国家自然科学基金面上项目（编号： 51978363）

项目名称 多源数据融合的城市高温脆弱性空间识别与城市设计策略应对

项目摘要 全球气候变暖与热岛效应增强使得高温热浪天气日益频繁，导致人类面临死亡和健康风险，并对社会经济和自然生态系统产生破坏。通过城市高温脆弱性评价，识别风险空间并提出相应的城市设计缓减策略，是增强城市韧性和提升城市气候适应性的重要途径。但城市高温脆弱性研究在我国尚属起步，主要集中在国家与城市层面，且鲜有对居民健康和适应能力等人本要素的深入考量，因此更小尺度、更细数据、更社会、更设计角度的城市街区高温脆弱性分析与防治研究亟待拓展。课题综合国内外城市高温脆弱性研究的理论与实践前沿，以北京中心城为例，采用多源数据融合手段，从暴露度、敏感度和适应能力三方面构建街道层面的城市高温脆弱性评价框架，以此识别北京中心城区高温脆弱性的空间分布特征。研究进一步以高等级脆弱性街道作为规划设计的优先行动区域，借助局地气候分区、现状调查、问卷访谈与设计分析等，提出基于时空动态的高温热浪城市设计应对措施，以促进城市健康发展和降低气候异常风险。

城市空间形态的热环境效应及其研究进展

THERMAL EFFECTS OF URBAN MORPHOLOGY AND ITS RELATED LITERATURE REVIEW

蔡智 唐燕 | Cai Zhi Tang Yan 收稿日期：2022－09－25

摘要 快速城市化进程导致城市热岛现象越发明显，高温热浪频率明显增加，对城市的健康、稳定和可持续发展造成了巨大冲击，而城市空间形态特征对其热环境效应具有显著影响。因此，本文从高温热浪对人群健康和城市发展的负面影响、城市热环境的影响要素、热环境改善手段三方面入手，综述相关领域的研究进展，为提升气候适应性的人居环境质量改善提供参考。

关键词 城市空间形态； 热环境； 综述； 热脆弱性

Abstract The rapid urbanization has made the urban heat island become a common phenomenon, and the frequency of extreme heat waves has increased significantly, which greatly impacts the healthy, stable and sustainable development of urban areas. The characteristics of urban morphology have a significant impact on its thermal effect. This paper reviews the relevant research progress from three aspects: the negative impact of heat waves on population health and urban development, the influencing elements of the urban thermal environment, and the methods of mitigating the thermal environment, respectively. It can provide a reference for improving the quality of human settlement by improving the climate adaptability.

Keywords urban morphology; thermal environment; review; heat vulnerability

蔡智 清华大学建筑学院博士研究生

唐燕（通讯作者）清华大学建筑学院副教授，yantang@mail.tsinghua.edu.cn

1 引言

高强度、大范围的人工建设及人为活动使得热量在城市区域内集聚，影响了城市的热舒适性[1]，更在一定程度上改变了地球原有生态系统的平衡，使得全球气候变暖、极端气候灾害加剧等生态危机频发[2-3]。近年来，频发的极端气候灾害对城市的健康、稳定发展造成了巨大冲击[4-5]。在气候变暖背景下，海平面温度升高，水分蒸发加速，空气湿度增加，导致台风产生的概率、强度显著增加，持续时间显著延长，大幅增强了台风对沿海地区的破坏力。[6]从地表水分蒸发速率的增加来看，这一方面导致极端暴雨和高温热浪发生的频率和强度不断上升，另一方面导致内陆地区近地表极度干旱，大幅增加了森林火灾的风险。[7-8]美国疾病控制与预防中心的一份研究报告表明，美国于1999至2010年间因热浪而丧生的人数超过了地震、洪涝等其他自然灾害的总和。联合国政府间气候变化专门委员会更是指出[9]，气候变化引发的极端高温天气将成为亚洲地区未来面临的主要风险之一。《中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告》也预测高温热浪将成为我国未来最主要的极端气候灾害之一。[10]因此，如何降低热浪风险、减少气候变化、提升城市韧性成为人们关注的焦点。

