

城市空间形态对街区热舒适性的影响及优化研究 ——以韩国京畿道为例

Influences of Urban Forms on Block-Level Thermal Comfort and Its Optimization: A Case Study of Gyeonggi-do, South Korea

李英男^{1,2,3} 张宇涵² 周志成¹ 王跃栋¹ 余兆武⁴ 李正兒⁵ 孙华平⁶ 李冠霖^{7,8} 宋泳根^{2*}
LI Yingnan^{1,2,3} ZHANG Yuhuan² ZHOU Zhicheng¹ WANG Yuedong¹ YU Zhaowu⁴ LEE Junga⁵ SUN Huaping⁶ LI Guanlin^{7,8} SONG Youngkeun^{2*}

(1.江苏大学环境设计系, 镇江 212013; 2.首尔国立大学环境大学院, 首尔 08826; 3.高丽大学OJeong复原力研究所, 首尔 02841; 4.复旦大学环境科学与工程系, 上海 200438; 5.高丽大学环境生态工学部, 首尔 02841; 6.北京科技大学经济管理学院, 北京 100083; 7.江苏大学环境与安全工程学院, 镇江 212013; 8.苏州科技大学江苏水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

(1. Department of Environmental Design, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, China, 212013; 2. Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, South Korea, 08826; 3. OJeong Resilience Institute, Korea University, Seoul, South Korea, 02841; 4. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai, China, 200438; 5. Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, South Korea, 02841; 6. School of Economics and Management, University of Science & Technology Beijing, Beijing, China, 100083; 7. School of Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, China, 212013; 8. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu, China, 215009)

文章编号: 1000-0283(2025)02-0042-10
DOI: 10.12193/j.laing.2025.02.0042.005
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-10-15
修回日期: 2024-12-26

摘要

城市化迅速发展、城市空间形态日益多样化的背景下,城市空间形态显著影响室外微气候和热舒适度,这直接关系到人们对室外空间的使用频率。以韩国京畿道的两座典型卫星城为案例,通过实地观测和数值模拟相结合的方法,揭示街区尺度上不同城市空间形态特征(如建筑高度、建筑密度和绿地率)对微气候和热舒适性的影响,并进一步提出相应的优化策略。研究发现,城市空间形态对微气候的季节性影响具有显著的时段性差异:夏季微气候差异在日最高温时段最为显著,冬季则在上午时段尤为突出。热舒适性的主导因素表现出季节性变化,夏季受天空开阔指数和绿地率影响显著,冬季则主要由天空开阔指数和建筑密度决定。此外,天空开阔指数在不同季节对热舒适性的影响方向相反,表明应合理规划建筑密度和开敞空间,以提高全年热舒适性。旨在为城市规划和设计提供科学依据,帮助改善城市热环境,提高居民生活品质。

关键词

城市热环境; 人体热舒适性; 微气候; 生理等效温度

Abstract

In the context of rapid urbanization and increasingly diverse urban forms, urban forms significantly influence outdoor spaces' microclimates and thermal comfort, directly affecting the frequency of people's use of outdoor spaces. This study takes Gyeonggi-do, South Korea, as a case study. Combining on-site measurement with numerical simulations reveals the impact patterns and optimization strategies of microclimate and thermal comfort at the block-level, which are influenced by different urban morphological characteristics such as building height, building density, and green coverage. The research found that the seasonal impact of urban form on microclimate has significant temporal differences: the differences in microclimate during summer are most pronounced during the peak daily temperature, while in winter, they are particularly prominent in the morning. The dominant thermal comfort factors show seasonal changes, with sky view factor (SVF) and green space rate significantly affecting summer comfort. At the same time, in winter, they are mainly determined by the SVF and building density. In addition, the SVF has the opposite impact on thermal comfort in different seasons, indicating that building density and open spaces should be planned reasonably to improve thermal comfort throughout the year. This study provides scientific evidence for urban planning and design, helping to improve urban thermal environments and enhance residents' quality of life.

Keywords

urban thermal environment; human thermal comfort; microclimate; physiological equivalent temperature

基金项目:

国家社会科学基金重点项目“绿色转型视角下中国深度融入全球低碳经济治理机制研究”(编号: 21AZD067); 韩国研究财团项目“基于城市形态的最佳蓝绿空间构建方案: 缓解城市热岛效应的研究”; 韩国京畿道研究院项目“京畿道生物栖息地属性信息分析研究”

李英男

1989年生/女/吉林四平人/博士/副教授、硕士生导师/研究方向为城市热环境评价与优化、城市绿地规划设计、绿地生态系统服务评估

张宇涵

2000年生/男/江苏南京人/在读硕士研究生/研究方向为城市热环境评价与优化、城市规划设计

宋泳根

1979年生/男/韩国首尔人/博士/教授、博士生导师/研究方向为生态景观规划设计、环境生物监测技术应用

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: songyoung@snu.ac.kr

在过去的几十年中,随着全世界城市化进程的加速发展,城市居民显著增多^[1]。据预测,到2050年,全球三分之二的人口将生活在城市区域,进而导致用地面积紧张、能源需求紧张、城市热岛效应显著等问题^[2]。同时,全球变暖加剧了极端高温天气的频发,这不仅可能引起人体的生理不适,还可能影响人们的日常户外活动^[3]。优质的室外热环境可以提高室外空间利用率,降低建筑能耗,提高城市宜居性^[4-6]。因此,有必要实施多方面的策略来减轻城市热岛效应,并提升居民的生活质量,打造更加可持续和有韧性的城市环境。

