DOI: 10.5846/stxb201902250353

周伟奇,田韫钰.城市三维空间形态的热环境效应研究进展.生态学报,2020,40(2):416-427. Zhou W Q, Tian Y Y.Effects of urban three-dimensional morphology on thermal environment: a review.Acta Ecologica Sinica,2020,40(2):416-427.

城市三维空间形态的热环境效应研究进展

周伟奇^{1,2,*},田韫钰^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室,北京 100085 2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:城市的三维空间形态,通过影响地表能量平衡过程和空气流动,改变城市内部热环境,并可能加剧城市热岛效应。在三维 空间上定量解析格局-过程-效应关系对于城市生态安全和可持续发展具有重要意义,可为城市生态规划与景观设计提供重要 科学依据。从城市三维形态的热环境效应研究角度,综述了城市三维形态的定量化研究进展;总结了城市三维形态对热环境以 及空气流动、太阳辐射等过程的影响;分析了当前城市三维形态的热环境效应研究领域存在的不足。未来的研究应注重建筑与 植被三维特征的综合表征,三维形态指标的选择应综合考虑其对设计规划的指导作用,并加强城市三维形态对热环境影响机理 及其尺度效应的研究。

关键词:城市三维形态;地表温度;气温;影响机理;城市景观设计

Effects of urban three-dimensional morphology on thermal environment: a review

ZHOU Weiqi^{1,2,*}, TIAN Yunyu^{1,2}

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

Abstract: Urban expansion in the vertical dimension affects the atmospheric transmission and energy balance at both local and city scales, and thus alters urban thermal environment such as intensifying the urban heat island effect. Understanding how three-dimensional morphology affects urban climate dynamics is crucial for urban sustainable development and managing our landscapes. This paper presents a comprehensive review on how urban three-dimensional morphology affects land surface and air temperatures in urban areas. We first reviewed the current states and trends in quantification of urban 3D morphology, with a particular emphasis on previous studies that focused on the effects of urban 3D morphology on urban thermal environments. We then summarized how urban 3D morphology affects land surface and air temperatures in urban areas by reviewing existing studies. We found that sky view factor (SVF) and street height/wide ratio (H/W) were the two most frequently used, and important 3D morphological indicators that significantly impact thermal environments. Based on the review of the existing studies, we suggested a few future directions: 1) choosing and/or developing 3D indicators that can more comprehensively reflect the true 3D morphology of urban areas, and more planning and designing relevant. For example, 3D indicators shall consider the effects of trees, rather than buildings and roads alone. Additionally, when choosing or developing indicators, their relevance to urban planning and design shall be considered. 2) Future research shall be more focused on the mechanism on how urban 3D morphology affects urban thermal environments, as existing studies mostly focused on the statistical relationship between them. 3) Cross-city comparisons are highly desirable.

基金项目:国家自然科学基金优秀青年项目(41422104);国家自然科学基金面上项目(41771203);国家重点研发计划重点专项 (2016YFC0503004)资助

收稿日期:2019-02-25; 网络出版日期:2019-11-04

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wzhou@ rcees.ac.cn

Key Words: three-dimensional urban morphology; land surface temperature; air temperature; influence mechanism; urban landscape design

全球正处于城市化飞速发展阶段,大量人口涌入城市。2016年中国城市总人口相比于2000年增加了 32.6%,市区总人口增加了71.6%,建成区面积更是增长了1.75倍^[1]。因为城市人口剧增与建筑用地紧缺之 间的矛盾日益加剧,城市在二维方向上迅速扩张的同时,城市建筑群在高度上也不断延伸^[2-4]。目前大量的 研究主要关注城市二维景观格局(土地利用、绿地覆盖率等)对城市热环境的影响^[5-7],对三维空间形态的影 响关注较少。虽然二维格局和三维形态对温度影响的相对重要性尚无定论^[8-11],但部分研究显示三维空间形 态对城市气候和微气象的影响可能更加显著^[12-14]。系统梳理已有的相关研究成果,有助于深化对城市三维 空间形态影响热环境及其机理的认识,并可为城市规划与管理提供新的思路和科学依据。

城市的三维结构和形态(建筑规模、街区高宽比等)是影响城市微气象的重要因素^[15]。城市建筑和交通 在垂直空间的拓展,影响局地和城市尺度地表能量平衡过程和空气流动,改变城市内部的热环境,可能加剧城 市热岛效应^[12-13,16]。城市热岛效应,尤其是其与全球气候变化叠加效应导致的城市热浪,易引发人群中暑、热 相关疾病(冠心病、脑血管、心脏病等)^[17-18],甚至引起死亡^[19]。如何通过优化城市的二维景观格局和三维空 间形态,改善城市热环境,日益受到相关学者和管理者的关注。

国内外学者围绕通过增加城市的蓝绿空间(即绿地和水体)应对城市热岛效应开展了大量研究。然而, 城市可用于建设城市绿地(或水体)的面积毕竟有限,可否通过优化城市三维形态来改善热环境,日益受到关 注。针对这个问题,本综述全面回顾了城市三维形态与温度之间关系的研究,从现象、机理以及政策应用三个 方面对已有的研究进行了归纳总结,探讨了已有研究在研究内容、研究方法等方面存在的不足,提出了研究领 域未来的发展方向。

1 城市三维形态的定量化研究

长期以来,城市景观格局对热环境影响的研究主要关注城市二维结构,但近十年来越来越多的研究开始 注重三维形态的影响。城市三维形态的定量化研究是探讨其热环境效应的基础和前提^[12-13],有必要对其进 行综述。

1.1 城市三维形态指标体系

三维形态实际上是在二维格局参数的基础上加入了高度信息,但三维形态的表征并不局限于高度,也包括因高度衍生的其他特征。随着遥感与激光雷达技术的发展,高度信息的获取不再困难,因此三维形态的量化也越来越完善^[20-24]。三维指标体系可以分为五个层次(LoD):最低层次的LoD0只有地势,LoD1用基本的平行六面体特征来表征建筑物,LoD2包括了屋顶的斜率,LoD3模拟了立面元素,最高层次的LoD4还涵盖了建筑物的内部特征^[25]。目前在三维形态的热环境效应研究领域中,三维指标主要集中在LoD0和LoD1 层次上,并且不同空间尺度(宏观和微观)研究的层次不同。其中,宏观(国家、城市等)尺度上的三维形态指的是总体形态,通常采用包含了地表建筑物、桥梁和树木等高度信息的数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)来表征;而微观(居民区、街区等区域)尺度上的三维形态的定量化表征更加丰富,但一些指标的针对性较强,很多三维形态特征只能在特定城市内部才能被量化^[26]。

