

黄群芳. 城市空间形态对城市热岛效应的多尺度影响研究进展 [J]. 地理科学, 2021, 41(10): 1832-1842. [Huang Qunfang. Effects of urban spatial morphology on urban heat island effect from multi-spatial scales perspectives. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(10): 1832-1842.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.10.015

城市空间形态对城市热岛效应的 多尺度影响研究进展

黄群芳

(江苏第二师范学院城市与资源环境学院, 江苏 南京 210013)

摘要: 随着全球城市化的快速发展和气候变暖及极端高温事件的加剧, 城市热岛效应已成为了 21 世纪影响人类生存发展的重要环境问题。因此, 阐明城市热岛强度时空变化特征, 揭示多空间尺度下的形成机制是人文地理学和气候学研究的热点和前沿交叉科学问题。从街道峡谷微观尺度、城市街区局部尺度和城市宏观尺度全面总结和系统梳理了城市空间形态对城市热岛效应的多尺度影响和耦合机制, 提出了未来通过定量表征城市热岛强度、城市空间形态的空间格局、时间演化特征及规律, 构建空间关系分析模型, 进而揭示城市空间形态在不同时空尺度对城市热岛强度的作用机制, 为城市规划、宜居城市建设以及气候变化的响应与适应研究提供理论指导。

关键词: 城市热岛强度; 城市空间形态; 土地利用; 气候变暖; 尺度效应

中图分类号: P463.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2021)10-1832-11

当前, 气候变化正深刻影响人类的福祉和健康。城市地区因热岛效应的存在显著加剧和放大了高温热浪等气候变化的影响^[1-4]。目前, 全球超过 1 100 个城市、中国 98.9% 的城市都观测到了城市热岛现象^[5,6], 热岛强度一般可达 4~5℃, 极端条件可以高达 10℃ 以上^[7]。热岛增温对高纬度地区城市冬季增温和降低供暖能耗具有积极的意义, 然而对大部分中低纬度地区的城市来说, 热岛增温会带来一系列负面影响^[7], 包括加剧夏季高温热浪程度^[8], 促进流行病和传染病爆发、增加热死亡病例^[1], 增加夏季制冷能耗和温室气体排放^[9], 增加水资源损耗^[10], 加剧空气污染和降低城市宜居度^[4], 不利于城市生态系统的可持续发展。

随着全球城市化的进一步快速发展, 未来城市热岛效应影响的范围和程度将继续加剧, 城市热岛效应也成为了 21 世纪影响人类生存发展的重要环境问题^[11,12]。因此, 在全球变暖和极端高温增加的背景下, 使用科学有效的方法改善当前的城市气候条件, 保障未来城市生态系统的可持续

性具有重要的意义。为此, 阐明城市热岛效应的时空变化特征, 揭示其形成机制并提出适应性对策成为了气候变化和城市化研究的核心和热点问题^[2-4]。

研究表明, 城市热岛效应受气象条件、城市空间形态、下垫面特征和人为热排放等共同影响^[13,14]。以往研究较多关注气象条件和城市下垫面特征, 实际上城市空间形态对热岛效应的形成和发展起至关重要作用^[15-17]。城市空间形态指城市各要素在空间平面上和垂直高度方向的相互关系和组织特征, 主要由建筑布局、建筑高度和建筑密度等引起的空间异质性来体现。建筑物通过改变城市白天吸收和储备的太阳辐射量, 减少夜间长波辐射损失, 改变城市冠层的风廓线、降低风速、减少平流和湍流散热量而改变城市热环境^[13]。因此, 在全球变暖和城市化加速发展的背景下, 阐明城市空间形态对城市热岛效应的影响规律, 揭示其作用机理, 不但对加深城市热岛效应和全球气候变化的科学认识具有重要的理论意义, 还对通过优化

收稿日期: 2020-12-13; **修订日期:** 2021-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901198)、江苏第二师范学院引进人才科研启动项目(924803)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41901198), Talent Start Project of Jiangsu Second Normal University (924803).]

作者简介: 黄群芳(1979-), 女, 湖南益阳人, 讲师, 主要从事城市热岛效应与城市宜居研究。E-mail: flyingfangzi@163.com

城市空间形态来缓解城市热岛效应具有重要的实践价值。本文旨在系统总结和梳理城市空间形态对城市热岛效应多尺度影响方面的研究进展,提出未来深化研究的方向。

1 国内外主要研究进展

1.1 热岛效应对城市空间形态响应的尺度效应

城市热岛效应是一种多成因和多尺度现象,空间尺度是城市热岛效应影响因素和形成机制研究的关键^[12,14,18,19]。研究表明,城市空间形态各指标对热岛效应的影响随尺度的变化而变化,不同空间尺度上的建筑高度、密度、绿化覆盖率的热效应不同。如中国香港九龙半岛 100 m 以下尺度的城市热岛强度与前庭面积指数相关性最好^[20];天津市建筑密度对夏季城市热岛强度的影响在半径为 130 m 时最强^[21];重庆市开州区各建筑强度指标对地表热岛效应的影响在 840 m 网格时最大^[22]。需要注意的是,不同空间形态指标对尺度的敏感性不一,北京市西北部小范围内植被、低层建筑、铺装面积对地表温度影响大,而大范围内中高层建筑的影响更大^[23]。

整体而言,城市形态指标对城市热环境和热岛效应的影响在微观和局部尺度较为突出,因此有一些研究提出微观尺度上的城市特征会显著影响城市热环境和热岛效应格局,但随着尺度增加会趋于稳定,甚至对较大尺度气候没有影响^[24,25]。在荷兰的研究发现,天空视域因子(Sky view factor: SVF)和街道建筑可以阻碍街道峡谷高温的出现,但对城市尺度气候没有影响^[26]。较小尺度上地表的不均匀性会使 SVF 和地表温度都出现波动,但在宏观尺度上这些不均匀性都会被平滑,变得无关紧要。在建筑容积率不变的情况下,微观尺度上紧凑型城市结构会导致场地中心区域的天空可视程度较差,从而使微观尺度城市热岛强度增加;但就整个区域而言,其平均可视程度得到优化,进而降低整个区域的城市热岛强度^[27]。