为缓解城市热岛效应带来的负面影响,改善密集城市地区的室外热环境,观测与分析城市室外空间的微气候变化特征,以及对这些空间进行人体热舒适性评价,是实现城市可持续发展的重要先决条件之一^[7]。研究表明,城市空间的热环境性能与城市形态特征紧密相关,这些特征包括城市几何形态(如建筑高度、街道宽度)、地表覆盖类型(如绿地率、地表渗透性)以及建筑材料特性(如热性能、表面反射率)。在这些因素中,城市几何形态和地表覆盖类型的影响尤为显著^[8-9]。例如,Oke等^[10]提出,街道的纵横比(H/W)、天空开阔指数(Sky View Factor, SVF)和街道方向等因素对城市微气候有显著影响。具有较高街道纵横比和较低天空视野因子的城市环境有利于提高夏季行人的热舒适性,而街道的朝向直接影响太阳辐射的接收范围。例如,北南向(North-South, NS)的街道因其形成阴影范围较大,在夏季可提供更多舒适的空间,而东西向(East-West, EW)的街道由于高度暴露于阳光下而更为炎热^[11]。还有研究指出,在不同气候条件下,街道设计需要特别考虑。例如,德国弗

赖堡和中国的研究对比显示,不同朝向的街道由于其特定的遮阴条件和太阳辐射接收量的差异,表现出不同的热舒适度^[12-13]。

探索城市形态在街区尺度下对于改善城市居住环境和行人舒适度具有重要意义。通过精确的城市设计,可以优化街区的热环境,进而提高城市区域的整体宜居性和环境质量。尽管现有研究已经揭示了一些城市形态特征对热环境的影响,但仍存在以下不足:(1)探讨城市形态对热舒适性的影响时主要集中于城市的二维形态结构,而对于三维形态指标的系统性分析相对不足^[14-15]。(2)缺乏对季节性微气候变化的综合考量,多聚焦于夏季热环境,对冬季低温条件下城市形态如何影响人体热舒适的研究相对较少,这限制了研究结果在不同季节设计需求中的全面适用性。综上,本研究旨在观测街道尺度下不同形态的城市空间在冬夏两季的微气候和热舒适变化,并进一步识别对热舒适产生显著影响的城市形态特征指标。研究地点为韩国京畿道的果川市和义王市,选择其典型的城市场空间作为具体分析样本,通过结合实地气象监测和数值化模型模拟观测微气候变化,计算人体热舒适性指数。研究旨在为构建气候适应性城市提供科学依据,同时为可持续城市规划和城市发展提供实际指导和支持。

1 研究区概况

1.1 韩国京畿道

果川市和义王市,作为韩国首都首尔特别市的两座关键卫星城市,发挥着承接首尔市经济与文化辐射的重要作用(图1)。果川市在20世纪80年代进行了重大城市规划和城市发展,特别是在1986年,为了减轻首尔市的行政负担,多个政府部门迁移到果川市。这一

举措显著推动了果川市城市基础设施和住宅区的发展,使其成为京畿道内的一个重要行政中心。义王市则是在20世纪中后期随着韩国经济的快速增长开始发展为一个重要的工业基地。其地理位置优越,靠近首尔,成为物流和运输的枢纽。此外,义王市在工业发展的同时,也致力于改善居民的生活和文化设施。目前,这两个城市拥有发达的城市基础设施和住宅环境,形成多样化的城市形态空间,为本研究选择样地提供了良好条件。

1.2 城市空间形态分类

城市形态学(Urban Morphology)是由地理学、建筑学和社会学共同构筑的多学科交叉研究领域,城市形态主要包含城市的几何布局、空间结构组织以及功能关系等^[16]。本文所讨论的空间形态主要是指能对热环境产生直接影响的物质形态。根据文献回顾发现,在以往的研究中,建筑高度、建筑密度、绿地率、天空开阔指数、建筑高度标准差、容积率等城市形态参数被广泛认为是分析城市微气候、城市热岛效应以及建筑能耗影响的主要指标^[17-19]。同时,在制定局地气候区(Local Climate Zone, LCZ)方案时,这些参数也是构建参考标准的关键因子^[20]。因此,本研究选用以上6种城市形态指标描述城市空间的三维特征。在选定具体样本空间时,对这两座城市的主要中心城市区域进行200 m×200 m街区尺度的样方划分(图1),系统收集每个样方内各城市空间形态参数的相关信息,基于样地特征对其进行统计和分类。

对样地进行的具体分类包括用地性质、建筑高度、建筑密度、绿地率。本研究的用地性质包含住宅建筑和公共建筑。建筑高度、建筑密度、绿地率的分类参照了Zhu等^[21]