目前,三维形态定量化研究的问题主要集中于:(1)如何综合表征城市三维景观形态?(2)如何表征因高度衍生的其他特征?(3)如何建立城市三维景观格局演变的智能模型?(4)城市三维空间的增长有什么规律?针对这些问题,各研究建立了很多三维指标,可以分为高度指标、体积指标、综合指标以及建筑群阵列指标六类(图1;图2)。高度指标有平均建筑高度、平均植被高度、建筑高度标准差(H_std);体积指标主要有植被体积、建筑物体积、植被建筑体积比、容积率(FAR)、建筑体积占比(CI)、户外空间率(OSR);综合指标包括

40 卷

天空可视角(SVF)、街区高宽比(H/W)、景观起伏度(LHR)、分布均匀度指数(BEI)等^[11,27-28]。其中,较为常用并对热环境有显著影响的指标为天空可视角、街区高宽比、容积率以及建筑高度等。



图1 典型的三维形态指标^[11,27]

Fig.1 Some key 3D morphology indicators^[11,27]



图 2 建筑物阵列几何指标^[28]

Fig.2 Measures of the geometric form of building arrays^[28]

1.2 天空可视角与街区高宽比

近年来,建筑高度、容积率等三维形态指标越来越多地应用于三维形态的热环境效应研究^[8],但天空可视角与街区高宽比仍是最常用的指标。由于天空可视角与街区高宽比是综合建筑高度、密度等信息得到的指标,较全面地表征了天空可见系数和城市内部的几何结构,因此一般来讲,它们对热环境的影响更加显著^[13,29-31]。但需要指出的是,建筑高度、容积率等基础建筑指标可以直接应用于规划设计中,探讨其对热环境的影响具有实践意义^[8]。

天空可视角是指地表一个定点上可以看到的天空范围与能看到的总范围之比^[29],它是表征城市区域几何、密度和热平衡的重要参数,也是产生和控制热岛效应的重要因素^[30]。该参数为0—1之间的无量纲数, 其中0代表完全被阻隔的空间,1代表完全开阔的空间^[29,31]。在城市地区,建筑和植被是阻碍并决定天空可 视角的重要元素,绝大多数地点的天空可视角都小于1。此外,天空可视角已经被广泛应用于可视天空大小 的测度^[13,32-33],目前通常利用激光雷达、航拍或三维数据库获得的数字表面模型(DSM)计算大范围的天空可 视角^[34],也可以通过带有鱼眼镜头的数码相机、自动冠层分析仪等方法获得测量点的天空可视角^[35]。 街区高宽比也是表征微观(街区尺度)三维形态的一个重要指标,定义为街道峡谷内平均建筑高度与峡谷宽度之间的比值^[31]。由于城区街道具有特殊的几何特征,类似于天然峡谷,因此被称为"街道峡谷"^[36]。 Oke 也将其定义为城市基本的几何单元,它可以近似为二维截面之间的部分,忽略街道交叉点,并假设沿着峡谷轴的建筑长度是半无限的。街区高宽比是表征街道峡谷形态的重要指标:如果高宽比约等于1(墙壁上没有主要开口),则认为该峡谷是均匀的;如果低于0.5,则为浅峡谷;如果等于2,则为深峡谷^[37]。同时,这种街道峡谷占据了三分之二的城市空间,在辐射平衡和室外热环境方面发挥着重要作用,因此探讨街区高宽比对热环境的影响是很有必要的^[38-39]。

2 城市三维形态和热环境的关系研究

城市热环境的表征主要分为地表温度和气温。地表温度是由地表热辐射和热力学特性共同决定的,受到 热通道、地面湿度、地表反射率、太阳和大气下行辐射以及近地表气温的影响。而气温主要受到地表散发的热 流、人类活动以及周边景观要素的背景温度的综合影响。地表温度与气温之间相互作用,直接影响居民的舒 适度、健康和日常生活。

近年来城市生态研究者不再只关注二维结构的组成和配置,深入探讨三维形态与城市温度之间关系的研究不断增加^[40]。例如,Srivanit和 Kazunori分析了 12 个二维和三维格局指标对地表温度和气温的影响,发现三维指标对地表温度的影响更大^[8];Chun和 Guldmann利用空间回归模型,同样得到三维指标的贡献度相对较高的结论^[9]。Zheng等发现,相比于植被覆盖比例和建筑物密度,建筑物高度对地表温度的影响更大^[10]。需要指出的是,二维格局和三维形态对温度影响的相对重要性,研究结果并不完全一致。例如,有研究表明植被覆盖率、建筑覆盖率等二维指标与温度之间的相关性高于很多三维形态指标^[11]。

已有研究中,时间尺度主要集中于夏季,空间尺度逐渐从城市中心区向面积更大、异质性更高的城市区域 扩展。科学问题主要集中于:(1)城市三维形态对地表温度与气温的影响分别是什么?(2)三维形态对昼夜 温度有何不同影响?(3)不同空间尺度对相关关系的影响?同时,已有研究结果发现,对于不同气象条件下 的城市,其三维形态对热环境的影响不同;同一区域的地表温度与气温存在差异,影响它们的因子也可能不尽 相同。针对这个问题,本文主要回顾了探讨城市三维形态与地表温度、气温之间关系的研究。

2.1 城市三维形态对地表温度的影响

地表温度(LST)一般通过卫星获取的热红外遥感影像来反演^[41],目前应用最广泛的数据源是 Landsat TM 影像中的 TIR 波段^[42]。这种测量方式属于远程间接观测,实际测量到的区域是传感器投射到表面的瞬时视 场(IFOV),具有一定的片面性和随机性。其中,片面性体现在空间尺度—由于城市表面的三维结构以及传感 器的观察角度,整个城市表面的很大一部分可能因被遮挡而观测不到;随机性体现在时间尺度—Landsat 卫星 总是在每隔 16 天的同一时刻经过固定地区,这使得每个地区不能获取一天中其他时刻的地温值。