因此,深入探讨不同空间尺度下城市空间形态与热岛效应的耦合关系及机制,明晰关键城市空间形态指标对热岛效应影响的敏感尺度,对不同尺度上的空间规划编制和相关参数调控具有重要意义。城市规划和建设通过调整微观、局部和城市宏观尺度的形态指标,可以有效改善城市当前和未来的气候环境^[28],保障城市生态系统的可持

续发展。学术界对空间形态与城市热岛效应相关关系的研究也经历了一个由微观尺度向局部尺度和城市宏观尺度变化和扩展的过程。

1.2 街道峡谷微观尺度影响过程与机制

街道峡谷是指类似于自然界峡谷、街道两侧都有建筑物的几何空间,具有特定小气候的单元^[29]。街道峡谷对城市辐射平衡、户外热舒适度、建筑能耗存在重要影响^[30],其热环境是整个城市热环境的基础^[31]。因此,Oke 把城市街道峡谷作为研究城市气候的基本空间单位^[32]。为了控制其它因素的影响,城市空间形态与城市热岛效应和热环境响应研究主要集中在微观尺度街道峡谷上。

街道峡谷的三维空间结构特征主要通过峡谷高宽比(Height/Width: H/W)、SVF 和街道朝向来定义。结合实验、场地观测和模型模拟,一些研究对街道峡谷中的热量和气流特性进行了深入探讨^[33-35],结果表明微观尺度的建筑三维结构影响城市峡谷的气流和街道表面获得的太阳辐射量,从而对城市热岛强度和热环境存在重要影响^[36]。

1.2.1 街道峡谷高宽比

H/W 是衡量街道峡谷空间结构特征的一个重要参数。一般认为,H/W 与气温直接相关,其值增加会使夜间热岛效应的强度增加^[33,35];而白天气温和热岛强度随 H/W 的变化则相反。如非洲摩洛哥城市菲斯深浅峡谷的对比研究表明,随着 H/W 的增加,日最高温度降低,日最低温度增加;深峡谷夜间气温高于浅峡谷,但白天相对降温强度超过夜间变暖^[37]。因此,深窄峡谷在极热气候地区降低气温和缓解城市热岛强度具有重要的意义。

然而,越来越多的研究表明,H/W 与城市热岛效应之间并非简单的线性关系。巴西圣保罗市的研究表明,城市热岛强度会随着 H/W 的增加先升后降,当其值为 3.5 时,热岛强度达最大值,然后降低^[38]。荷兰鹿特丹的观测和模型模拟结果都表明,H/W 小于 2 时,夜间热岛强度随 H/W 增加而增加;当 H/W 大于 2 时,夜间热岛强度变化很小,甚至降低^[36]。类似地,城市和乡村峡谷的模拟研究表明 H/W 从 1 增加到 2 时,地表温度会显著升高,H/W 大于 2 时地表温度变化很小^[39]。高 H/W 导致街道峡谷不同方向表面的表面温度差异较小,表面温度也接近空气温度^[40]。

2 种研究结果存在差异的原因在于 H/W 主要通过 2 种相互抵消的过程来影响局部热环境,一

种是建筑白天的阴影效应减少太阳短波辐射的吸收和储存,直接降低局部温度,导致较低的夜间温度;另一种是建筑对长波辐射的截留作用,两者之间会在一定的建筑高度和 H/W 下达到平衡,达到最高的城市热岛强度,然后阴影效应超过长波辐射截留效应,从而降低局部温度^[36]。同时, H/W 的变化也会影响通风条件^[29,41]。模型模拟结果表明深街道峡谷内部风速的变化可带来 5°C 的温差,随着 H/W 的升高,风速先降后升,也会改变局部温度^[42]。热带地区城市达卡的研究发现,深峡谷中较高的风速有助于提高湿热地区的气候舒适度^[43]。而摩洛哥的结果则显示,无论是在冬季还是夏季,深峡谷的风速都比较缓慢和稳定^[37]。注意到建筑的阴影效应和对长波辐射的截留作用在一定的 H/W 值下达到平衡,讨论 H/W 与城市热岛效应和热环境的关系不仅可获得更准确可靠的研究结果,对确定最佳 H/W 值缓解城市热岛效应也具有重要的现实意义。

然而现实生活中城市中的街道两侧建筑高度往往不一致,针对当前多数研究采用平均 H/W 来进行研究的现状,也有一些学者探讨了不对称 H/W 对街道峡谷微气候的影响。马来西亚普特拉贾亚大道(东北-西南方向)6种不对称 H/W 景观对街道小气候的影响结果表明,东北-西南方向街道 $2.0\sim 0.8$ 和 $1.5\sim 0.8$ 的 H/W 组合形成了缓解白天高温的最佳不对称城市峡谷^[44]。此外,不对称和不连续高度建筑对街道峡谷通风条件也会带来影响^[45]。然而,这类研究较为缺乏,还需对更贴近现实环境的不对称和不连续街道进行深入研究,进一步厘清 H/W 对街道峡谷的影响及作用机制,进而为城市规划和建设管理提供技术参数。

1.2.2 天空视域因子

SVF 表示地平面上的某个点可以看到的天空范围与被水平面包围的天空半球的比值,它是一个无量纲参数,范围从 0(完全看不见天空)到 1(可以看到整个天空)变化。SVF 是表征城市空间形态和热平衡的重要参数,也是影响城市热岛形成和发展的重要指标^[24,30,31]。城市地区因为建筑和绿化的影响,SVF 基本都小于 1。城市街道峡谷热环境的研究表明,较低的 SVF 与白天较低的气温(冷岛)和夜间较高的气温(热岛)相关^[30],这主要归因于白天进入低 SVF 街道峡谷的太阳辐射较少,夜间低 SVF 限制街道峡谷的长波辐射损失和湍流