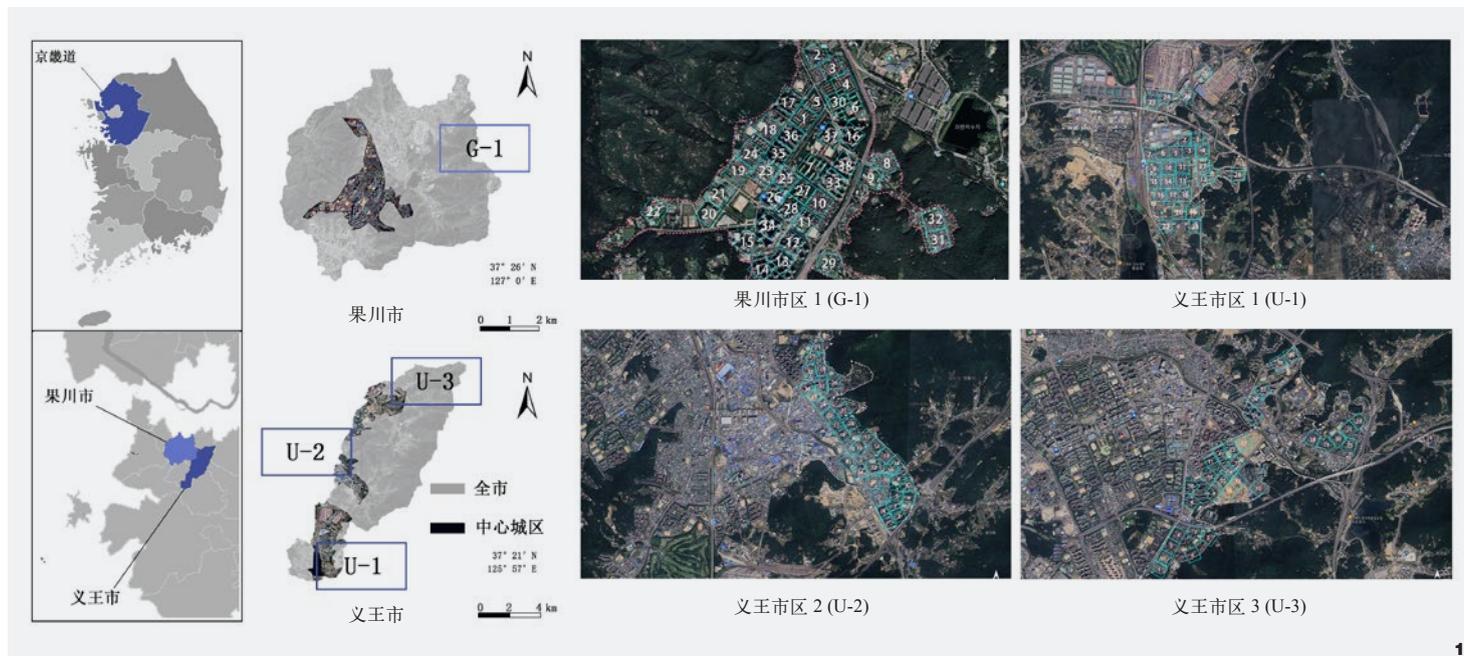


图1 研究区域及样地划分
Fig. 1 Study area and sample plots

研究提出的城市形态分类方法，具体为：在建筑高度上，高于24 m被定义为高层建筑，低于24 m为低层建筑；在定义建筑密度上，计算所有街区的建筑密度，并使用其中位数作为界定高密度和低密度街区的临界值。此外，还对研究区域及其在各个样本区域的绿

地率进行统计分析。绿地率高于中位数的街区被定义为高绿地率街区，反之亦然。该方法可以更好地根据不同城市的特征对其空间形态进行分类。通过以上步骤，共得到30块公共建筑样本与101块住宅区域。在针对每种用地性质选择不同的建筑高度、建筑密度、

绿地率分类的样地过程中，由于实地条件所限，部分类型在实际场地中无法找到。因此，最后得出10种城市空间形态，并在每种形态中选择一块具有代表性的样地作为观测样本（图2，表1），其余样本则用来分析对热舒适产生影响的**城市空间形态要素。

表1 城市空间样本特征参数
Tab. 1 Characteristic parameters of urban space samples

城市形态分类 Urban morphology	建筑高度 /m Building height	建筑密度 /% Building density	绿地率 /% Green ratio	天空开阔指数 Sky visibility factor	建筑高度标准差 /m Standard deviation of building height	容积率 Floor area ratio
P-H-D-S	88.00	0.28	3.23	0.61	36.41	4.02
P-H-T-S	41.50	0.14	6.45	0.70	16.90	3.00
R-H-D-S	30.86	0.26	11.54	0.55	17.38	2.28
R-H-T-S	33.66	0.18	13.83	0.32	16.09	3.07
R-H-T-G	50.00	0.17	53.28	0.24	12.65	1.07
P-L-D-S	14.57	0.25	14.69	0.55	4.40	0.3
R-L-D-S	8.44	0.34	15.63	0.65	1.84	0.87
P-L-T-S	18.00	0.17	16.84	0.52	4.99	0.34
R-L-D-G	12.69	0.34	22.26	0.48	7.32	0.58
P-L-T-G	13.38	0.16	28.44	0.39	9.33	0.42