由于遥感可以获取大范围的地表温度^[41],同时随着激光雷达等技术的发展,大范围三维信息的获取得以 实现,因此城市三维形态与地表温度之间关系的研究逐渐扩展到较大的空间区域^[9,43]。其研究单元以规则网 格为主,通常直接采用边长 30m 的网格,也就是 Landsat TM 影像的像元大小,开展相关性分析^[11,43-44]。部分 研究的分析单元是基于 30m 分辨率的影像生成的面积更大的网格(90m,120m,480m 等),或是其他行政边 界,分析研究单元内地表温度值与对应的三维形态值之间的关系^[7,45-47]。

城市三维形态与地表温度之间关系的研究主要采用两类分析方法:一类是统计分析,即利用相关性分析、 多元回归等统计方法来分析三维形态指标对地表温度的影响^[11,43,47]。另一类是分类比较,即按照建筑高度 或者数字高程模型对研究区域进行分类,比较不同高度区域的地表温度^[44,46],或分类后分析各类区域内三维 形态与地表温度之间的相关性^[7]。

研究主题集中在天空可视角系数(SVF)与地表温度(LST)之间的关系上。Unger回顾了探讨天空可视角系数与地表温度之间关系的研究,发现 2004 年之前的研究结果以负相关为主,研究区域基本不超过

10km^{2[13]}。Gal 等人同样发现年均地表温度与 SVF 之间存在很强的线性负相关关系,建筑物的大小和形状是 影响地表温度的主要特征^[32]。近年来,SVF-LST 研究逐渐扩展到更大的城市区域。Scarano 和 Mancini 研究 了意大利巴里 116 km²城市区域内 SVF 对夏季日间地表温度的影响,发现 SVF 越大地表温度越高;而在美国 哥伦布市中心的一项研究则得到了相反的结果^[47]。总体来看,天空可视角系数与地表温度间的关系以负相

此外,很多学者也研究了建筑物理形态—包括建筑高度、表面积、体积等指标与地表温度之间的关系。在 温带季风气候下,Cai和Xu通过比较2009年与2015年北京与天津地区的建筑高度及其夏季地表温度发现, 随着区县单元内建筑高度的增加,地表温度有所下降^[46]。而在干旱地区,Alavipanah等人研究了伊朗中部 130km²城市区域内建筑高度、体积、表面积、街区高宽比与夏季日间地表温度之间的关系,发现建筑表面积与 新区LST的相关性最强,建筑高度对老区LST的影响程度相对最高^[43]。总体来看,不同气候带城市中,建筑 高度对地表温度的影响均较为显著;一般来说,建筑越高,地表温度越低。

然而,大部分研究的时空尺度都比较单一,并且集中在夏季。为了探究城市格局(Urban Site Characteristics, USC)与地表温度(LST)之间关系对空间和时间的依赖性,Berger 等利用高分辨率影像分别比较了柏林和德国科隆四季中26个二维、三维格局指标与地表温度之间的关系,结果发现两个研究区域 USC-LST 的关系明显不同,与研究区域的地理位置、城市形态以及土地利用结构等有关;但不同季节中 USC-LST 关系较为相似^[11]。因此,城市三维形态与地表温度之间的关系可能对空间的依赖性较强,对时间(季节)的依赖性相对较弱。

2.2 城市三维形态对气温的影响

关为主,但研究结果存在差异,这可能与研究的时空尺度有关。

不同于地温数据的间接测量,气温数据主要来自现场的直接测量。对于气温来说,依据不同的大气层又可以分为城市冠层气温和城市边界层气温。其中,城市冠层大气温度即为固定气象站或者在街道内、建筑物平均高度处测得的温度,而城市上空的气球、高塔等气温计所测得的则是边界层大气温度。而城市研究中的气温数据一般为冠层温度,主要来自固定气象站和移动传感器,是热探测器与空气直接接触的结果^[42]。

由于现场实测气温数据的获取主要来自固定气象站和移动传感器,因此城市三维形态与实测气温之间相 关性的研究主要集中在微尺度与中尺度区域^[41]。自 20 世纪 50 年代以来,气候学家一直在研究城市结构— 包括城市规模、街道设计、峡谷几何对局地微气候的影响^[48-53]。近年来,城市生态学家也越来越关注街区三 维形态与微气候之间的关系^[8,35,54-56]。Stewart 和 Oke 提出了 Local Climate Zone(LCZ)的概念,即以气象站或 测量传感器为中心、一定距离为半径的缓冲区域^[57],是目前大部分探讨城市三维形态与气温之间关系的分析 单元,也代表了最近的研究进展^[26]。

在研究方法上,探讨城市三维形态与气温之间关系的模型大体分为两类:一类是数值模型,包括有关能量与质量的物理方程以及大气辐射定律,即从影响机理角度来解释。这类模型通常用于情景模拟,即设定不同的城市三维形态情境,利用数值模型模拟得到各情境中的气候参数,进而通过模拟结果的比较得出三维形态对微气候的影响^[58-59]。最常见的数值模型有 ENVI-met, CFD, EnergyPlus 等建筑能耗模型以及区域化模型^[60]。另一类是统计模型,包括相关性分析和回归方程,自变量为三维形态参数,因变量以实测得到的气温值为主。但大多数统计模型采用了最小二乘法(OLS),并未考虑空间自相关,即邻近区域之间的交互作用,例如邻近网格内三维形态对中心网格热环境的影响^[38,61-62]。为了考虑这种影响,同时避免最小二乘法中的估计偏差,未来需要利用空间回归模型来替代最小二乘法,比如空间滞后模型(SAR)和一般空间模型(CSM)^[9,63]。此外,很多研究利用数值模型模拟得到的气温值与三维形态指标进行统计分析,进而探讨城市三维形态对气温的影响,但得到的结论实际上是数值模型内部的机理。因此,本文主要回顾了实测分析类的研究结果。

总结已有的研究结果发现,天空可视角和街区高宽比是影响城市气温的两个最显著的指标,尤其是天空可视角^[13]。大量的研究探讨了天空可视角系数(SVF)对气温的影响^[13,29,64-65]。例如,北京的一项研究表明,城市地区的日间气温和 SVF 之间存在着直接的联系,即 SVF 的增加会使得日间气温升高,而夜间气温则正好

相反^[64]。同样,香港^[65]的研究也得到通过提高 SVF 值,控制建筑高度,可以降低夜间气温值的结论。总体来 看,天空可视角的增大会导致城市日间气温的升高和夜间气温的降低。