热交换^[46]。瑞典哥德堡进行的研究发现晴朗、无风夜晚的气温与 SVF 之间存在着相当强的关系^[47]。哈尔滨野外观测和模型模拟结果表明,SVF 是影响哈尔滨城市街道峡谷热环境的重要指标, H/W 为 0.5 的 2 个典型街道峡谷,随着 SVF 的减小温度先降后升^[31]。

总的来说,SVF 对街道峡谷热环境影响很大。量化分析发现,SVF 是亚特兰大白天地表热岛形成的三大主要因素之一和影响夜间地表热岛效应的最重要因素^[48],也是除太阳辐射外对哥伦布市地表热岛强度影响最大的因素^[18]。此外,SVF 也是改变峡谷风速的重要因素,上海的研究表明 SVF 增加 10% 将导致人行道与参考点风速比增加 8%^[49]。因此,城市规划中把 SVF 控制在较低水平是有利的,因为较低的 SVF、较高的绿色覆盖率以及较大的建筑高度和密度都可以有效改善气象条件和峡谷热量条件^[50]。

1.2.3 街道方向

街道方向对街道峡谷风速、太阳短波辐射获取量和城市区域的热平衡存在显著影响,因此也是影响城市热岛形成和发展的重要指标^[30,40]。已有研究证明了街道朝向对街道峡谷的气温和热环境存在重要影响^[40]。瑞士日内瓦 1 600 条街道峡谷的研究表明,面向西东北和东东南方向的街道表面接受的太阳辐射最高,面向南西南方向的墙立面获得的太阳辐射更多^[51]。澳大利亚阿德莱德市中心的测量结果证实街道朝向的影响存在日变化,在接近中午的 $2\sim 3\text{ h}$ 内,南北向峡谷平均温度略高于东西向峡谷,而东西向峡谷在清晨和下午稍高于南北向峡谷,这种差异还受天气状况的影响,在晴天或部分多云的日子,两个街道峡谷之间的最大差异约为 1.4°C ,而在阴天条件下约为 0.2°C ^[52]。

通过分析城市密集建成区太阳辐射分布特征可以提出城市首选街道方向。总结来看,东西向街道白天的温度最高^[41],因此东西向峡谷需考虑增加遮阳设备或配置适宜街道树进行遮挡,以提高人行道的热舒适度^[16,40]。此外,对于相同的 H/W ,街道向东北-西南或西北-东南方向的旋转会带来更好的舒适条件,因为在这些情况下墙的阴影效果更有效^[53]。研究还表明,深窄峡谷的街道朝向效应比浅宽峡谷更显著,所以密集、紧实城市区域规划建设中更应处理好街道朝向的问题。根据峡谷方向的不同,建议的 H/W 也有所不同,为增强南

北向峡谷的室外热舒适条件,建议 H/W 在 0.8~2.0 之间^[54]。然而,东西向峡谷的 H/W 必须超过 3,以提供足够的街道水平阴影^[55]。无论是南北向峡谷还是东西向峡谷,较高的 H/W 都会升高温度、降低户外舒适度水平,反之亦然^[56]。

另外,街道朝向也会影响街道峡谷的气流条件。对广州的研究显示,街道朝向与风向平行或正交时风速最小,而与风向呈一定角度时风速最大。因此,城市规划建设中,街道朝向应避免与主导风向正交^[57],其中街道轴线与风向呈 45° 时通风最佳^[58]。然而,也有研究认为,街道朝向对气温没有影响或者影响有限^[40]。因此,街道朝向的影响比较复杂,根据各地区的需求选择最佳街道朝向是比较困难的,还需进一步开展这方面的研究。

1.3 街区局部尺度影响过程与机制

局部尺度的城市空间形态指的是邻里、社区、街区尺度各组成要素间和要素内部各特征的组合关系,邻里、街区配置和布局的不同使之产生了独特的小气候,从而导致了城市内部的气温变化,涉及到的指标有建筑密度、建筑高度、SVF 和建筑布局方式等。

1.3.1 建筑密度

研究表明,建筑密度是影响局部尺度地表温度、气温和城市热岛强度的最重要因素^[17,59]。建筑密度和布局对局部地区热岛效应的形成往往起重要和根本作用,一旦建筑密度确定下来,通过改变建筑形式来调整热岛效应的空间就相对较小^[27]。一般认为,城市热岛强度随着建筑密度增加而增大^[25,60]。意大利佛罗伦萨的建筑密度每增加 10% 会导致热岛强度 $0.30\sim 0.66^\circ\text{C}$ 的增加^[61],北京市五环内不同建筑密度下城市热岛强度的研究也显示了这样的正相关关系^[62]。因此,建筑密度越高,热岛强度也越高。

相反,也有研究认为建筑密度的增加会减缓城市热岛强度,因为高建筑密度会使每个家庭的墙面和外部空间减小,从而提高储能效率,降低能耗和碳排放。香港高层高密度建筑区建筑密度从 30% 增加到 40%,白天热岛强度可降低 0.77°C ^[63]。还有研究认为建筑密度对城市热岛效应的影响复杂,城市热岛强度会随建筑密度数值的变化而变化,南京的模拟研究表明在建筑密度 10%~35% 范围内,白天城市热岛强度随着建筑密度的增加先减小后增大,建筑密度为 25% 时城市热岛强度最

小,夜晚情况则恰好相反^[64]。

天津的研究表明建筑密度对城市热岛强度的增加或者减缓随时间变化,上午建筑密度的增加会对城市热岛强度起削减作用,建筑密度每增加 10%,热岛强度减弱 0.46°C ;而下午建筑密度的增加表现为短时、微小的增强、升温效应^[21]。武汉中心区气温在夜间的空间差异主要是由城市密度等建筑方面指标引起的,而在白天,城市建筑的影响并不显著^[25];而香港高层高密度建筑区建筑密度可解释白天热岛效应 45% 的变化,夜晚建筑密度与热岛效应的相关性不显著,仅解释热岛效应 4.7% 的变化^[63]。