我国最早于2007年发布了《中国应对气候变化国家方案》，提出了减缓与适应并重的应对气候变化原则。随后，气候变化相关的研究呈现出井喷式发展趋势。2013年到2017年，我国先后发布了《国家适应气候变化战略》《国家应对气候变化规划（2014—2020年）》《城市适应气候变化行动方案》《气候适应型城市试点工作方案》《气候适应型城市建设试点工作的通知》等政策引导文件，将缓解城市热岛效应列为城市规划的重要目标，并要求在2020年普遍实现将气候变化相关指标纳入城乡规划体系之中，到2030年城市应对高温热浪等灾害能力显著增强。但在实际中，这些行动计划及工作方案中的部分内容至今仍未落实。其中虽然有2018年新一轮国家机构调整带来的影响，但主要原因仍在于相关法律法规的缺位，气候变化影响的监测和评估不足，国家、部门和区域间的组织和协调机制缺乏等[11]。随着国土空间规划体系重构的逐步明晰，将气候相关工作纳入国土空间规划中的导向也日益清楚，气候研究与应用面临新的契机。自然资源部在《市级国土空间总体规划编制指南（试行）》中明确提出，要重视规划实施并针对气候变化进行灾害风险评估。但总体上，具体政策措施和工作思路等方面的缺失，使得我国各项相关工作开展还面临着诸多问题和挑战，迫切需要建立和完善适应气候变化的法律法规体系，加快构建相关政策体系和工作机制的设计。因此，本文从高温热浪对人群健康和城市发展的负面影响、城市热环境的影响要素、热环境改善手段三方面入手，综述相关领域的研究进展。

2 城市高温热浪的负面影响

2.1 城市高温热浪对人群健康的影响

热环境作为评价城市环境质量的重要指标之一，显著影响了人们的健康水平及活动特征（图1）。2003年，欧洲约有7万多人因热浪而丧生。[12]有研究指出，在该死亡人群中，最多的是老年人，尤其是此前有过健康问题[13]、居住在缺乏隔热设施的顶层平房或房车内的老年人[14]。同样，美国疾病预防与控制中心的一项调查研究结果表明[15]，1999至2010年美国因过热死亡的人数达到了8 081人，其中超过1/3是65岁以上的老

(C) 1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

年人。2009年澳大利亚的热浪则直接导致了墨尔本和阿德莱德500多人死亡，分别增加了两个城市62%和10%的人群死亡率。[16]2010年，俄罗斯长达44天的高温热浪导致5.6万人死亡。①Nori-Sarma等人[17]对印度2000至2012年的人群死亡数据展开调查研究，发现在温度超过32.5℃的热浪期间，人口死亡率上升了18.1%。Hong 等人[18]综合气象、空气质量、流行病学模型，预测我国未来因热浪所导致的死亡率会增加6%。

过热的室外环境，会显著减少人们室外健身、步行等活动的频率[19]，进而增加肥胖、心血管、糖尿病等疾病的风险[20]。美国疾病预防与控制中心指出常期暴露在高温环境中，人们窒息、疲惫、抽筋等症状发生的风险显著上升。②高温环境不仅为疟疾、登革热等疾病传播与爆发创造了条件[21]，导致居住在较热地区的人死亡率上升[22]，甚至会影响人的认知能力，致使其学习及思维能力下降[23]。如Yeganeh等人[23]指出，气温在22℃左右时人的认知能力表现最佳。在此基准温度上，当气温上升4℃、10℃、26℃时，人的认知能力分别会下降0.4%、5.37%和7.97%。而舒适的室外热环境不仅有利于人们出行活动，促进健康并增加社会交往的机会[24]，同时室外活动时间的增多，也将显著减少因空调、照明带来的室内建筑能耗需求，引导城市低碳发展。

总体来看，在热环境对城市人群活动及健康影响方面，学者们已进行了深入研究并取得丰硕成果。然而，现有健康城市研究更多从医疗卫生角度进行切入，研究也大多停留在热环境舒适层面。一个健康的城市，不仅仅包括城市人群的身心健康，同样也包括经济、社会、产业等方面的健康、持续、稳定发展，因此健康城市的内涵还有待进一步深化。另外，虽然通过控制热环境来减少疾病发生的频率是最有效而直接的方式，但不可忽视的是，相比于较为稳定、可控的室内空间，室外空间环境、空间尺度更为复杂而多元，更需要综合视野来应对。由于传统的规划学者对城市热环境的关注不足，导致相对薄弱的室外空间热环境健康研究，在日益恶化的城市热环境面前，迫切需要相关理论和实践予以弥补。同时，已往研究虽然揭示了弱势群体对热环境的低抗性，但并没有给出相应的解决对策，尤其是在室外空间层面。因此，作为公共政策的城乡规划在引导规划设计关注弱势群体的需求，保障热环境的公平正义方面，需要进一步强化。

