属性的复杂抽象对象,既存在昼夜循环、季节演替等时间序列演变,又含有形态范围、内部异质性等空间位置特征;同时,SUHI效应研究主题也在不断丰富,从理解和量化SUHI向寻找驱动归因和缓解措施扩展,近年来更转向关注公共健康影响;在这一背景下,对SUHI的理解和定义随之不断更新和发展,需要综合考虑时空属性、更新概念内涵、紧跟目标需求,探讨SUHI效应的精细刻画。

参考文献(References)

- [1] United Nations Department of Economic Social Affairs. World urbanization prospects 2018: Highlights. New York: United Nations, 2019.
- [2] United Nations. Goal 11: Make cities inclusive, safe, resilient and sustainable. Sustainable Development Goals. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>.
- [3] Cai D L, Fraedrich K, Guan Y N, et al. Urbanization and the thermal environment of Chinese and US-American cities. *Science of the Total Environment*, 2017, 589: 200-211.
- [4] Wang C H, Wang Z H. Projecting population growth as a dynamic measure of regional urban warming. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 32: 357-365.
- [5] Leal Filho W, Echevarria Icaza L, Emanche V O, et al. An evidence-based review of impacts, strategies and tools to mitigate urban heat islands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(12): 1600. DOI: 10.3390/ijerph14121600.
- [6] Pisello A L, Saliari M, Vasilakopoulou K, et al. Facing the urban overheating: Recent developments. Mitigation potential and sensitivity of the main technologies. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2018, 7 (4): e294. DOI: 10.1002/wene.294.
- [7] Chow W T, Brennan D, Brazel A J. Urban heat island research in Phoenix, Arizona: Theoretical contributions and policy applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(4): 517-530.
- [8] Oke T R, Johnson G T, Steyn D G, et al. Simulation of surface urban heat islands under "ideal" conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 1991, 56(4): 339-358.
- [9] Xiao Rongbo, Ouyang Zhiyun, Li Weifeng, et al. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2055-2060. [肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 城市热岛的生态环境效应. *生态学*

- 报, 2005, 25(8): 2055-2060.]
- [10] Kim S W, Brown R D. Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146389. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146389.
- [11] Mills D, Schwartz J, Lee M, et al. Climate change impacts on extreme temperature mortality in select metropolitan areas in the United States. *Climatic Change*, 2015, 131(1): 83-95.
- [12] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [13] Wu Z F, Ren Y. A bibliometric review of past trends and future prospects in urban heat island research from 1990 to 2017. *Environmental Reviews*, 2019, 27(2): 241-251.
- [14] Shou Yixuan, Zhang Dalin. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(3): 338-353. [寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望. *气象学报*, 2012, 70(3): 338-353.]
- [15] Bai Yang, Wang Xiaoyun, Jiang Haimei, et al. Progress of urban heat island effect. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, 29(2): 101-106. [白杨, 王晓云, 姜海梅, 等. 城市热岛效应研究进展. *气象与环境学报*, 2013, 29(2): 101-106.]
- [16] Huo F, Xu L, Li Y P, et al. Using big data analytics to synthesize research domains and identify emerging fields in urban climatology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2021, 12(1): e688. DOI: 10.1002/wcc.688.
- [17] Mohajerani A, Bakaric J, Jeffrey-Bailey T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 2017, 197: 522-538.
- [18] Rahman M A, Stratopoulos L M F, Moser-Reischl A, et al. Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis. *Building and Environment*, 2020, 170: 106606. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106606.
- [19] Deilami K, Kamruzzaman M, Liu Y. Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 67: 30-42.
- [20] Liu Yanxu, Peng Jian, Wang Yanglin. Relationship between urban heat island and landscape patterns: From city size and landscape composition to spatial configuration. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 7769-7780. [刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模、景观组分到空间构型. *生态学报*, 2017, 37(23): 7769-7780.]
- [21] Rasul A, Balzter H, Smith C, et al. A review on remote sensing of urban heat and cool islands. *Land*, 2017, 6(2): 38. DOI: 10.3390/land6020038.
- [22] Kotharkar R, Ramesh A, Bagade A. Urban heat island studies in South Asia: A critical review. *Urban Climate*, 2018, 24: 1011-1026.
- [23] Zhou D, Xiao J, Bonafoni S, et al. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 2019, 11(1): 48. DOI: 10.3390/rs11010048.
- [24] Heaviside C, MacIntyre H, Vardoulakis S. The urban heat island: Implications for health in a changing environment. *Current Environmental Health Reports*, 2017, 4(3): 296-305.
- [25] Li X M, Zhou Y Y, Yu S, et al. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, 2019, 174: 407-419.
- [26] Giridharan R, Emmanuel R. The impact of urban compactness, comfort strategies and energy consumption on tropical urban heat island intensity: A review. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 40: 677-687.
- [27] Kim S W, Brown R D. Urban heat island (UHI) variations within a city boundary: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 148: 111256. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111256.
- [28] Jiang Sida, Zhan Wenfeng, Yang Jun, et al. Urban heat island studies based on local climate zones: A systematic overview. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(9): 1860-1878. [江斯达, 占文凤, 杨俊, 等. 局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展. *地理学报*, 2020, 75(9): 1860-1878.]
- [29] Zhou D C, Zhao S Q, Liu S G, et al. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 51-61.
- [30] Zhou D C, Zhang L X, Li D, et al. Climate-vegetation control on the diurnal and seasonal variations of surface urban heat islands in China. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(7): 074009. DOI: 10.1088/1748-9326/11/7/074009.
- [31] Zhou D C, Zhao S Q, Zhang L, et al. The footprint of urban heat island effect in China. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 11160. DOI: 10.1038/srep11160.
- [32] Zhou D C, Bonafoni S, Zhang L X, et al. Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban

- agglomeration area in East China. *Science of the Total Environment*, 2018, 628/289: 415-429.
- [33] Li H D, Zhou Y Y, Li X M, et al. A new method to quantify surface urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 262-272.
- [34] Chakraborty T, Lee X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 74: 269-280.
- [35] Si M L, Li Z L, Nerry F, et al. Spatiotemporal pattern and long-term trend of global surface urban heat islands characterized by dynamic urban-extent method and MODIS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 183: 321-335.
- [36] Li K N, Chen Y H, Gao S J. Uncertainty of city-based urban heat island intensity across 1112 global cities: Background reference and cloud coverage. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 271: 112898. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112898.
- [37] Balchin W G V, Pye N. A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1947, 73(317/318): 297-323.
- [38] Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1958, 84(359): 70-72.
- [39] Qian Y, Chakraborty T C, Li J F, et al. Urbanization impact on regional climate and extreme weather: Current understanding, uncertainties, and future research directions. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(6): 819-860.
- [40] Oke T. Towards a more rational understanding of the urban heat island. *McGill Climate Bulletin*, 1969, 3(1): 1-20.
- [41] Rao P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1972, 53(7): 647-648.
- [42] NASA. Land surface temperature. https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTD_M.
- [43] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 370-384.
- [44] Li Z L, Tang B H, Wu H, et al. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131: 14-37.
- [45] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, 577: 349-359.
- [46] Buyantuyev A, Wu J G. Urban heat islands and landscape heterogeneity: Linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecology*, 2010, 25(1): 17-33.
- [47] Sun Tiegang, Xiao Rongbo, Cai Yunnan, et al. Research progress and development trend of quantitative assessment techniques for urban thermal environment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8): 2717-2728. [孙铁钢, 肖荣波, 蔡云楠, 等. 城市热环境定量评价技术研究进展及发展趋势. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2717-2728.]
- [48] Lai D Y, Liu W Y, Gan T T, et al. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 337-353.
- [49] Yao Yuan, Chen Xi, Qian Jing. Research progress on the thermal environment of the urban surfaces. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1134-1147. [姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展. *生态学报*, 2018, 38(3): 1134-1147.]
- [50] Peng J, Xie P, Liu Y X, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [51] Liu Xiaotu, Chen Enshui, Yu Demin, et al. Thermal environment of urban area and the improvement of its micro-thermal environment. *Environmental Science*, 1997, 18(1): 54-59. [柳孝图, 陈恩水, 余德敏, 等. 城市热环境及其微热环境的改善. *环境科学*, 1997, 18(1): 54-59.]
- [52] Oke T R. The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects//Jack E C, Alan G D, Erich J P, et al. *Wind Climate in Cities*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995: 81-107.
- [53] Leal Filho W, Wolf F, Castro-Díaz R, et al. Addressing the urban heat islands effect: A cross-country assessment of the role of green infrastructure. *Sustainability*, 2021, 13(2): 753. DOI: 10.3390/su13020753.
- [54] Collier C G. The impact of urban areas on weather. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2006, 132(614): 1-25.
- [55] Pichierri M, Bonafoni S, Biondi R. Satellite air temperature estimation for monitoring the canopy layer heat island of Milan. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127: 130-138.
- [56] Ferguson G, Woodbury A D. Urban heat island in the subsurface. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23): L23713. DOI: 10.1029/2007GL032324.
- [57] Bayer P, Attard G, Blum P, et al. The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 106: 17-30.