当然,也有研究发现建筑密度对局部尺度城市气温不存在显著影响^[65]。不同地理位置、气候和下垫面特征都会影响建筑密度对地表温度的影响,如何把建筑密度的贡献从其它形态因子的影响中分离出来,如何拓展研究范围得到较统一的结论是当前急需解决的问题。

1.3.2 建筑高度

高层建筑一般会带来高温^[66,67],然而也有学者认为高层建筑通过提供阴影、风廊、节约建筑用地、为绿地腾出空间、减少交通距离从而有利于缓解城市热岛^[15,23,68],高层建筑还会使冷空气从高层向下偏转至行人层而产生局部冷却效果^[13]。此外,高层建筑带来的阴影还会改变其他覆盖特征、地表材料、能量流动和人为热排放等^[15,18,20,68,69],进而影响城市热岛。

一般认为,建筑高度的增加会降低白天的温度和热岛强度,增加夜晚的温度或热岛强度^[48]。然而,南京的模拟研究表明,居住区建筑高度的增加会使白天和夜晚的温度都降低^[64]。北京西北部四环以内市区的研究表明,地表温度与区域内中层建筑正相关,与高层建筑负相关,而不规则高度的建筑组合促进湍流交换,对改善城市热环境有利^[66]。北京市朝阳区 18 个均匀分布的小区城市形态和景观特征指标对居住区开放空间热性能的影响研究表明平均建筑高度对居住区开放空间热环境的影响较小,且在夏、冬季节的影响相反^[70]。因此,建筑高度对城市热环境的影响比较复杂,存在一个最佳建筑高度,在这个高度,风、阴影的降温效果和三维空间降低长波辐射热损失的效果达到平衡;也存在一个最佳的高、中、低建筑组合,使局部和市区热环境达最佳值。

1.3.3 天空视域因子

建筑密度和建筑高度对城市热岛效应和热环境的影响并非独立存在,建筑密度受建筑高度的影响,反过来,建筑密度的大小也会影响建筑高度与热环境的关系^[64],两者之间的复杂影响多通过 SVF 来衡量。香港 3 个小区白天热岛强度的变化比较典型,在高层高密度小区,SVF 降低 1% 使热岛强度分别降低 4% 和 1%,当建筑高度增加 110% 时,SVF 对白天热岛强度的影响将增加 280%;而在高层低密度小区,SVF 降低 1% 使热岛强度增加 3%^[71]。这是因为低密度、高层建筑带来更多开放空间,允许释放到城市区域的热量上升并离开城市冠层,因此能降低局部夜间温度^[59]。

SVF 是一个表征城市空间形态及其环境效应的综合指标,与其它城市形态指标存在显著关系,成为了城市气候和环境研究中应用尤为广泛的一个形态参数,多个尺度的城市形态特征都可通过 SVF 来衡量。在真实的街道峡谷中,SVF 可以直接替代 H/W 来描述周围建筑环境的强度,尤其在非对称的结构中具有准确表达建筑物形态特征的优势;在局部或更大尺度的研究中,通过平均 SVF 值可以刻画大尺度区域中城市形态因素的总体特征和对城市热环境的综合影响^[72]。研究表明,SVF 是影响瑞典哥德堡昼夜气温变化的主要控制因子^[65]。

然而,关于 SVF 与地表温度或热岛强度的关系存在不同的判断,有的研究认为 SVF 与气温或地表温度呈正相关^[15,50],有的研究认为两者呈负相关^[60,73],还有研究认为两者在白天正相关夜间负相关^[46],也有研究认为两者关系不显著^[67]。实际上 SVF 与街道表面温度之间的关系复杂,不能用单一线性关系来描述^[74],如广州中心区 2 km×2 km 范围内地表温度与 SVF 相关关系呈“V”型曲线,即最大和最小的 SVF 产生最高地表温度,而中等 SVF 值产生最低地表温度^[17]。香港的模拟结果反映了城市形态对城市热环境的影响存在季节差异,随着 SVF 的增加,夏季地表平均温度开始快速增长,随后增长率逐渐下降,SVF 大于 0.8 时地表平均温度基本保持不变;冬季地表平均温度随 SVF 增加呈线性增加^[74]。

可见,温度对于 SVF 的响应取决于 SVF 的 2 个方面影响的强弱,一方面高 SVF 值代表更开阔空间从而增强空间环流和风速,另一方面高 SVF

值使地面接受的太阳辐射增加。不同气候、地理位置和地表景观都会影响 SVF 对地表温度的影响,武汉 3 194 个城市街区二维景观和三维建筑形态指标对地表温度影响的研究表明,建筑密度最低的工业区地表温度受建筑形态因子的影响几乎可以忽略不计,公共服务区和商业区地表温度受空间形态因子影响较大,商业区 SVF 与地表温度呈正相关,而控制了地表景观对地表温度的影响后,SVF 与地表温度变为负相关^[75]。广州市中心地表温度和 SVF 的关系研究表明,中等 SVF 值产生最低地表温度,而最大和最小 SVF 值产生最高地表温度^[17]。东京的研究显示,SVF 为 0.5 时,城市吸收的太阳辐射最多;Oke 认为 H/W 为 0.4 时对中纬度城市热环境最合适^[66]。总之,存在适度的建筑密度、高度、SVF 和 H/W 阈值,以供城市规划和建设、管理人员创建更舒适、宜居的城市热环境。