2.2 城市高温热浪对城市发展和全球气候的影响

城市高温热浪的加强会对城市发展和全球气候产生显著影响（图1）。随着高温热浪天气趋于频繁，城市在夏季因空调制冷时长的增加而对能源产生更多需求。Shen 等人[25]指出，在气候变化过程中，气温每升高0.5℃，商业建筑的用电量会增加10%。Akbari等人[26]发现，气温升高会额外导致5%～10%的城市峰值电力消耗。此外，当白天最高温度超过15℃～20℃时，气温每升高1℃，城市电力消费会增加2%～4%。Roxon等人[27]则进一步指出，城市热岛效应对能源消费的影响会因气候区差异而产生不同的作用。如热岛效应会显著增加温暖地区的能源消费，但会减少寒冷地区的能源消耗和碳排放。Hong等人[18]通过模型模拟，发现在未来气候变暖趋势中，我国细颗粒物（PM2.5）浓度增加和臭氧层空洞等情况会持续恶化，并在21世纪中叶将会额外导致2万多人死亡。国际劳工组织的一项研究报告表明[14]，至2100年，热浪将会威胁40亿人的健康，并使得劳动生产率降低2.2%，经济损失达2.4万亿元。此外，在不采取有效缓解措施的情况下，至21世纪末，地球表面温度会大幅升高，部分区域升幅达9℃。气候变暖还会改变海洋洋流的方向，使得全球气候再分布，导致未来部分区域不再宜居。[28]

可以看到城市高温热浪的负面影响不仅仅局限在区域层面，随着高温热浪在全球城市中的普遍性发展，它甚至已经对全球气候产生了一定影响。可以预见的是随着气候变暖的持续，由高温热浪所引发的次生灾害和负面影响将越发明显，其尺度范围也将会扩大。因此，对城市高温热浪和热环境的研究也需要跨区域的合作，将其纳入全球性的气候变化考量当中。

3 城市空间形态与热环境之间的作用及影响机制

3.1 城市能量平衡

要理解城市高温热浪的形成机制，有必要对其基本原理进行说明。根据热力学第一定律，能量既不会无故消失，也能不凭空创造，它始终遵循守恒的原则。对城市而言，输入城市的热量等于以各种形式输出的能量之和（图2）。其地表能量平衡可以用以下公式表达：

$$Q^*+Q_F=Q_H+Q_E+\Delta Q_A+\Delta Q_S \quad (1)$$

式中：Q^*是太阳净辐射，主要指太阳射入城市的总辐射量；Q_F是人为热通量，主要指人口活动过程中释放的热量；Q_H也称感热或湍流热通量，主要指城市内部各物质要素在加热或冷却过程中，不改变其原有状态下所释放或吸收的热量；Q_E是潜热通量，主要指物体在温度不变的情况下，单位面积上的热量交换；ΔQ_A为水平层面上的净热对流，是指通过风和水汽等往周边传导的热量；ΔQ_S是净储存热通量，主要指储存在地面或建筑表面等的热量。