街区高宽比(H/W)与内部气温直接相关。例如,Emmanuel 和 Johansson 发现在斯里兰卡科伦坡湿热的 气候中,不同高宽比地区的温度差为 7k^[54]。具体来讲,街区高宽比与夜间气温呈正相关^[28,30]:Giannopoulou 等研究了雅典密集市区内高宽比对夜间气温的影响,发现在三个城市峡谷(H/W分别为 3、2.1、1.7)中,随着 高宽比的减小,夏季与秋季夜晚的降温效率均显著增加^[56]。而不同气候下的研究均表明街区高宽比与日间 气温呈负相关:在湿热的气候下,建筑物间距的增大使得日间气温升高^[55];在炎热干燥的气候下,深峡谷(H/ W 较大)的日间气温明显低于浅峡谷^[54];对于半干旱地区,Bourbia 和 Boucheriba 测量了阿尔及利亚 7 个不同 高宽比(从 1 到 4.8)样点的气温,同样得到高宽比越小气温值越高的结论^[35]。综合来讲,不同气候下的研究 均表明街区高宽比与夜间气温呈正相关,但与日间气温呈负相关。

街道走向对气温也有一定影响,大部分研究得到东西走向(E-W)街道的日间气温高于南北走向(N-S)街 道的结论。事实上,与南北向(N-S)街道相比,东西向(E-W)街道暴露在阳光下的时间更长^[26]。以色列地中 海沿岸地区的研究表明,在一天最热的时候(15:00h),N-S街道的气温比 E-W街道低 0.64 K^[66]。研究还发 现,这种街道方向的影响在深峡谷中更为明显。而在中纬度城市阿德莱德的研究发现,冬季与夏季 E-W街道 的热环境较为舒适^[67]。另一项研究发现,对于低层建筑的街道建议采用 N-S 方向,而对于高层建筑则没有推 荐的方向^[68]。因此,街道走向对气温的影响与城市的地理位置、街区高宽比、季节等因素有关。

当然,也有研究发现其他三维形态指标对气温差异的解释程度更高。例如,Srivanit 和 Kazunori 发现曼谷市中心内 92.6%的气温差异取决于户外空间率(OSR)和容积率(FAR)^[8]。此外,有研究表明建筑高度和建筑体积密度是城市气候的主要预测因子,可用于构建城市尺度的气候预测模型以及城市气候制图研究^[40,69]。由于不同的研究者选取了不同的研究区域和研究方法,同时城市的异质性较高,因此很难确定对于一个特定的城市气候环境来说,哪个三维形态指标对气温的影响最为重要。

2.3 空间尺度效应

总结已有研究发现,合适的研究区域和研究单元大小对于城市三维形态与热环境之间关系的研究至关重 要。首先是研究区域的空间尺度,三维形态与热环境之间的相关性对空间的依赖性较强^[11],因此研究的空间 区域面积应该适当扩大。其次是研究单元的空间尺度,与地温相关的研究主要用不同大小的网格作为研究单 元^[9,47],而与气温相关的研究主要以不同半径的缓冲区为研究单元^[70],其研究结果均受到研究单元大小的影 响,但目前并没有得到明确的最佳尺度^[42]。

在地温相关研究中,不同大小的研究单元会得到不同的统计结果^[11,44]。对于较大的分析对象来说,比如 占地超过网格单元(30m)的建筑物,它的三维特征与其地表温度的相关性分析即被分为多个网格的相关性, 因此得到的分析结果会受到一定影响^[11]。而空间单元过大也不能反映详细的城市特征及其空间关系。因 此,已有研究探讨了不同网格尺度对三维形态与地表温度之间关系的影响。Scarano 和 Mancini 比较了不同遥 感影像(空间分辨率)得到的地表温度与 SVF 之间的统计结果,发现空间分辨率会影响回归方程的斜率,但最 佳尺度要根据具体的研究区域而定^[47]。Chun 和 Guldmann 利用不同统计模型比较了 120、240、480m 网格得 到的结果,发现对于最小二乘法模型来说,网格越小,SVF 对地温的解释程度越低^[9]。这是因为小网格间的空 间自相关相对更强,而最小二乘法并未考虑这种空间效应,因此针对小网格的解释能力较低。而对于考虑了 空间效应的广义空间模型(GSM)来说,不同网格大小的模型拟合度(*R*²)相似,小网格稍高于其他网格^[9]。

而对于气温来讲,已有研究表明植被和建筑的三维形态对气温的影响范围不同,并且与气温测量点周边 环境有关。Davis等研究了五个空间尺度上三维形态对气象站夜间气温的影响,发现距离气象站 500 米半径 内,植被面积及体积对气温的综合影响最强;而与植被相比,建筑体积对气温的影响范围较小,在距气象站 100 米半径内的解释能力最强^[70]。其他研究也得到了不同的最佳半径,这可能与城市本身的物理特性(街区 大小,建筑密度,基础设施等),实验设计(温度传感器放置环境)以及气候类型有关^[6,15]。而除了不同研究单 元大小对研究结果的影响之外,测量点本身能代表的气温范围仍有待探讨。传感器测量值会受到测量点上风 表面湍流的影响,因此能代表的区域的形状和大小是由传感器高度、大气湍流及其稳定性特征共同决定 的^[41]。由于冠层内气流的复杂性,传感器的源区域不太为人所知,也是当前研究的主题。总体来看,合适的 分析单元对于三维形态-热环境研究领域的重要性是毋庸置疑的^[9]。

2.4 规划启示

近年来,世界上很多城市致力于通过设计城市景观来改善热环境问题。然而,对于已经建成的城市,采用 一个全新的城市形态方案不太现实,城市设计与规划者通常是设计和改造已经存在的建筑环境^[26]。如何通 过调整和优化已有的城市三维形态改善城市热环境,对宜居环境的规划设计管理具有重要的指导意义^[71-72]。

纵观已有的研究,其结论的政策相关性和应用性有较大欠缺。虽然个别的学者在如何实施缓解措施来减 轻城市化给热环境带来的负面影响等方面做过一些尝试^[73],但大部分研究更多地关注城市三维形态与温度 之间的关系,并没有从城市规划的角度来深入探讨这些结果的应用前景^[26]。例如,指标的选择,并没有太多 关注其规划应用性,像目前常用的天空可视角指标只是综合表征了城市的三维形态特征,并没有明确的规划 指导意义。