1.3.4 建筑布局方式

建筑布局方式对局部尺度城市热岛效应也存在较大影响^[76]。Yang 等甚至认为建筑布局是影响西安市北部区域城市热环境的最主要因素,对热环境存在全天候的影响,居住区的最佳布局方式是分散式布局^[77]。上海市 3 个住宅小区的城市热岛强度结果表明,东西向长线型建筑白天的热岛强度最大,而星型、半封闭的建筑提供了很好的阴影效应、热岛强度最小,是最佳的布局方式^[15]。荷兰的研究结果显示,庭院类型是最可取的建筑布局方式^[26]。相反,庭院类型不适合热带湿热气候地区,椭圆形建筑最适合温带和副热带气候的城市,八边形建筑最适合热带城市,而 Y 型建筑对所有气候带都不合适^[78]。

除了肯定建筑布局方式对城市热岛效应的影响外,有部分研究还强调建筑布局对城市热环境的影响随时间变化而变化。南京 3 种建筑布局方式模拟结果表明,白天环绕包围式布局热岛强度最低,行列式布局居中,点状布局最高;夜晚环绕包围式布局热岛强度最高,点状布局居中,行列式布局最低;这是因为环绕包围式布局白天太阳辐射不易进入,夜晚热量也不易散发,而行列式布局和点状布局会阻碍气体流动^[64]。需要注意的是,在局部尺度建筑布局方式与其它城市形态指标具有空间积聚性,对城市热环境的影响会相互干扰,从而影响结果的准确性。两项由不同高度建筑住宅为对象的研究案例表明,建筑高度会对建筑布局

的热效应带来影响^[64]。其原理是较高建筑组成的住宅区具有更大的建筑间距和开敞空间,从而导致阴影和通风效率的不同。因此,关于复杂的结构和不同的建筑布局方式可能提供的热环境条件还需要更深入的研究。

1.4 城市宏观尺度影响过程与机制

城市作为一个整体,其形态和结构通过影响城市的净辐射、蓄热量、感热和潜热的变化影响城市气候,因此在减缓城市气候变化中发挥着重要作用。当前,从城市宏观尺度着手来研究城市形态与城市热环境和热岛效应之间的关系已取得了一定进展。宏观尺度上与热岛效应密切相关的指标包括土地利用、城市功能布局、植被覆盖等二维布局和三维城市空间形态。领域内多强调土地利用变化、不透水面积、植被、水体对城市热岛效应的重要影响,特别是遥感技术的快速发展为揭示城市宏观尺度热岛强度与土地利用等城市地表参数间的耦合关系提供了技术支撑^[14,79]。然而,由于基于米及亚米级的高空间分辨率遥感数据提取大范围建筑高度和建筑密度等城市空间形态参数还比较困难,因此从城市宏观尺度综合考虑土地利用变化和城市空间形态对城市热岛效应的驱动机制研究相对较少^[80],很多情况下忽视建筑高度和建筑密度等城市空间形态的作用。

一般认为控制 SVF 等城市空间形态指标可以防止峡谷和局部尺度的高温,对城市尺度气候没有影响^[24]。然而,也有研究认为城市形态不仅对城市微气候,对整个城市的气候都施加影响^[51]。由于 SVF 综合了城市空间的开阔度、H/W、建筑密度等多种形态信息,因此 SVF 是城市尺度空间形态与热岛效应研究中探讨得最多的指标。匈牙利东南部的塞格德市大样本尺度的研究表明,城市热岛强度和 SVF 的面积平均值存在强负相关^[81]。中国香港和武汉主城区的研究则显示白天地表热岛强度与 SVF 正相关^[82,83]。意大利巴里市的研究进一步反映了地表温度与 SVF 关系的日变化特征,即白天正相关,夜间负相关^[84],且使用不同的空间分辨率来进行研究,会影响两者相关关系的强弱^[24]。

也有研究探讨建筑高度、建筑密度等形态因子对气温、地温或热岛效应的影响。中等建筑高度和低密度城市形态的地表温度变化水平最高,而高层和高密度建筑的地表温度变化水平最低^[17]。美国华盛顿-巴尔的摩大都市区的模拟分析则强

调建筑高度对气温变化的显著影响,其中商业建筑高度降低 8 m、住宅建筑高度降低 2.5 m,会使白天温度升高 0.4℃、夜间温度降低 1.2℃^[85]。中国 332 个城市的综合研究表明不论城市建筑的密度如何,其连续性是影响城市热岛效应的关键因素,土地利用类型的多样性和均质性有利于缓解城市热岛效应^[86]。

此外,空间形态对城市热岛效应的影响还取决于城市功能区类型和时间^[87],其中建筑高度对住宅区热岛效应影响最大,公共服务区热环境主要受 SVF 和建筑高度变化的影响,商务区受 SVF、建筑高度和景观构成的综合影响,而工业区主要受景观构成的影响^[75]。泰国曼谷夜间温度和热岛效应相关性最高的指标是容积率和建筑密度,下午到晚上的降温速率受建筑密度的影响最大^[88]。武汉市白天城市热岛效应在高建筑密度地区更明显,夜晚在高层建筑地区更显著^[80]。

归纳起来,当前对城市尺度空间形态与城市热岛效应间耦合关系及机制的认识和理解还非常有限,研究结论也相互矛盾,这说明城市空间形态与城市热岛之间的关系存在争议。因此,宏观尺度上城市空间形态对城市热岛效应的影响还需要进行大量的研究与探讨。

1.5 多尺度耦合分析

已有研究表明,优化城市形态应对世界快速发展的城市化及由此带来的城市热环境挑战已显得愈发重要。《2030 年可持续发展议程》强调了城市形态优化在解决全球可持续性问题上重要性和紧迫性(<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>)。然而城市是一个复杂的系统,城市形态因子受空间相关性的强烈作用,城市热环境具有尺度依赖性^[14,18,19],需要从多种空间尺度来探讨和揭示城市形态指标对城市热环境的影响程度。然而,已有的研究基本都是从多个半径斑块或规则网格来探讨温度、热岛强度与建设强度的相关性^[22,73],缺乏从微观、局部和市区、市域多个尺度全面探讨城市空间形态对城市热环境影响的研究。Unger 认为城市形态指标与城市热环境关系的准确研究应选择一个合适规模和尺度,在此尺度上获得相关指标的平均值,并且使研究对象覆盖整个城市或城市大部分区域进而分析城市形态指标对热环境的综合影响,构建两者之间耦合关系^[89]。这客观上需要从多种空间尺度分析