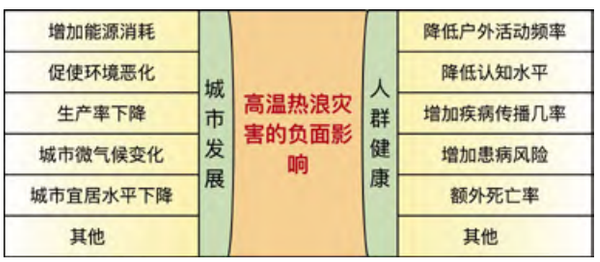
3.2 城市热环境的影响要素

根据公式（1），城市的总热量由太阳辐射和人为热大小所决定；由图2可以看出，因空间形态的差异，城市内部热量的空间分布具有差异性。其具体的影响要素可以分为自然要素、人工物质空间要素、非物质空间等。其中，自然要素主要指气候、风向、自然地形地貌、植被、水体等。[29-32]Zhao等人[33]对美国城市的研究表明，热岛效应在湿润气候区的城市中更为显著，平均强度达到了3℃；而在干旱气候区的城市里，平均热岛强度仅为1.5℃。另外，年平均热岛强度与降水量呈显著正相关，降水量越大，其热岛强度越显著。也有研究指出，地表温度分布受地形影响，如Guo等人[34]指出南坡向由于接受到更多的太阳辐射，其地表温度比北坡向更高。绿地、水体等不仅因其较小的太阳辐射吸收率，成为城市中的“冷岛”，而且其降温冷却作用可以影响附近的地区，提升周边环境的热舒适性[30，35-37]（图3）。

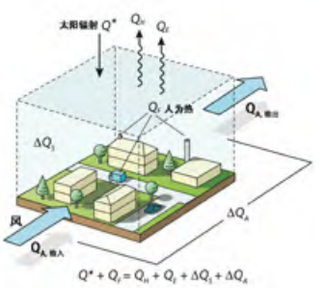
人工物质空间要素主要指土地利用、建筑及其组合形式、城市空间形态（开阔度、粗糙度、建筑密度、容积率）等。[38-40]大量研究表明，快速城市化背景下，自然用地转变为城市建设用地，会导致透水面减少、不透水面增多，这是城市热环境恶化的主要原因之一。[41-43]高密度建筑区域因建筑吸热、通风不畅、热量集聚等原因，导致城市热岛效应更显著。[44-45]此外，高层建筑所产生的“风墙”效应，进一步恶化了城市内部的热环境[46]；城市空间形态也是影响热环境的一个重

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

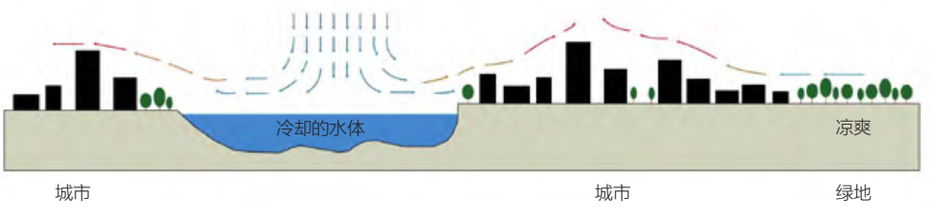
1 高温热浪灾害对人群健康和城市发展的影响
2 城市地表能量平衡
3 夏季上午绿地和水体对周边区域的降温作用



1



2



3

要因素，高密度、大体量的开发通常与地表温度或空气温度呈显著正相关关系[47]。

非物质空间要素主要指人口、资源消耗、产业经济等。[48-49]其中，人口是城市能源消耗的主要推动力，与城市热岛效应强度存在显著正相关关系。[50]工业、交通等活动会消耗更多的能源，进而释放更多的热量。[51]另外，Cai等人[49]基于局地气候区框架，在重庆老城区的研究中发现，老旧小区由于建筑密度高、绿化稀少、改造困难等原因，更容易成为城市中的高温脆弱区域。

4 城市热环境的改善手段

4.1 物质空间形态优化设计

热环境的主要缓解策略可以分为减少热量来源和加快热量交换两种。减少热量来源的主要原理是通过控制或优化城市形态，减少城市地表对太阳辐射的吸收能力，同时降低建筑、交通等对能源的依赖程度，减少人为热量排放。[52]其具体措施包括使用浅色材料铺装[53]，采用屋顶绿化[54]，设计更多的绿地水体等[55]。加快热量交换的基本原理是通过促进空气流通来加快城乡之间的热量传递与交换速度，从而使城市“降温”[55]，具体方式包括优化绿地、水体布局，建设通风廊道[56]、优化建筑及用地布局[57]等。

总的来说，优化物质空间形态是改善城市热环境的最有效手段。世界卫生组织也指出，总体规划与城市形态、绿地空间、交通可达性、城市设计、环境质量是目前健康城市规划的重点内容。[58]由于城市规划与设计能够通过城市建成环境的塑造，对人群健康产生潜在的积极或消极影响[59]，因而对城乡规划决策和项目展开健康影响评估被认为是促进公共健康的重要途径[60]。然而，现有城市热环境研究大多还停留在现象解释、机制探讨等理论层面，对于如何在规划设计中优化城市形态等探索还处于起步阶段，关于规划设计实施后的绩效评估研究亦相对较少，从社会经济、社会制度等综合层面提升居民应对热浪风险的韧性研究更是稀缺。