某些措施对热环境改善并不一定具有普遍性,可能在一个城市适用,而在另一个城市,可能并不适用,甚 至对热环境产生负面影响^[13,26]。比如,N-S街道更适合以色列地中海沿岸地区的气候^[66],而在中纬度城市阿 德莱德,E-W街道的热环境较为舒适^[67];深峡谷产生的遮荫和过堂风可以缓解热带城市的热环境,但并不一 定适用于温带城市^[26]。因此,考虑每个城市的地理特征和季节特征,因地制宜,是非常必要的。

3 城市三维形态对热环境的影响机理

太阳辐射和空气运动是热环境的重要决定因素^[31,74]。城市区域内,形状各异的建筑物改变了开放空间 的风场,而风的流动对热环境起着关键作用,1—1.5m/s的风速可以使空气温度降低 2℃^[75]。此外,建筑等障 碍物对白天的太阳辐射过程以及夜间的长波辐射产生了复杂的影响。比如,建筑表面吸收太阳辐射,使得外 墙周围空气的温度随之升高;但同时,建筑产生的遮阴也阻挡了部分太阳直射。因此,城市三维形态通过影响 太阳辐射与风速,进而影响气温与地温的过程较为复杂,难以从理论上推断,需要更多的实测和模拟研究来 探讨。

3.1 对太阳辐射过程的影响

城市三维形态对热环境的影响主要是通过影响太阳辐射过程来实现的。已有研究表明天空可视角系数 (SVF)对日间太阳辐射以及夜间长波辐射的影响不同。SVF 对日间太阳辐射有着双重影响:一方面,SVF 的 减少会降低地表辐射损耗,使得地表对太阳辐射的吸收增加^[13,33];另一方面,SVF 较小的区域为峡谷内提供 了更好的建筑遮阴,阻挡了部分太阳直射,有效地降低了日间地表辐射温度^[76-77]。Lai 等人测量了白天密集 建成区内的长波辐射、短波辐射以及辐射温度,发现 SVF 减少 0.1,则长波辐射增加 10W/m²,日间辐射温度 (MRT)增加 1.6K^[78]。而到了夜间,低 SVF 抑制了城市峡谷向外界的长波散射和湍流传热,降低了城市地表 的冷却速度,从而导致城市峡谷内夜间气温居高不下^[48]。同时,大部分研究也显示出 SVF 与实测的净长波辐 射、夜间温度之间的强烈相关性。

街区高宽比(H/W)对太阳辐射过程的影响与天空可视角类似。对于日间太阳辐射过程来说,深峡谷(H/W较大)中辐射损失较少^[12,79-80],但高层建筑的遮阴作用也有效地阻挡了进入峡谷内的太阳辐射^[26,77]。 考虑到太阳直射可以使辐射温度增加 25.1℃,一些研究提出应通过深峡谷增加遮阴面积^[81]。而夜间的冷却 过程主要是由向外的长波辐射造成的。狭窄的街道和高层建筑产生的深谷(H/W较大)使得长波辐射的逸 出更受阻碍,内部热量难以散发^[12,31,82-84]。

3.2 对风速的影响

实测和模拟结果均表明,风场在流向建成区后发生变化[85],受到建筑物和开放区域的布局、几何形状等

三维形态的强烈影响^[86-88]。其中,天空可视角系数是风速的决定因素之一^[26]。理论上,天空可视角较小的区域风速也较小,其总湍流热传输减缓,使得热空气滞留在建筑物之间,直接导致地表和空气温度的升高^[13,33]。此外,在弱风环境下,天空可视角可以指示太阳辐射引起的热浮力对气流速率的驱动作用^[26]。上海的实测研究也验证了城市三维形态对潜在通风的微尺度影响,并得到天空可视角增加 10%将导致人行道风速增加 8% 的结论^[89]。

街道高宽比(H/W)同样对峡谷内的风速起着关键作用。高大的建筑物和狭窄的街道(H/W 较大)的结 合减少了内部自然风的流动^[90-91],热空气被滞留在了峡谷中,越来越多的冷空气被相对温暖的建筑物侧面取 代,使得空气温度升高^[92]。街道方向也是城市中风速的一个决定性参数。城市盛行风向与街道方向之间的 角度直接决定着街道内的风速。当气流向街道倾斜时,街道内会形成螺旋涡,但这种流动并没有被建筑墙壁 完整反射出来^[91];而当风向与街道轴线平行时,就形成了一条无障碍通道,使得盛行风能够穿透城市。

4 总结与讨论

综上所述,城市三维空间形态的热环境效应已成为具有理论和实践双重意义的研究热点之一,研究内容 不断深入和拓展。但当前研究领域,在研究主题和方法方面仍存在一些不足与挑战,可总结为以下四个方面。 4.1 城市三维形态指标的构建和选取

长期以来,城市三维数据的获取、形态指标的选取和计算一直是城市三维形态热环境效应研究定量分析的难点。目前,城市三维数据获取的技术方法发展迅速,但在形态指标的选择和计算方面,仍存在以下2个主要问题:(1)三维指标体系仍不够全面:城市三维形态指标的选取和计算,主要侧重城市中的构筑物(建筑和道路),以天空可视角与街区高宽比为主,而对其他具有三维空间的地物,比如乔木的影响关注较少,尤其是综合考虑建筑与乔木相互关系的指标更少。此外,城市三维形态指标的选取主要从其对热环境的影响考虑, 难以直接应用于城市规划、景观设计与评价。比如 Unger 通过综述发现,很多研究只用了天空可视角来解释 热岛强度的变化,因为过于综合,天空可视角这类指标难以直接应用于规划和设计^[13];(2)研究的空间尺度有 待扩充:三维形态定量化研究集中在中小尺度,原因是大部分三维形态指标仅可以在小范围城市区域内获取, 大范围区域的三维指标不易计算或不可获取,针对大尺度三维形态对热环境影响的研究较少。

针对现有研究的不足,未来应加强以下两个方面的研究。(1)指标的构建和选取:城市三维景观指数的 构建不应局限于建筑物与植被各自的三维特征,应建立考虑两者空间组合方式的综合三维指标。例如,体现 建筑物和植被三维空间相对比例的植被建筑体积比;表征建筑和植被相邻关系的公共边界长度等指标;以及 量化建筑和植被遮阴效率的遮阴总面积、遮阴重叠面积等指标^[93-94];此外,应加强三维形态指标对设计规划 的指导作用,构建或选择的三维形态指标应不仅能够表征影响城市热环境的特定方面,即计算综合指标所用 的基础指标,而且应该是可以用于城市规划与实施的指标,如建筑高度、容积率等。(2)提升研究的空间尺 度:通过建立大尺度范围内的城市三维数据集,来拓展研究的空间范围。部分发达国家已建立当地的三维建 筑数据库^[9,11],而发展中国家的三维数据源难以获取^[40],因此建立全球三维信息的数据库对未来的研究具有 重大意义;激光雷达可以同时获得地面和地表的高程信息,但建筑屋顶边界较为模糊,而高分辨率遥感影像可 以获取建筑物屋顶清晰的轮廓,因此如何利用多数据源集成来获取全面准确的城市三维景观信息将是未来定 量化研究的重点^[2]。