和探究城市热环境对城市形态指标的响应情况,获取每种城市指标作用的最佳尺度范围和特征,并在此基础上得到多个城市形态指标的相对贡献率。

2 研究展望

上述系统总结和梳理表明,城市空间形态和建筑设计上的修改可以显著改变城市热岛强度和小区气候条件。因此,融入气候响应元素的城市规划和建筑设计是平衡城市热环境的一种经济、高效的软技术。一旦掌握了多空间尺度下城市空间形态与城市热岛强度间的定量关系,就能从系统和全局的视角对不同层次的城市规划和建设布局进行全面思考和合理调控,从而为各层次城市规划、管理、决策服务。然而,当前研究还存以下3方面明显不足:

首先,已有的研究主要集中在微观或局部尺度,城市宏观尺度空间形态与城市热岛效应的量化研究很少,多尺度下城市空间形态与城市热岛效应和热环境耦合机制的研究尤为缺乏。其次,已有研究主要基于中低建筑密度城市的调查研究得出,对高建筑密度城市开展的研究较少。关于建筑高度的研究,多数只区分1~3层低层、4~7(或4~6)层中层和8(或>7)层以上高层建筑,对不同高度高层建筑特别是200 m以上或300 m以上高层建筑的研究较少。在高层和超高层建筑在城市经济生活中占据越来越重要地位的新形势下,需进一步阐明具体建筑高度与城市热环境之间的定量关系。最后,因为大气流动和热传导、对流和辐射作用,地表温度在空间上发生连续变化,在一定尺度内,城市空间形态指标与城市热岛效应的相关关系往往受到相邻空间的影响。然而,以往的研究多采用普通最小二乘回归模型予以分析,无法捕捉数据的空间相关性,也没有反映出不同尺度上城市空间形态与热岛效应之间的关联程度。

因此,未来要聚焦高度城市化地区,以典型的高层、高密度、紧实城市为例,在深入理解城市热岛强度和城市空间形态的空间分布和时间演化特征及规律基础上,构建空间关系分析模型,在街道峡谷微观尺度上阐明SVF和H/W等城市空间形态指标对热岛强度的影响机制;在城市街区局部尺度上定量评估建筑布局方式、建筑高度、密度等城市空间形态指标与热岛强度的耦合关系,揭示

其作用机制;在城市宏观尺度构建土地利用、高层建筑数量及面积与城市热岛强度耦合关系,解析不同建筑高度对城市热岛强度的影响程度。通过多尺度下城市空间形态对城市热岛效应的影响研究,定量表征各指标的敏感性,进而科学协调城市不同层次空间规划和建筑设计对城市热岛效应的缓解程度。

参考文献(References):

- [1] Patz J A, Campbellendrum D, Holloway T et al. Impact of regional climate change on human health[J]. *Nature*, 2005, 438(17): 310-317.
- [2] Zhou L, Edickinson R, Tian Y et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(26): 9540-9544.
- [3] Estrada F, Botzen W W, Tol R S. A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 403-406.
- [4] Cao C, Lee X, Liu S et al. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12509.
- [5] Peng J, Ma J, Liu Q et al. Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China: An urban-rural contrast perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 487-497.
- [6] Stewart I D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 200-217.
- [7] Santamouris M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact synergies with the global climate change[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 207: 109482.
- [8] Oleson K, Anderson G, Jones B et al. Avoided climate impacts of urban and rural heat and cold waves over the US using large climate model ensembles for RCP8.5 and RCP4.5[J]. *Climatic Change*, 2018, 146(3-4): 377-392.
- [9] Besir A B, Cuce E. Green roofs and facades: A comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 915-939.
- [10] Balling R C, Gober P, Jones N. Sensitivity of residential water consumption to variations in climate: An intraurban analysis of Phoenix, Arizona[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(10): 1-11.
- [11] Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(1): 120-128.
- [12] Zhao L, Lee X, Smith R B et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands[J]. *Nature*, 2014,