2 研究方法

2.1 实地气象监测

本研究实地气象监测使用的仪器包括 Watchdog 2550 微型气象站 (Spectrum Technologies 股份有限公司, USA) 和 TR-72wf 温湿度记录仪 (T&D Corporation, Japan) (表2)。TR-72wf 温湿度记录仪采用百叶箱进行屏蔽, 以避免阳光直射。在进行现场测量之前, 对仪器进行校准, 所有仪器首先被放置在相同的环境中, 然后根据每种仪器之间的差异进行调整。当不同仪器之间的空气温度和相对湿度的平均差异分别小于 0.3°C 和 5% 时, 校准结束。在设置监测样点的过程时考虑了空间形态的多

样性, 监测点覆盖开敞区、半开敞区以及绿地等, 每个样地至少包含一个监测点以用于模型的校验。气象监测仪器高度设置为距地面 2 m, 实地气象监测分别选择当地夏冬的典型气象日 (2022 年 7 月 30 日和 2023 年 1 月 24 日), 监测日为晴天。

2.2 城市微气候模拟

本研究利用 ENVI-met 5.6 模拟室外热环境, 该模型已被广泛用于模拟城市空间的微气候变化^[22,24]。为提高模拟的精准度, 对实际场地的空间形态特征进行调研和测量, 并将研究区域建为三维 (3D) 模型。每个模型覆盖

150 个 × 150 个网格的水平区域, 网格分辨率均为 2 m。模拟时每个场景使用相同的输入气象数据, 以避免背景气候不同对研究结果产生影响。每个模型模拟 24 h, 并只针对日间气候模拟数据进行分析。这是由于城市微气候的研究通常聚焦于较小的水平尺度和较短的时间尺度, 具体来说, 水平范围一般不超过 1 000 m, 而时间尺度则选择典型气象日的 24 h 之内。这样的研究尺度有助于更精确地理解和预测城市环境中的气候条件^[25,26]。表 3 给出了模拟输入参数的详细信息。

2.3 人体热舒适性指数

本项研究使用生理等效温度 (Physiological Equivalent Temperature, PET) 来评价人体热舒适性, 该指标是一个描述人体热感知的人类生物气象学参数, 是由德国气象学家彼得·霍佩 (Peter Höppe) 及其同事在 20 世纪 90 年代提出的^[27]。该指数被定义为在典型室内环境 (空气温度 = 平均辐射温度, 相对湿度 = 50%, 风速 = 0.1 m/s), 人体热量收支与复杂室外条件下的核心体温和皮肤温度达到热

表2 实地气象监测所用仪器
Tab. 2 Instruments for on-site meteorological measurement

仪器型号 Measurement instruments	监测参数 Parameter measured	仪器精准度 Instrument accuracy
Watchdog 2550	风速、风向	±3 km/h、±3°
	空气温度	±0.3°C
	相对湿度	±3%
	露点	±2°C
TR-72wf	空气温度	±0.3°C
	相对湿度	±5%