4.2 规划策略应对

在利用规划策略改善城市热环境及应对气候变化的探索方面，国外有着丰富的经验积累。如法国巴黎在2004年制定了《巴黎气候计划》，以此来改善城市气候，具体策略包括在总体规划层面确立紧凑的空间发展模式，在地方性开发项目中引进“节能与减排”操作程序，鼓励居民绿色出行，制定建筑热能新规范，持续增加绿色空间等。[61]纽约把气候变化问题写入城市规划战略中，并制定了详细的气候指标监测体系和气候目标，推行精明增长理念，紧凑建筑布局，维护和优先发展现有社区，保护开放空间、农田、自然景观，发展绿色地方经济和绿色建筑，多方协调推进气候变化行动等。德国于2008年提出了《适应气候变化的发展战略》，明确了城市规划在气候保护和气候适应中的决定性作用，在相关立法中纳入了气候变化的适应内容。为缓解城市热岛，重点保留绿化带、公园、滨水走廊等作为城市通风走廊。[62]为了缓和夏季城市高温热环境的负面效应，德国、日本等国家还开始绘制城市气候图，从气候学的角度提出可持续城市规划的建议。此外，这些国家还在部门协调与信息共享、资金支持等方面设立了相关保障机制，支持适应气候变化工作的有效开展。尽管北京也开展过相关气候图的绘制，但其主要目的是为了应对大气污染和极端天气影响。

5 结语

综合上述三方面研究进展综述可以发现，目前我国对城市高温热浪风险的研究依然不足，大多集中在城市高温的形成机理和影响要素、高温的空间分布，以及基于物理环境（绿地、水体、风道等）改善的应对策略方面，忽略了高温热浪作用的“人群”对象及其处置措施。事实上，中青年、老年人、儿童、病患等不同人群因身体状况和社会经济条件等的差异，对高温热浪具有不一样的承受和适应力，同时空调设备、医疗设施、社区纳凉资源等方面的拥有情况也显著影响着人们忍受与抵御热浪灾害的能力。因此，未来还需要从更加综合、全面的影响对象、影响要素、改善手段等方面识别城市中的高温脆弱性区域，并根据不地区的脆弱特征提出更加精准化、差异化的应对策略，以全面提升城市应对高温灾害的能力。■

注释

①详情：www. who. int/globalchange/publications/heat-and-health/en。

②详情：www.cdc.gov/vitalsigns/asthma。

(C) 1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献

[1] LIU X P, HUANG Y H, XU X C, et al. High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(7): 1-7.

[2] HANSEN J, RUEDY R, SATO M, et al. Global surface temperature change[J]. Reviews of Geophysics, 2010, 48(4): 14288-14293.

[3] RAYMOND C, HORTON R M, ZSCHEISCHLER J, et al. Understanding and managing connected extreme events[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(7): 611-621.

[4] CORBURN J. Cities, climate change and urban heat island mitigation: localising global environmental science[J]. Urban Studies, 2009, 46(2): 413-427.

[5] VARDOULAKIS S, DIMITROULOPOULOU C, THORNES J, et al. Impact of climate change on the domestic indoor environment and associated health risks in the UK[J]. Environment International, 2015, 85: 299-313.

[6] LI L, CHAKRABORTY P. Slower decay of landfalling hurricanes in a warming world[J]. Nature, 2020, 587(7833): 230-234.

[7] ALEXANDER L, ALLEN S, BINDOFF N L. Climate change 2013: the physical science basis[EB/OL]. (2014-5-14)[2022-08-20]. https://www.researchgate.net/publication/266208027_Climate_change_2013_The_physical_science_basis_in_contribution_of_Working_Group_I_WGI_to_the_Fifth_Assessment_Report_AR5_of_the_Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change_IPCC.

[8] PETOUKHOV V, PETRI S, KORNHUBER K, et al. Alberta wildfire 2016: Apt contribution from anomalous planetary wave dynamics[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-10.

[9] IPCC. Climate change 2014: synthesis report [EB/OL]. (2015-03-20)[2022-08-20] http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.