4.2 加强影响机理的实证研究

总结探讨城市三维形态的热环境效应研究发现:首先,现有研究大多为现象研究,即基于三维形态与温度 指标的统计分析;其次在统计方法上,大部分研究采用了简单的最小二乘法回归模型,并没有考虑空间上的临 近效应、自相关以及时间变化上的相关性;此外,现有探讨三维形态对热环境影响机制的研究中,大多通过模 拟风场、太阳辐射、气温等参数,分析三维形态、过程变量(风速、辐射量)以及气温之间的关系。

因此,针对城市三维形态对热环境的影响研究,未来应加强以下几个方面:(1)定量分析城市三维形态与

热环境相互作用机理。从能量平衡过程的角度,引入气温、辐射、风速、比辐射率、热通量等过程因子,开展城 市三维形态对热环境影响机理的模拟和实测研究^[25,68,74]。(2)在统计分析方法上,应增加空间回归模型和时 间序列分析。空间回归模型考虑了空间自相关和邻近效应,可以反映分析单元之间的能量交换^[26,42];时间序 列分析可以反映三维形态与热环境时间变化上的相关性,发展融合三维形态变化和热环境因子的多尺度模 型,进而可以预测未来热环境的变化^[2]。(3)加强实证研究。基于数值模型的情景模拟分析主要从物理、气 象学等理论角度分析热岛的形成机制,并未得到城市三维形态与热环境之间真实的作用机制,应通过实地测 量地表辐射值、风速、气温等因子,探讨三维形态对实测温度值的影响机理,进而确定三维形态的热环境效应。 (4)深入调查局地三维格局影响地表能量收支与分配的机制。例如,在建筑表面和周边地表分别设置测量 点,探讨建筑高度对太阳辐射的双重影响;建筑表面的吸热作用与建筑的遮阴效应。

4.3 多尺度研究的重要性

从研究尺度来看,合适的研究区域和研究单元大小对于城市三维形态与热环境之间关系的研究至关重 要。总结现有研究发现:首先在研究区域上,现有城市等大尺度相关研究大多关注地温;而气温相关研究受数 据源限制,多集中于街区等局地中小尺度,研究结果难以指导城市和区域尺度空间优化布局。其次在研究单 元上,现有地温相关研究以不同大小的网格单元或者行政区为分析单元^[9,47],气温相关研究主要以不同半径 的缓冲区为研究单元^[70],其研究结果均受到研究单元大小的影响,但目前尚未得到明确的最佳单元大小^[42]。

由于三维形态与热环境之间的相关性对空间的依赖性较强^[11],因此未来应加强不同空间尺度的研究,探 讨尺度效应与关联,重点包括:(1)加强城市尺度的研究,及其与局地尺度的相互作用和关联,探讨城市三维 形态在多个空间尺度上对热环境影响的机理机制,尤其应该加强对气温影响的研究;(2)城市间对比研究:在 大量开展城市实证研究的同时,应加强在区域、国家、甚至全球尺度的城市间对比研究,探讨城市所在区域的 地理、气候背景等的影响,探寻城市三维形态对热环境影响的一般性规律。

4.4 加强三维形态与热舒适度的研究

当前三维形态的热环境效应研究中,由于遥感可以获取大范围的地表温度^[41],研究者主要关注三维形态 对地表温度的影响^[43-47],探讨三维形态与气温、热舒适度等关系的研究相对较少,尤其缺乏针对城市尺度上 热舒适度的相关研究^[26]。

城市热环境研究应以良好的城市人居环境为最终目的,因此未来应加强针对气温、热舒适度等与人体舒 适度和健康相关的研究。(1)从局地(街区)尺度,揭示三维形态、地表能量以及热舒适度之间的关系。局地 三维形态信息、地表辐射值等均易获取,可以通过问卷调查、实地测量温湿度等方式,量化热舒适度,开展探讨 局地三维形态影响热舒适度的机制研究。(2)从城市或区域尺度,探究城市通风廊道对热舒适度的影响。可 以基于城市三维形态(地表粗糙度),识别城市主要通风廊道,量化城市通风特征与热舒适度之间的关系。 (3)解析局地和城市等多尺度三维形态对热舒适度的交互作用和相对重要性,进而探讨城市与局地三维形态 的协同优化模式,为改善城市热舒适度的三维景观规划设计提供理论指导。

参考文献(References):

- [1] 国家统计局. 中国城市统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2000, 2016.
- [2] 宫继萍, 胡远满, 刘淼, 常禹, 布仁仓, 熊在平, 李春林. 城市景观三维扩展及其大气环境效应综述. 生态学杂志, 2015, 34(2): 562-570.
- [3] 贾琦.城市三维空间形态及其热环境效应研究进展.建筑与文化, 2018, (2): 58-59.
- [4] Zheng Z, Zhou W Q, Wang J, Hu X F, Qian Y G. Sixty-year changes in residential landscapes in Beijing: a perspective from both the horizontal (2D) and vertical (3D) dimensions. Remote Sensing, 2017, 9(10): 992.
- [5] Zhou W Q, Wang J, Cadenasso M L. Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation: a comparative study. Remote Sensing of Environment, 2017, 195: 1-12.
- [6] Qian Y G, Zhou W Q, Hu X F, Fu F. The heterogeneity of air temperature in urban residential neighborhoods and its relationship with the surrounding greenspace. Remote Sensing, 2018, 10(6): 965.
- [7] Feng X, Myint S W. Exploring the effect of neighboring land cover pattern on land surface temperature of central building objects. Building and

Environment, 2016, 95: 346-354.