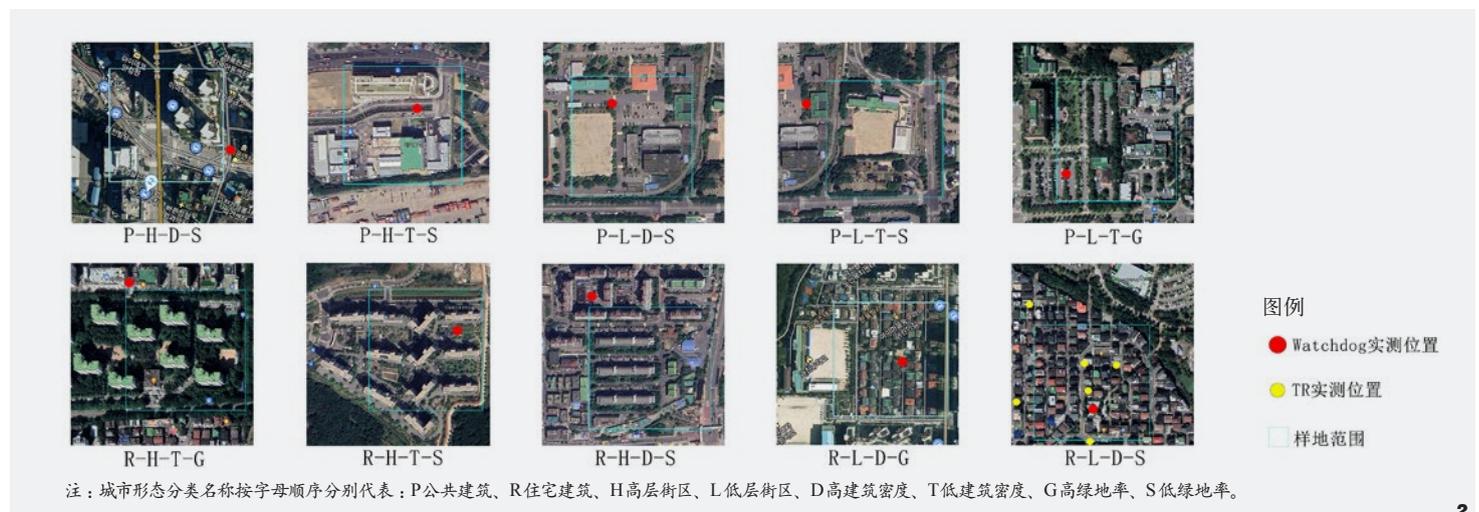


图2 典型城市空间形态样本
Fig. 2 Selected sample plots of typical urban forms

表3 ENVI-met初始设定天气参数
Tab. 3 Initial input data for setting ENVI-met

参数 Parameter	夏季输入值 Summer input data	冬季输入值 Winter input data
起始时间	0:00	0:00
模拟时长 /h	24	24
初始温度 /℃	25.7	-6.2
10 m 高度风速 / (m/s)	0.74	4.03
风向 /°	120.92	306.14
2 500 m 高绝对湿度 /%	8	8
2 m 高相对湿度 /%	74.1	46.6

平衡的空气温度。其基于慕尼黑个人能量平衡模型，并结合了人类适应户外气候条件的生理热调节过程^[26]。该指数综合考虑了主要气象参数、人的活动状态、服装耐热性和舒适度个体参数的影响，以及短波和长波辐射通量对室外环境中身体热量平衡的影响，与其他热舒适指数相比，更适合并已广泛应用于评估室外热舒适^[29-30]。此外，PET的单位为℃，使非人类生物气象学领域的学者更容易解释结果。PET有9个等级，每个等级的范围应根据研究地点的具体情况，适配于当地居民的实际感受。根据前人研究，PET在该区域的适应结果是非常热(>42℃)、热(38℃~42℃)、

温暖(34℃~38℃)、微温(30℃~34℃)、中性(26℃~30℃)、微冷(22℃~26℃)、凉爽(18℃~22℃)、寒冷(14℃~18℃)和非常冷(≤14℃)^[31]。

3 结果分析

3.1 数值化模型验证

为验证模型模拟的准确性，本研究将ENVI-met模型模拟的空气温度与实地监测值进行对比，并通过均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)分析测量数据和模拟数据之间的差异。RMSE是模拟和实际观测之间的平方差的平均值的平方根，当均方根误差越倾向

于0表明模型精准度越高。研究分别对R-L-D-S、R-H-T-G、R-H-D-S、P-H-D-S 4块样地的数据进行校验。结果发现所有测点在测量结果和模拟结果之间都存在很强的相关性，所有R²均超过0.9(图3)，这表明该模型能够很好地模拟真实状况。同时，4块样地的RMSE值均小于0.35，意味着模型与参数值或理论模型的偏差较小。基于这些验证结果，可以判定ENVI-met能够为复杂的城市热环境变化提供合理的模拟预测。

3.2 近地面空气温度变化

图4展示了不同城市形态空间的日平均温度变化模拟值，观测高度为1.4 m，代表了人类活动的主要空间范围。在夏季，各样地的空气温度从早上逐渐上升，最高温度集中在下午2点至4点。在所有时间段中，高层区的P-H-T-S温度始终最高，R-H-T-G温度始终最低，R-H-D-S的温度分布变化最大；在低层区，各样地之间的温度差较小，温度分布变化幅度也相似。在冬季，最高温度均出现在下午2点，各样地的日温度变化幅度较小，日最高温度和最低温度的差值均小于2℃。此外，在冬季，各样地之间的温度差值在早上更为明显，而在下午最高温时这种差值最小。

3.3 热舒适性的分布特征分析

图5为Biomet模块导出的夏冬两季典型气象日中最热时段各样地的PET值分布图。通过对比分析图可知，在夏季，PET较高的值多出现在高层区且绿地率较低的空间中，尤其是P-H-D-S和P-H-T-S样地中，由于绿地率均小于10%，在开敞空间中出现大面积热不舒适区域，PET最高值超过50℃。其他高层样地随着绿地率的增加大部分空间PET值降低，特