[10] 秦大河．中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告（精华版）[M]．北京：科学出版社，2015．

[11] 付琳，周泽宇，杨秀．适应气候变化政策机制的国际经验与启示[J]．气候变化研究进展，2020，16（5）：641-651．

[12] ROBINE J M, CHEUNG S L K, LE ROY S, et al. Death toll exceeded 70 000 in Europe during the summer of 2003[J]. Comptes Rendus Biologies, 2008, 331(2): 171-178.

[13] GASPARRINI A, ARMSTRONG B, KOVATS S, et al. The effect of high temperatures on cause-specific mortality in England and Wales[J]. Occup Environ Med, 2012, 69(1): 56-61.

[14] FOUILLET A, REY G, LAURENT F, et al. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France[J]. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2006, 80(1): 16-24.

[15] ELIZABETH P. Living with heat[J]. Science, 2020, 370 (6518): 778-781.

[16] NITSCHKE M, TUCKER G R, HANSEN A L, et al. Impact of two recent extreme heat episodes on morbidity and mortality in Adelaide, South Australia: a case-series analysis[J]. Environmental Health, 2011, 10(1): 42.

[17] NORI-SARMA A, ANDERSON G B, RAJIVA A, et al. The impact of heat waves on mortality in Northwest India [J]. Environmental Research, 2019, 176: 108546.

[18] HONG C P, ZHANG Q, ZHANG Y, et al. Impacts of climate change on future air quality and human health in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(35): 17193-17200.

[19] HUANG J X, ZHOU C B, ZHUO Y B, et al. Outdoor thermal environments and activities in open space: an experiment study in humid subtropical climates[J]. Building and Environment, 2016, 103: 238-249.

[20] DYE C. Health and urban living[J]. Science, 2008, 319(5864): 766-769.

[21] WU X X, LU Y M, ZHOU S, et al. Impact of climate change on human infectious diseases: empirical evidence and human adaptation[J]. Environment International, 2016, 86: 14-23.

[22] SCHINASI L H, BENMARHNIA T, DE ROOS A J. Modification of the association between high ambient temperature and health by urban microclimate indicators: a systematic review and meta-analysis[J]. Environmental Research, 2018, 161: 168-180.

[23] YEGANEH A J, REICHARD G, MCCOY A P, et al. Correlation of ambient air temperature and cognitive performance: a systematic review and meta-analysis [J]. Building and Environment, 2018, 143: 701-716.

[24] ÉGERHÁZI L A, KOVÁCS A, UNGER J. Application of microclimate modelling and onsite survey in planning practice related to an urban microenvironment[J]. Advances in Meteorology, 2013：251586.

[25] SHEN T, CHOW D H C, DARKWA J. Simulating the influence of micro- climatic design on mitigating the urban heat island effect in the Hangzhou metropolitan area of China[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2016, 11(1): 130-139.

[26] AKBARI H, POMERANTZ M, TAHA H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas[J]. Solar Energy, 2001, 70(3): 295-310.

[27] ROXON J, ULM F J, PELLENQ R M. Urban heat island impact on state residential energy cost and CO_2 emissions in the United States[J]. Urban Climate, 2020, 31: 100546.

[28] KANG S, ELTAHIR E A B. North China plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 2894.

[29] SUN R H, CHEN L D. How can urban water bodies designed for climate adaptation[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 105: 27-33.

[30] CAI Z, HAN G F, CHEN M C. Do water bodies play an important role in the relationship between urban form and land surface temperature?[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 39: 487-498.

[31] KROEGER T, MCDONALD R I, BOUCHER T, et al. Where the people are: current trends and future potential targeted investments in urban trees for PM10 and temperature mitigation in 27 US cities[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 177: 227-240.

[32] 蔡智，韩贵锋．山地城市空间形态的地表热环境

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

效应：基于LCZ的视角[J]．山地学报，2018，36（4）：617-627．

[33] 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.

[34] GUO J M, HAN G F, XIE Y S, et al. Exploring the relationships between urban spatial form factors and land surface temperature in mountainous area: a case study in Chongqing city, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 61: 102286.

[35] YANG G Y, YU Z W, JØRGENSEN G, et al. How can urban blue-green space be planned for climate adaption in high-latitude cities? A seasonal perspective[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53: 101932.