- 511(7508): 216-219.
- [13] Allegrini J, Carmeliet J. Coupled CFD and building energy simulations for studying the impacts of building height topology and buoyancy on local urban microclimates[J]. *Urban Climate*, 2017, 21: 278-305.
- [14] Guo G, Wu Z, Xiao R et al. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 135: 1-10.
- [15] Yang F, Lau S S, Qian F. Summertime heat island intensities in three high-rise housing quarters in inner-city Shanghai China: Building layout, density and greenery[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(1): 115-134.
- [16] Zheng B, Bernard Bedra K, Zheng J et al. Combination of tree configuration with street configuration for thermal comfort optimization under extreme summer conditions in the urban center of Shantou city, China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(11): 4192.
- [17] Guo G, Zhou X, Wu Z et al. Characterizing the impact of urban morphology heterogeneity on land surface temperature in Guangzhou, China[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 84: 427-439.
- [18] Chun B, Guldmann J-M. Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 76-88.
- [19] Song J, Du S, Feng X et al. The relationships between landscape compositions and land surface temperature: Quantifying their resolution sensitivity with spatial regression models[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2014, 123: 145-157.
- [20] Wong M S, Nichol J E. Spatial variability of frontal area index and its relationship with urban heat island intensity[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(3): 885-896.
- [21] 黄焕春, 运迎霞, 李洪远, 等. 建筑密度与夏季热岛的尺度响应机制[J]. *规划师*, 2015, 31(12): 101-106. [Huang Huanchun, Yun Yingxia, Li Hongyuan et al. Building density and hot island scale response mechanism. *Planners*, 2015, 31(12): 101-106.]
- [22] 韩贵锋, 蔡智, 谢雨丝, 等. 城市建设强度与热岛的相关性——以重庆市开州区为例[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016(5): 138-147. [Han Guifeng, Cai Zhi, Xie Yusi et al. Correlation between urban construction and urban heat island: A case study in Kaizhou District, Chongqing. *Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering*, 2016(5): 138-147.]
- [23] Feng X, Myint S W. Exploring the effect of neighboring land cover pattern on land surface temperature of central building objects[J]. *Building and Environment*, 2016, 95: 346-354.
- [24] Scarano M, Mancini F. Assessing the relationship between sky view factor and land surface temperature to the spatial resolution[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(23): 6910-6929.
- [25] Lan Y, Zhan Q. How do urban buildings impact summer air temperature? The effects of building configurations in space and time[J]. *Building and Environment*, 2017, 125: 88-98.
- [26] Taleghani M, Kleerekoper L, Tenpierik M et al. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands[J]. *Building and Environment*, 2015, 83: 65-78.
- [27] Hu Y, White M, Ding W. An urban form experiment on urban heat island effect in high density area[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 166-174.
- [28] Susca T. Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate[J]. *Building and Environment*, 2019: 106273.
- [29] Munizgaal L P, Pezzuto C C, De Carvalho M F H et al. Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate[J]. *Building and Environment*, 2020, 169: 106547.
- [30] Jamei E, Rajagopalan P, Seyedmahmoudian M et al. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 1002-1017.
- [31] Li G, Ren Z, Zhan C. Sky View Factor-based correlation of landscape morphology and the thermal environment of street canyons: A case study of Harbin, China[J]. *Building and Environment*, 2020: 169.
- [32] Oke T R. *Boundary layer climates* (2nd ed.) [M]. London: Routledge, 1987.
- [33] Arnfield A J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island[J]. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(1): 1-26.
- [34] Eliasson I, Offerle B, Grimmond C et al. Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(1): 1-16.
- [35] Oke T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations[J]. *Journal of Climatology*, 1981, 1(3): 237-254.
- [36] Theeuwes N, Steeneveld G, Ronda R et al. Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(684): 2197-2210.
- [37] Johansson E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco[J]. *Building and Environment*, 2006, 41(10): 1326-1338.
- [38] Marciotto E R, Oliveira A P, Hanna S R. Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(11): 2497-2505.
- [39] Nasir D S N M, Hughes B R, Calautit J K et al. Effect of urban street canyon aspect ratio on thermal performance of road pavement solar collectors (RPSC)[M]//Yan et al. Beijing: 8th International Conference on Applied Energy, 2017.
- [40] Kantzioura A, Kosmopoulos P, Zoras S. Urban surface temperature and microclimate measurements in Thessaloniki[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 44: 63-72.
- [41] Chatzidimitriou A, Yannas S. Street canyon design and im-