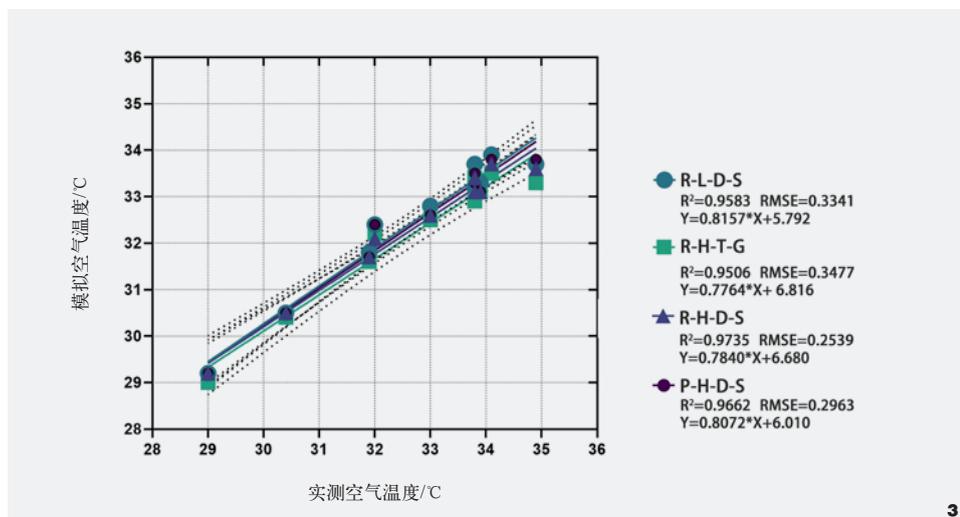


图3 ENVI-met模型验证结果
Fig. 3 Validation results for ENVI-met

别是绿地率达到53.28%的R-HT-G样地,大部分区域PET值低于40℃。同时,也进一步发现R-HT-G样地中迎向太阳入射方向的建筑物附近出现PET值较高的不舒适区域,但是建筑方向不与太阳入射角垂直的R-HT-S样地则未出现类似现象。在低层区中PET值较高的区域成分散的形式出现在建筑四周,同样在绿地率最多的样地中PET值显著降低。在冬季,当PET值较高时代表空间更为舒适。从图5-b可以看出,该季节各样地之间PET值差异较小,较为舒适的区域多出现在有开敞空间的高层区,以及建筑密度高的低层区R-L-D-S样地。

3.4 热舒适性评价

图6展示了夏冬两季最热时间段各样地的PET值不同舒适等级分类在样地的占比情况。在夏季,高层样地R-HT-G由于绿地率最高,“温暖”等级区域占比也最多(67.44%),适宜居民进行室外活动;而P-HT-S次之,其“温暖”等级区域为31.32%。低层样地中,虽然大部分区域处于“热”等级,但绿地率最高的P-L-T-G样地的“非常热”等级区域面积较少(42.80%),而其他低层区的“非常热”等级区域占比均超过一半。在冬季,因为所有样地均处于“非常冷”等级,本研究进一步按每4℃为一个等级进行划分。结果显示,冬季各样地之间的热舒适状况差异不大。绿地率最低的高层建筑P-H-D-S的低温区域占比相对较少,而其他样地 $>6^{\circ}\text{C}$ 的面积均小于10%。