[36] 蔡智，唐燕，江伦．中国滨海城市的山水关系及热岛效应对比研究[J]．中国名城，2020（6）：28-33．

[37] 韩贵锋，蔡智．山地城市公园形态对其降温效应的影响[J]．西部人居环境学刊，2016，31（6）：61-68．

[38] XU Y, REN C, MA P, et al. Urban morphology detection and computation for urban climate research[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 167: 212-224.

[39] GUO G H, ZHOU X Q, WU Z F, et al. Characterizing the impact of urban morphology heterogeneity on land surface temperature in Guangzhou, China[J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 84: 427-439.

[40] TONG S S, WONG N H, JUSUF S K, et al. Study on correlation between air temperature and urban morphology parameters in built environment in northern China[J]. Building and Environment, 2018, 127: 239-249.

[41] ZHAO J C, ZHAO X, LIANG S L, et al. Assessing the thermal contributions of urban land cover types [J]. Landscape and Urban Planning, 2020, 204: 103927.

[42] CHEN X L, ZHAO H M, LI P X, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2): 133-46.

[43] 蔡智，唐燕，刘畅，等．三维城市空间形态演进及其地表热岛效应的规划应对：以北京市为例[J]．国际城市规划，2021，36（5）：61-68．

[44] LIANG W H, HUANG J X, JONES P, et al. A zonal model for assessing street canyon air temperature of high-density cities[J]. Building and Environment, 2018, 132: 160-169.

[45] CHEN X L, XU Y, YANG J X, et al. Remote sensing of urban thermal environments within local climate zones: a case study of two high-density subtropical Chinese cities[J]. Urban Climate, 2020, 31: 100568.

[46] WONG M S, NICHOL J E, NG E. A study of the "wall effect" caused by proliferation of high-rise buildings using GIS techniques[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 102(4): 245-253.

[47] 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，2016，38（5）：138-147．

[48] WILSON B. Urban form and residential electricity consumption: evidence from Illinois, USA [J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 115(7): 62-71.

[49] CAI Z, TANG Y, CHEN K, et al. Assessing the heat vulnerability of different local climate zones in the old areas of a Chinese megacity[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 2032.

[50] MANOLI G, FATICHI S, SCHLÄPFER M, et al. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population[J]. Nature, 2019, 573(7772): 55-60.

[51] FENG Y, DU S, MYINT S W, et al. Do urban functional zones affect land surface temperature differently? A case study of Beijing, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(15): 1802.

[52] KOTHARKAR R, RAMESH A, BAGADE A. Urban heat island studies in South Asia: a critical review[J]. Urban Climate, 2018, 24: 1011-1026.

[53] NWAKAIRE C M, ONN C C, YAP S P, et al. Urban heat island studies with emphasis on urban pavements: a review[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 63: 102476.

[54] 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, 162: 106273.

[55] GUNAWARDENA K R, WELLS M J, KERSHAW T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584: 1040-1055.

[56] FERWATI S, SKELHORN C, SHANDAS V, et al. Analysis of urban heat in a corridor environment: the case of Doha, Qatar[J]. Urban Climate, 2018, 24: 692-702.

[57] WU Z F, DOU P F, CHEN L D. Comparative and combinative cooling effects of different spatial arrangements of buildings and trees on microclimate[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51: 101711.

[58] BARTON H, GRANT M. Urban planning for healthy cities: a review of the progress of the european healthy cities programme[J]. Journal of Urban Health-bulletin of the New York Academy of Medicine, 2013, 90(7): 129-141.

[59] 董晶晶，金广君．论健康城市空间的双重属性[J]．城市规划学刊，2009（4）：22-26．

[60] GILES-CORTI B, VERNEZ-MOUDON A, REIS R, et al. City planning and population health: a global challenge[J]. The Lancet, 2016, 388(10062): 2912-2924.

[61] 杨辰．城市规划：一种改善城市气候的工具：巴黎气候计划（PCP）简介[J]．国际城市规划，2013，28（2）：75-80．

[62] 魏薇，秦洛峰．德国适应气候变化与保护气候的城市规划发展实践[J]．规划师，2012，28（11）：123-127．

图片来源

图1、图3：作者绘制

图2：作者依据*Urban climates*一书改绘

(C) 1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net