- [8] Srivanit M, Kazunori H. The influence of urban morphology indicators on summer diurnal range of urban climate in Bangkok metropolitan area, Thailand. International Journal of Civil & Environmental Engineering, 2011, 11(5): 34-46.
- [9] Chun B, Guldmann J M. Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 76-88.
- [10] Zheng Z, Zhou W Q, Yan J L, Qian Y G, Wang J, Li W F. The higher, the cooler? Effects of building height on land surface temperatures in residential areas of Beijing. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2019, doi: 10.1016/j.pce.2019.01.008.
- [11] Berger C, Rosentreter J, Voltersen M, Baumgart C, Schmullius C, Hese S. Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature. Remote Sensing of Environment, 2017, 193: 225-243.
- [12] Oke T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. International Journal of Climatology, 1981, 1(3): 237-254.
- [13] Unger J. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. Climate Research, 2004, 27(3): 253-264.
- [14] 陈利顶,孙然好,刘海莲.城市景观格局演变的生态环境效应研究进展.生态学报,2013,33(4):1042-1050.
- [15] Oke T R. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. Geneva: World Meteorological Organization, 2004; 51.
- [16] 王蕾,关燕宁,郭杉,姚武韬,蔡丹路,张春燕,肖寒.城市地表要素的地表能量响应特征及其关系研究.地球信息科学学报,2016,18 (12):1684-1697.
- [17] 许遐祯,郑有飞,尹继福,吴荣军.南京市高温热浪特征及其对人体健康的影响.生态学杂志,2011,30(12):2815-2820.
- [18] Kalkstein L S, Greene J S. An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S. cities and the possible impacts of a climate change. Environmental Health Perspectives, 1997, 105(1): 84-93.
- [19] Whitman S, Good G, Donoghue E R, Benbow N, Shou W Y, Mou S X. Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave. American Journal of Public Health, 1997, 87(9): 1515-1518.
- [20] Yan W Y, Shaker A, El-Ashmawy N. Urban land cover classification using airborne LiDAR data: a review. Remote Sensing of Environment, 2015, 158: 295-310.
- [21] LiDAR Online 2.0. 2019. https://www.lidar-online.com/.
- [22] O'Neil-Dunne J P M, MacFaden S W, Royar A R, Pelletier K C. An object-based system for LiDAR data fusion and feature extraction. Geocarto International, 2013, 28(3): 227-242.
- [23] Open Topography High-Resolution Topography Data and Tools. 2019. http://www.opentopography.org/.
- [24] Ehlers M. 15 Future EO sensors of relevance—integrated perspective for global urban monitoring//Gamba P, Herold M, eds. Global Mapping of Human Settlement: Experiences, Datasets, and Prospects. Boca Raton: CRC Press, 2009: 321-337.
- [25] Freitas S, Catita C, Redweik P, Brito M C. Modelling solar potential in the urban environment: state-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 915-931.
- [26] Jamei E, Rajagopalan P, Seyedmahmoudian M, Jamei Y. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 1002-1017.
- [27] Berger C, Voltersen M, Eckardt R, Eberle J, Heyer T, Salepci N, Hese S, Schmullius C, Tao J Y, Auer S, Bamler R, Ewald K, Gartley M, Jacobson J, Buswell A, Du Q, Pacifici F. Multi-modal and multi-temporal data fusion: outcome of the 2012 GRSS data fusion contest. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(3): 1324-1340.
- [28] Arnfield A J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology, 2003, 23(1): 1-26.
- [29] Svensson M K. Sky view factor analysis-implications for urban air temperature differences. Meteorological Applications, 2004, 11(3): 201-211.
- [30] Oke T R, Johnson G T, Steyn D G, Watson I D. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night part 2: diagnosis of causation. Boundary-Layer Meteorology, 1991, 56(4): 339-358.
- [31] Oke T R. Street design and urban canopy layer climate. Energy and Buildings, 1988, 11(1/3): 103-113.
- [32] Gál T, Lindberg F, Unger J. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 95(1/2): 111-123.
- [33] Grimmond S. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. Geographical Journal, 2007, 173(1): 83-88.
- [34] Gál T, Unger J. An ArcView Extension for SVF Estimation Based on Vector Format 3D Urban Surface Database: User's Manual, Hungary: Department of Climatology and Landscape Ecology. Szeged: University of Szeged, 2008.
- [35] Bourbia F, Boucheriba F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). Renewable Energy, 2010, 35(2): 343-347.
- [36] Nicholson S E. A pollution model for street-level air. Atmospheric Environment, 1975, 9(1): 19-31.
- [37] Ahmad K, Khare M, Chaudhry K K. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(9): 697-717.