- provement potential for urban open spaces: The influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 33: 85-101.
- [42] Georgakis C, Santamouris M. Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(4): 367-376.
- [43] Ahmed K S. Comfort in urban spaces: defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments[J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35(1): 103-110.
- [44] Qaid A, Ossen D R. Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(6): 657-677.
- [45] Khaled A. Al-Sallal, Laila Al-Rais. Outdoor airflow analysis and potential for passive cooling in the modern urban context of Dubai[J]. *Renewable Energy*, 2012, 38(1): 40-49.
- [46] Yan H, Fan S, Guo C et al. Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability: The case of Beijing, China[J]. *Building and Environment*, 2014, 76: 44-53.
- [47] Svensson M K. Sky view factor analysis-implications for urban air temperature differences[J]. *Meteorological Applications*, 2004, 11(3): 201-211.
- [48] Chun B, Guhathakurta S. The impacts of three-dimensional surface characteristics on urban heat islands over the diurnal cycle[J]. *The Professional Geographer*, 2017, 69(2): 191-202.
- [49] Yang F, Qian F, Lau S S. Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: A case study on high-rise housing in Shanghai[J]. *Building and Environment*, 2013, 70: 122-137.
- [50] Charalampopoulos I, Tsiros I, Chronopoulou-Sereli A et al. Analysis of thermal bioclimate in various urban configurations in Athens, Greece[J]. *Urban Ecosystems*, 2013, 16(2): 217-233.
- [51] Mohajeri N, Gudmundsson A, Kunckler T et al. A solar-based sustainable urban design: The effects of city-scale street-canyon geometry on solar access in Geneva, Switzerland[J]. *Applied Energy*, 2019, 240: 173-190.
- [52] Erell E, Williamson T. Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city[J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(9): 1243-1255.
- [53] Alitoudert F, Mayer H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate[J]. *Building and Environment*, 2006, 41(2): 94-108.
- [54] Ng E, Cheng V. Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 55: 51-65.
- [55] Andreou E. Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate[J]. *Renewable Energy*, 2013, 55: 182-188.
- [56] Darbani E S, Parapari D M, Boland J et al. Impacts of urban form and urban heat island on the outdoor thermal comfort: A pilot study on Mashhad[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2021, 65(7): 1101-1117.
- [57] Cao A, Li Q, Meng Q. Effects of orientation of urban roads on the local thermal environment in Guangzhou City[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 121: 2075-2082.
- [58] Sandberg M, Westerberg U, Claesson L. Catchment area: A new approach to urban windiness[J]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate*, 2003: 1-5.
- [59] Hien W N, Kardinal Jusuf S, Samsudin R et al. A climatic responsive urban planning model for high density city: Singapore's commercial district[J]. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2011, 2(4): 323-330.
- [60] 黄媛, 刘敬, 陈方丽, 等. 基于局地气候分区理论的城市形态及其热岛量级研究[J]. *新建筑*, 2019(4): 126-131. [Huang Yuan, Liu Jing, Chen Fangli et al. A study on the urban form and its heat island magnitude based on local climate zones scheme. *New Architecture*, 2019(4): 126-131.]
- [61] Petralli M, Massetti L, Brandani G et al. Urban planning indicators: Useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4): 1236-1244.
- [62] 葛亚宁, 徐新良, 李静, 等. 北京城市建筑密度分布对热岛效应的影响研究[J]. *地球信息科学学报*, 2016(12): 1698-1706. [Ge Yaning, Xu Xinliang, Li Jing et al. Study on the influence of urban building density on the heat island effect in Beijing. *Journal of Geo-Information Science*, 2016(12): 1698-1706.]
- [63] Lin Pingying, Lau S S Q, Qin Hao et al. Effects of urban planning indicators on urban heat island: A case study of pocket parks in high-rise high density environment[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2017, 168: 48-60.
- [64] Yang Y, Zhang X, Lu X et al. Effects of building design elements on residential thermal environment[J]. *Sustainability*, 2017, 10(1): 1-15.
- [65] Konarska J, Holmer B, Lindberg F et al. Influence of vegetation and building geometry on the spatial variations of air temperature and cooling rates in a high-latitude city[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(5): 2379-2395.
- [66] Erell E. The application of urban climate research in the design of cities[J]. *Advances in Building Energy Research*, 2008, 2(1): 95-121.
- [67] Van Hove L, Jacobs C, Heusinkveld B et al. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration[J]. *Building and Environment*, 2015, 83: 91-103.
- [68] Ng E. Towards planning and practical understanding of the need for meteorological and climatic information in the design of high-density cities: A case based study of Hong Kong[J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(4): 582-598.
- [69] Giridharan R, Lau S, 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(10): 1583-1595.
- [70] Fan S, Li X, Han J et al. Assessing the effects of landscape characteristics on the thermal environment of open spaces in residential areas of Beijing, China[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2018, 14(1): 79-90.
- [71] Giridharan R, Ganesan S, Lau S S Y. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong[J]. *Energy & Buildings*, 2004, 36(6): 525-534.
- [72] Chatzipoulka C, Nikolopoulou M. Urban geometry, SVF and insolation of open spaces: London and Paris[J]. *Building Research and Information*, 2018, 46(8): 881-898.
- [73] Berger C, Rosentreter J, Voltersen M et al. Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 193: 225-243.
- [74] Yang X, Li Y. The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature[J]. *Building and Environment*, 2015, 90: 146-156.
- [75] Huang X, Wang Y. Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 152: 119-131.
- [76] Hong B, Lin B. Numerical studies of the outdoor wind environment and thermal comfort at pedestrian level in housing blocks with different building layout patterns and trees arrangement[J]. *Renewable Energy*, 2015, 73: 18-27.
- [77] Yang S H, Zhou D, Wang Y P et al. Comparing impact of multi-factor planning layouts in residential areas on summer thermal comfort based on orthogonal design of experiments (ODOE)[J]. *Building and Environment*, 2020, 182: 1-17.
- [78] Raji B, Tenpierik M J, Van Den Dobbelsteen A. Early-stage design considerations for the energy-efficiency of high-rise office buildings[J]. *Sustainability*, 2017, 9(4): 623.
- [79] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析[J]. *生态学报*, 2011, 31(14): 3890-3901. [Xu Hanqiu. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3890-3901.]
- [80] Zhou X, Chen H. Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 1467-1476.
- [81] Unger J. Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database[J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2009, 36: 59-80.
- [82] Chen L, Ng E, An X et al. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach[J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(1): 121-136.
- [83] Yin C, Yuan M, Lu Y et al. Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 696-704.
- [84] Scarano M, Sobrino J A. On the relationship between the sky view factor and the land surface temperature derived by Landsat-8 images in Bari, Italy[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(19-20): 4820-4835.
- [85] Loughner C P, Allen D J, Zhang D L et al. Roles of urban tree canopy and buildings in urban heat island effects: Parameterization and preliminary results[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51(10): 1775-1793.
- [86] Yang Q, Huang X, Li J. Assessing the relationship between surface urban heat islands and landscape patterns across climatic zones in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 9337.
- [87] Lin P Y, Gou Z H, Lau S S Y et al. The impact of urban design descriptors on outdoor thermal environment: A literature review[J]. *Energies*, 2017, 10(12): 2151.
- [88] Rathphum P, Kasem C, Surat B. Physical characteristics of Bangkok and its urban heat island phenomenon[J]. *Building and Environment*, 2018, 143: 561-569.
- [89] Unger J. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: Review and new approach[J]. *Climate Research*, 2004, 27(3): 253-264.

Effects of Urban Spatial Morphology on Urban Heat Island Effect from Multi-spatial Scales Perspectives

Huang Qunfang

(College of Urban, Resources and Environmental Science, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013, Jiangsu, China)

Abstract: With the rapid development of global urbanization, the further increased global warming and extreme high temperature events, urban heat island effect has also become an important environmental problem affecting human survival and development in the 21st century. Therefore, it is a hot and frontier cross-scientific issue in the study of human geography and climatology to clarify the spatio-temporal variations of urban heat island intensity and reveal the driving mechanism at multi-spatial scales. Urban geometry is regarded as a key factor affecting urban-rural and intra-urban air temperature variations, and the urban form manipulation provides an opportunity to mitigate the adverse effects on urban climate. Therefore, it is critical to understand the relationship between urban form and the UHI effect to guide future planning practice. This paper systematically reviews and summarizes the multi-scale affecting and coupling mechanism of urban spatial morphology on urban heat island intensity from three different spatial scale perspectives including street canyons micro-scale, urban block local scale, and urban macroscale. Based on the understanding of the spatial distribution and temporal evolution characteristics of urban spatial morphology on urban heat island intensity, we will characterize the specific effects of urban spatial morphology on urban heat island intensity and construct the spatial relationship analysis model to reveal the affecting mechanism of urban spatial morphology on urban heat island intensity at different temporal and spatial scales. Our knowledge and insights will provide theoretical guidance for urban planning, livable city construction and climate change response and adaptation study.

Key words: urban heat island intensity; urban spatial morphology; land use; climate warming; scale effect