- [58] Yu Z W, Yao Y W, Yang G Y, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995-2015) of Southern China. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 242-254.
- [59] Chen S Z, Yu Z W, Liu M, et al. Trends of the contributions of biophysical (climate) and socioeconomic elements to regional heat islands. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 12696. DOI: 10.1038/s41598-021-92271-3.
- [60] Fang C L, Zhou C H, Gu C L, et al. A proposal for the theoretical analysis of the interactive coupled effects between urbanization and the eco-environment in mega-urban agglomerations. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(12): 1431-1449.
- [61] Ziter C D, Pedersen E J, Kucharik C J, et al. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *PNAS*, 2019, 116(15): 7575-7580.
- [62] Zhang Wei, Jiang Jingang, Zhu Yubi. Spatial-temporal evolution of urban thermal environment based on spatial statistical features. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1840-1846. [张伟, 蒋锦刚, 朱玉碧. 基于空间统计特征的城市热环境时空演化. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1840-1846.]
- [63] Xie Zhiqing, Du Yin, Zeng Yan, et al. Impact of urbanization on regional temperature change in the Yangtze River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(7): 717-727. [谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响. *地理学报*, 2007, 62(7): 717-727.]
- [64] Manoli G, Faticchi S, Bou-Zeid E, et al. Seasonal hysteresis of surface urban heat islands. *PNAS*, 2020, 117(13): 7082-7089.
- [65] Li X M, Zhou Y, Asrar G R, et al. The surface urban heat island response to urban expansion: A panel analysis for the conterminous United States. *Science of the Total Environment*, 2017, 605: 426-435.
- [66] Cao C, Lee H, Liu S D, et al. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12509. DOI: 10.1038/ncomms12509.
- [67] Hu Y H, Hou M T, Jia G S, et al. Comparison of surface and canopy urban heat islands within megacities of eastern China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 156: 160-168.
- [68] Chen Y J, Yu S X. Impacts of urban landscape patterns on urban thermal variations in Guangzhou, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 65-71.
- [69] Peng J, Hu Y X, Dong J Q, et al. Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: A radius approach. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136792. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136792.
- [70] Liu Yonghong, Xu Yongming, Zhang Fangmin, et al. Influence of Beijing spatial morphology on the distribution of urban heat island. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1662-1679. [刘勇洪, 徐永明, 张方敏, 等. 北京城市空间形态对热岛分布影响研究. *地理学报*, 2021, 76(7): 1662-1679.]
- [71] Shen H F, Huang L W, Zhang L P, 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. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 172: 109-125.
- [72] 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. *Sensors*, 2008, 8(11): 7453-7468.
- [73] Streutker D R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(3): 282-289.
- [74] Tran H, Uchihama D, Ochi S, et al. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006, 8(1): 34-48.
- [75] Quan J L, Chen Y H, Zhan W F, et al. Multi-temporal trajectory of the urban heat island centroid in Beijing, China based on a Gaussian volume model. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 33-46.
- [76] Qiao Z, Wu C, Zhao D Q, et al. Determining the boundary and probability of surface urban heat island footprint based on a logistic model. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1368. DOI: 10.3390/rs11111368.
- [77] Schwarz N, Lautenbach S, Seppelt R. Exploring indicators for quantifying surface urban heat islands of European cities with MODIS land surface temperatures. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3175-3186.
- [78] Yu Z W, Yang G Y, Zuo S D, et al. Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 49: 126630. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126630.
- [79] Yao R, Wang L C, Huang X, et al. The influence of different data and method on estimating the surface urban heat island intensity. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 45-55.
- [80] Li X M, Zhou W Q. Spatial patterns and driving factors of surface urban heat island intensity: A comparative study for two agriculture-dominated regions in China and the USA. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 48: 101518. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101518.
- [81] Peng S, Piao S, Ciais P, et al. Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science &*