3.5 热舒适性影响要素分析

本研究利用皮尔森系数进一步探索了各城市空间形态参数与PET值的相关性,如图7所示。结果表明,在夏季,与PET相关性最大参数为天空开阔指数(0.93),其次为绿地

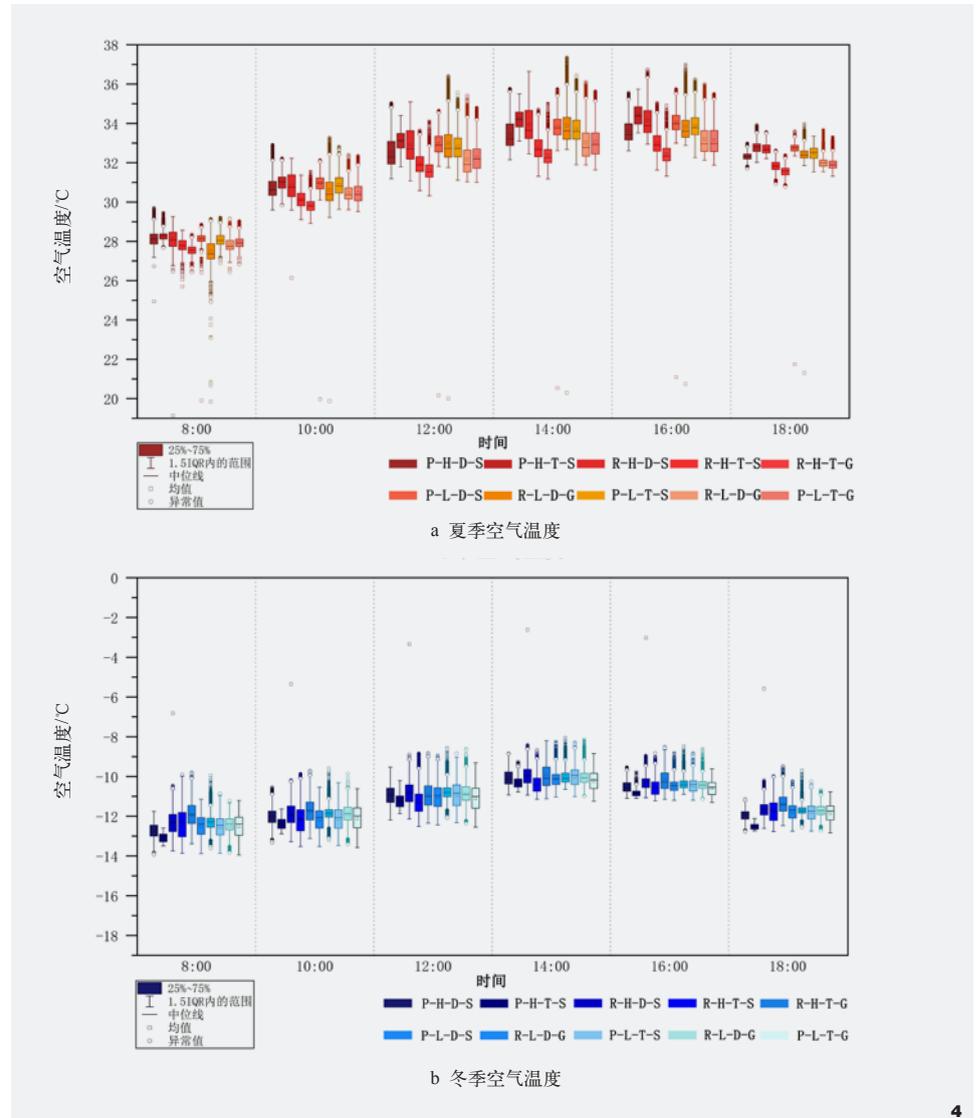


图4 不同城市空间形态样地的近地面平均空气温度日变化

Fig. 4 Daily variation of average air temperature for each sample plot of different urban forms

率(-0.76)。其中,天空开阔指数与其为正相关,天空开阔指数越大,越会导致空间的热舒适恶化,而绿地率与PET呈负相关,证明其可缓解改善场地的热舒适性。在冬季,与PET相关性最大参数同样为天空开阔指数(0.73),其次是建筑密度(0.72)。两项参数均与PET为正相关,说明其有助于冬季保暖。此外,绿地率与PET呈负相关,但是相关系