- [38] Shashua-Bar L, Hoffman M E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. Energy and Buildings, 2000, 31(3): 221-235.
- [39] Oke T R. Boundary Layer Climates. Hove, United Kingdom: Psychology Press, 1992.
- [40] Xu Y, Ren C, Ma P F, Ho J, Wang W W, Lau K K L, Lin H, Ng E. Urban morphology detection and computation for urban climate research. Landscape and Urban Planning, 2017, 167: 212-224.
- [41] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 370-384.
- [42] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [43] Alavipanah S, Schreyer J, Haase D, Lakes T, Qureshi S. The effect of multi-dimensional indicators on urban thermal conditions. Journal of Cleaner Production, 2018, 177: 115-123.
- [44] Peng F, Wong M S, Ho H C, Nichol J, Chan P W. Reconstruction of historical datasets for analyzing spatiotemporal influence of built environment on urban microclimates across a compact city. Building and Environment, 2017, 123: 649-660.
- [45] Chun B, Guhathakurta S. The impacts of three-dimensional surface characteristics on urban heat islands over the diurnal cycle. The Professional Geographer, 2017, 69(2): 191-202.
- [46] Cai H Y, Xu X L. Impacts of built-up area expansion in 2D and 3D on regional surface temperature. Sustainability, 2017, 9(10): 1862.
- [47] Scarano M, Mancini F. Assessing the relationship between sky view factor and land surface temperature to the spatial resolution. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(23): 6910-6929.
- [48] Givoni B. Climate Considerations in Building and Urban Design. Hoboken: John Wiley & Sons, 1998.
- [49] Chatzidimitriou A, Yannas S. Microctimate development in open urban spaces: The influence of form and materials. Energy and Buildings, 2015, 108: 156-174.
- [50] Oke T R. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment, 1973, 7(8): 769-779.
- [51] Oke T R. Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. Energy and Buildings, 1984, 7(1): 1-10.
- [52] Ong B L. Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning. Landscape and Urban Planning, 2003, 63(4): 197-211.
- [53] Landsberg H E. Man-Made Climatic Changes. Science, 1970, 170(3964): 1265-1274.
- [54] Emmanuel R, Johansson E. Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: the case of Colombo, Sri Lanka. Climate Research, 2006, 30(3): 189-200.
- [55] Shashua-Bar L, Tzamir Y, Hoffman M E. Thermal effects of building geometry and spacing on the urban canopy layer microclimate in a hot-humid climate in summer. International Journal of Climatology, 2004, 24(13): 1729-1742.
- [56] Giannopoulou K, Santamouris M, Livada I, Georgakis C, Caouris Y. The impact of canyon geometry on intra urban and urban: suburban night temperature differences under warm weather conditions. Pure and Applied Geophysics, 2010, 167(11): 1433-1449.
- [57] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93 (12): 1879-1900.
- [58] 张伟. 居住小区绿地布局对微气候影响的模拟研究 [D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [59] 金建伟. 街区尺度室外热环境三维数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [60] Liang W H, Huang J X, Jones P, Wang Q, Hang J. A zonal model for assessing street canyon air temperature of high-density cities. Building and Environment, 2018, 132: 160-169.
- [61] Ca V T, Asaeda T, Abu E M. Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park. Energy and Buildings, 1998, 29(1): 83-92.
- [62] Jauregui E. Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city. Energy and Buildings, 1990-1991, 15(3/4): 457-463.
- [63] LeSage J, Pace K. Introduction to Spatial Econometrics. Boca Raton, FL, United States: CRC Press, 2009.
- [64] Yan H, Fan S X, Guo C X, Wu F, Zhang N, Dong L. Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability: the case of Beijing, China. Building and Environment, 2014, 76: 44-53.
- [65] Yuan C, Chen L. Mitigating urban heat island effects in high-density cities based on sky view factor and urban morphological understanding: a study of Hong Kong. Architectural Science Review, 2011, 54(4): 305-315.
- [66] Shashua-Bar L, Hoffman M E. Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study: urban streets and courtyards with trees. Building and Environment, 2004, 39(9): 1087-1099.
- [67] Elnahas M M. The effects of urban configuration on urban air temperatures. Architectural Science Review, 2003, 46(2): 135-138.
- [68] Knowles R L, Berry R D. Solar Envelope Concepts: Moderate Density Building Applications. Los Angeles: University of Southern California, 1980.
- [69] Ng E, Ren C, Katzschner L. Urban climatic mapping in Hong Kong. Journal of Heat Island Institute International, 2012, 7(2): 55-64.
- [70] Davis A Y, Jung J, Pijanowski B C, Minor E S. Combined vegetation volume and "greenness" affect urban air temperature. Applied Geography, 2016, 71: 106-114.
- [71] Erell E. The application of urban climate research in the design of cities. Advances in Building Energy Research, 2008, 2(1): 95-121.
- [72] Gaitani N, Mihalakakou G, Santamouris M. On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces. Building and Environment, 2007, 42(1): 317-324.
- [73] Tsoka S. Investigating the relationship between urban spaces morphology and local microclimate: a study for Thessaloniki. Procedia Environmental

Sciences, 2017, 38: 674-681.

- [74] Van Esch M M E, Looman R H J, de Bruin-Hordijk G J. The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies. Energy and Buildings, 2012, 47: 189-200.
- [75] Erell E, Pearlmutter D, Williamson T J. Urban Microclimate: Designing the Spaces between Buildings. London, New York: Routledge, 2011.
- [76] Emmanuel R, Rosenlund H, Johansson E. Urban shading—a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. International Journal of Climatology, 2007, 27(14): 1995-2004.
- [77] Perini K, Magliocco A. Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. Urban Forestry & Urban Greening, 2014, 13(3): 495-506.
- [78] Lai A, Maing M, Ng E. Observational studies of mean radiant temperature across different outdoor spaces under shaded conditions in densely built environment. Building and Environment, 2017, 114: 397-409.
- [79] Nunez M. The Energy Balance of an Urban Canvas[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1974.
- [80] Holmer B. A simple operative method for determination of sky view factors in complex urban canyons from fisheye photographs. Meteorologische Zeitschrift, 1992, 1(5): 236-239.
- [81] Watkins R, Palmer J, Kolokotroni M. Increased temperature and intensification of the urban heat island: implications for human comfort and urban design. Built Environment, 2007, 33(1): 85-96.
- [82] Bärring L, Mattsson J O, Lindqvist S. Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmö, Sweden. International Journal of Climatology, 1985, 5(4): 433-444.
- [83] Bottyán Z, Unger J. A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. Theoretical and Applied Climatology, 2003, 75(3/4): 233-243.
- [84] Eliasson I. Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. Atmospheric Environment, 1996, 30(3): 379-392.
- [85] Landsberg H E. The Urban Climate. New York: Academic Press, 1981.
- [86] Carpentieri M, Robins A G. Influence of urban morphology on air flow over building arrays. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 145: 61-74.
- [87] Skote M, Sandberg M, Westerberg U, Claesson L, Johansson A V. Numerical and experimental studies of wind environment in an urban morphology. Atmospheric Environment, 2005, 39(33): 6147-6158.
- [88] Nosek Š, Kukačka L, Kellnerová R, Jurčáková K, Jaňour Z. Ventilation processes in a three-dimensional street canyon. Boundary-Layer Meteorology, 2016, 159(2): 259-284.
- [89] Yang F, Qian F, Lau S S Y. Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: a case study on high-rise housing in Shanghai. Building and Environment, 2013, 70: 122-137.
- [90] Brown R D, Gillespie T J. Estimating radiation received by a person under different species of shade trees. Journal of Arboriculture, 1990, 16(6): 158-161.
- [91] Niachou K, Hassid S, Santamouris M, Livada I. Experimental performance investigation of natural, mechanical and hybrid ventilation in urban environment. Building and Environment, 2008, 43(8): 1373-1382.
- [92] Geros V, Santamouris M, Karatasou S, Tsangrassoulis A, Papanikolaou N. On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment. Energy and Buildings, 2005, 37(3): 243-257.
- [93] Yin H W, Kong F H, Middel A, Dronova I, Xu H L, James P. Cooling effect of direct green façades during hot summer days: an observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data. Building and Environment, 2017, 116: 195-206.
- [94] Kong F H, Yan W J, Zheng G, Yin H W, Cavan G, Zhan W F, Zhang N, Cheng L. Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 217: 22-34.