- Technology, 2012, 46(2): 696-703.
- [82] Manoli G, Fatichi S, Schl pfer M, et al. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 2019, 573(7772): 55-60.
- [83] Peng J, Ma J, Liu Q Y, et al. Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China: An urban-rural contrast perspective. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 487-497.
- [84] Jin M L, Dickinson R E, Zhang D. The footprint of urban areas on global climate as characterized by MODIS. *Journal of Climate*, 2005, 18(10): 1551-1565.
- [85] Haashemi S, Weng Q H, Darvishi A, et al. Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 352. DOI: 10.3390/rs8040352.
- [86] Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E, et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3): 504-513.
- [87] Zhao L, Lee X H, Smith R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 2014, 511(7508): 216-219.
- [88] Ramakreshnan L, Aghamohammadi N, Fong C S, et al. A critical review of urban heat island phenomenon in the context of greater Kuala Lumpur, Malaysia. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 39: 99-113.
- [89] Rizwan A M, Dennis Y C L, Liu C H. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(1): 120-128.
- [90] Stewart I D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 200-217.
- [91] Xu H X, Chen Y H, Dan S M, et al. Dynamical monitoring and evaluation methods to urban heat island effects based on RS & GIS. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 1228-1237.
- [92] Streutker D R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2595-2608.
- [93] Yu K, Chen Y H, Wang D D, et al. Study of the seasonal effect of building shadows on urban land surface temperatures based on remote sensing data. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 497. DOI: 10.3390/rs11050497.
- [94] Xia H P, Chen Y H, Song C H, et al. Analysis of surface urban heat islands based on local climate zones via spatiotemporally enhanced land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 273: 112972. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112972.
- [95] Ampatzidis P, Kershaw T. A review of the impact of blue space on the urban microclimate. *Science of the Total Environment*, 2020, 730: 139068. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139068.
- [96] Li D, Liao W, Rigden A J, et al. Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness? *Science Advances*, 2019, 5(4): eaau4299. DOI: 10.1126/sciadv.aau4299.
- [97] Makvandi M, Li B F, Elsadek M, et al. The interactive impact of building diversity on the thermal balance and microclimate change under the influence of rapid urbanization. *Sustainability*, 2019, 11(6): 1662. DOI: 10.3390/su11061662.
- [98] Wang Y C, Zhang Y, Ding N, et al. Simulating the impact of urban surface evapotranspiration on the urban heat island effect using the modified RS-PM model: A case study of Xuzhou, China. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 578. DOI: 10.3390/rs12030578.
- [99] Clinton N, Gong P. MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 294-304.
- [100] Lai J M, Zhan W F, Huang F, et al. Identification of typical diurnal patterns for clear-sky climatology of surface urban heat islands. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 203-220.
- [101] Li K N, Chen Y H, Wang M J, et al. Spatial-temporal variations of surface urban heat island intensity induced by different definitions of rural extents in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 229-247.
- [102] Debbage N, Shepherd J M. The urban heat island effect and city contiguity. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015, 54: 181-194.
- [103] Wu Jiansheng, He Haishan, Hu Tian. Analysis of factors influencing the "source-sink" landscape contribution of land surface temperature. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 51-65. [吴健生, 何海珊, 胡甜. 地表温度“源—汇”景观贡献度的影响因素分析. *地理学报*, 2022, 77(1): 51-65.]
- [104] Peng J, Cheng X Y, Hu Y X, et al. A landscape connectivity approach to mitigating the urban heat island effect. *Landscape Ecology*, 2022, 37(6): 1707-1719.
- [105] Yu Z W, Zhang J G, Yang G Y. How to build a heat network to alleviate surface heat island effect? *Sustainable Cities and Society*, 2021, 74: 103135. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103135.

Conceptual connotation and quantitative characterization of surface urban heat island effect

JIANG Song¹, PENG Jian¹, DONG Jianquan¹, CHENG Xueyan¹, DAN Yuzhuo²

(1. Ministry of Education Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: Understanding the conceptual connotation related to urban heat island (UHI) effect and clarifying its quantitative characterization methods are important foundations for effective UHI effect research. The global urbanization has made the UHI effect more and more common, which leads to a rapid increase in the number of related studies. In this context, different concepts related to UHI effect have emerged, and particularly, various quantitative characterization methods have been developed for surface urban heat island (SUHI) which has the advantage of spatial heterogeneity characterization. However, there is still a lack of systematic review of quantitative characterization methods of SUHI. Therefore, this study distinguished and analyzed the confusing concepts such as urban heat island, urban heat island effect, surface temperature and urban thermal environment. Then, the typical spatial locations and scale ranges of various UHIs were summarized. In the quantitative characterization of SUHI effect, this study categorized the SUHI range identification methods into four categories: methods based on urban and rural temperature threshold, temperature grade threshold, Gaussian fitting parameter, and temperature attenuation mutation. The current SUHI range identification research focuses on the cognition of the SUHI impact scale. This study also sorted out the SUHI intensity indicators corresponding to various range identification methods. Understanding the essential connotation of each indicator is the prerequisite for grasping the potential differences between the indicators. Future research should integrate multi-source SUHI monitoring methods, develop large-scale SUHI quantitative characterization methods, and cognize connected SUHI spatial morphology.

Keywords: urban heat island; surface urban heat island effect; urban heat island range; urban heat island intensity