数值较小,说明该地区植物在冬季对热舒适的影响较小。以上结果证明,适宜的天空开阔指数和建筑密度调控可显著提升冬季室外空间的热舒适性。

4 讨论

4.1 城市空间形态特征对热舒适性的影响

本研究结果表明,城市空间形态特征

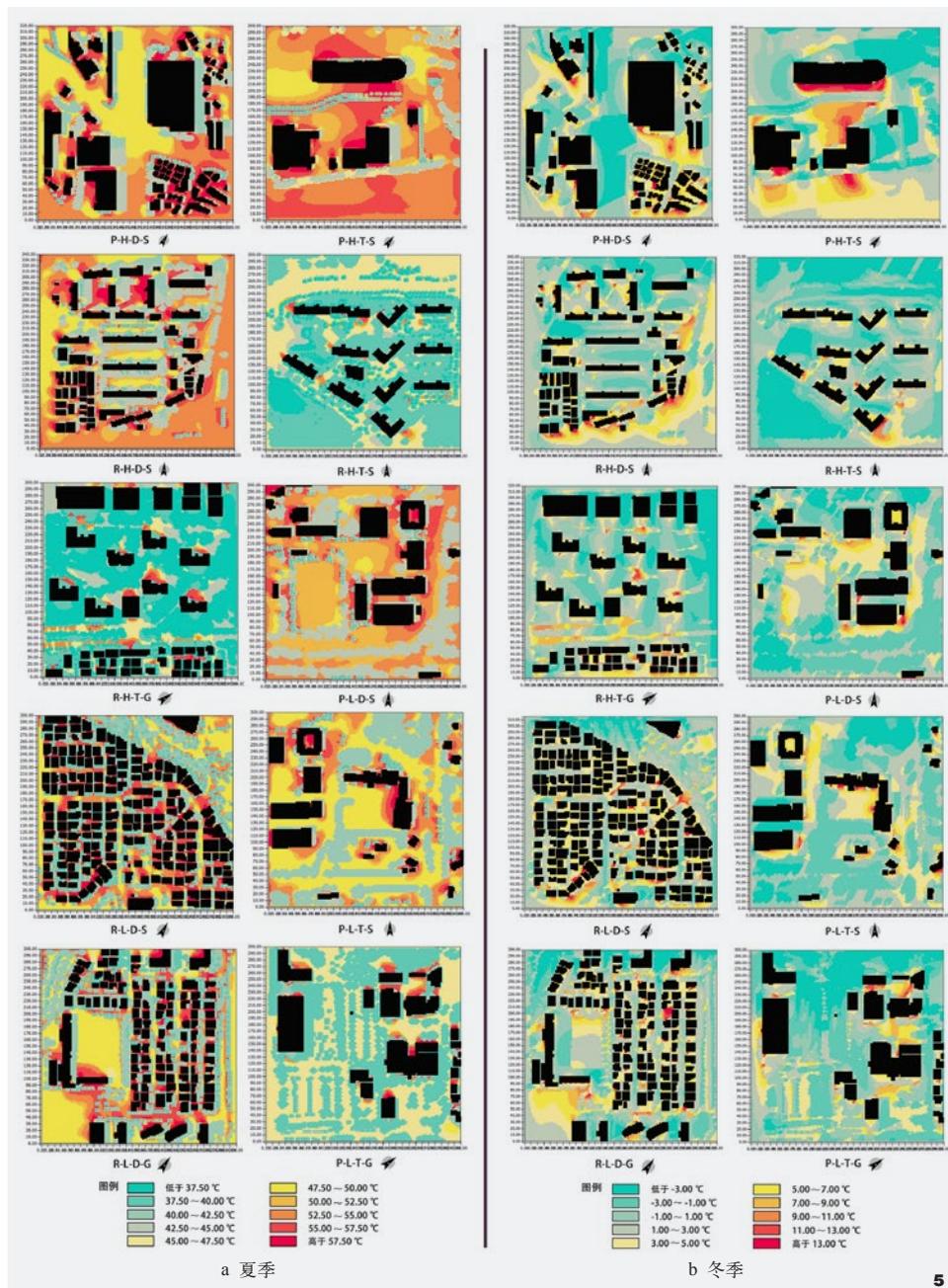


图5 最热时段热舒适指数PET值分布图
Fig. 5 Distribution map of PET during the hottest period

对热舒适性有显著影响。夏季，高层建筑区域的PET值较高，特别是在绿地率低的地区，如P-H-D-S和P-H-T-S样地。这些区域的开敞空间中绿地率低，导致热舒适度较差，与前人

的研究结果相符。例如，Krayenhoff等^[32]的研究表明，建筑密度高、绿地率低的市区区域更容易形成热岛效应。当增加中高层居住小区绿地率时能够有效降低PET值，如在夏季

R-H-T-G比R-H-T-S样地“温暖”等级区域高超过30%，即前者舒适范围更大。这一结论与Li等^[7]研究相似，其指出城市绿地对缓解人体热舒适的重要作用。本研究进一步发现，天空开阔指数和建筑密度是影响热舒适性的主要因素。在夏季，天空开阔指数和建筑密度与PET值呈正相关，而绿地率呈负相关。这与Kim等^[33]的研究一致，他们在模拟中发现，增加天空开阔指数和建筑密度会提高局部温度。然而，冬季的热舒适性评价结果显示，各样地之间的PET值差异较小，较为舒适的区域多出现在有开敞空间的高层区以及建筑密度较低的低层区(图5)。这表明通过合理规划建筑密度和开敞空间，可以提高冬季的热舒适性，减少居民对供暖系统的依赖，实现节能减排。这与Darbani等^[34]的研究结果相吻合，他们指出建筑物之间的间距和开敞空间对冬季的热舒适性具有重要影响。这些发现强调了城市设计中考虑季节性变化的重要性，以及通过微气候设计来调节城市热环境的潜力。通过综合考虑这些因素，城市规划者可以设计出既适应夏季降温需求，又能满足冬季保温需求的城市空间，从而提高城市居民的整体热舒适性，促进城市的可持续发展。

4.2 热舒适评价在城市设计中的应用与意义

本研究的发现对城市规划和设计具有重要的实践意义。(1) 可结合城市空间形态特征提出多层次的设计策略。依据不同城市空间的功能和形态差异，有针对性地制定热舒适性提升方案。例如，在高密度建筑区，可通过增加垂直绿化、屋顶花园或引入空中廊道，以改善空气流通和遮阳效果，降低局部热负荷；在低密度住宅区，规划应强调绿地分布与城市风道设计，以增强通风和自然

散热。(2) 需将热舒适性评价融入相关城市规划和设计指南。当前的设计指南虽然已经包含节能和可持续发展等方面的要求，但热舒适性评价仍未得到系统性的应用。考虑到城市热环境对居民健康和生活质量的深远影响，建议在规划设计过程中，明确提出对热舒适性的评估要求。这种评估不仅应通过具体的设计策略来优化城市微气候，还应结合动态的热舒适性指标，确保不同类型的项目在规划阶段就能提供最佳的热环境。这一措施可通过精细化的设计手段提升城市的宜居性，尤其是在极端气候条件下，保障行人和居民的舒适与安全。(3) 提升动态适应性设计与跨尺度热舒适性管理。面对气候变化和极端天气（如热浪、寒潮）的挑战，城市规划设计应具备灵活的适应性。结合动态气候模型和城市形态特征，规划者可设计适应季节和气候变化的空间与设施，如灵活使用可移动遮阳设施、临时水体降温系统，或季节性绿化设计。通过引入智能城市技术，实时监控空气温度、湿度、风速等关键气候参数，城市规划可根据实际气候条件进行动态调整，确保从街道到城市尺度的热舒适性优化，实现长效的可持续发展。

这些实践建议为城市设计提供了具体的操作方向，有助于打造更加宜居和可持续的城市环境。通过合理规划和设计，可以有效改善城市热环境，提高居民生活质量和健康水平。研究韩国城市的经验对中国城市有重要的借鉴意义。特别是，中国关于城市热环境的相关研究中，多集中在以东部和中部发达城市为主的的城市尺度，以经济圈为主的局地尺度研究偏少，在以后的研究中应重视城市尺度和局地尺度的实证研究^[35-36]。通过对比中国现有的相关研究发现，由于研究关注的样地特征不同，得

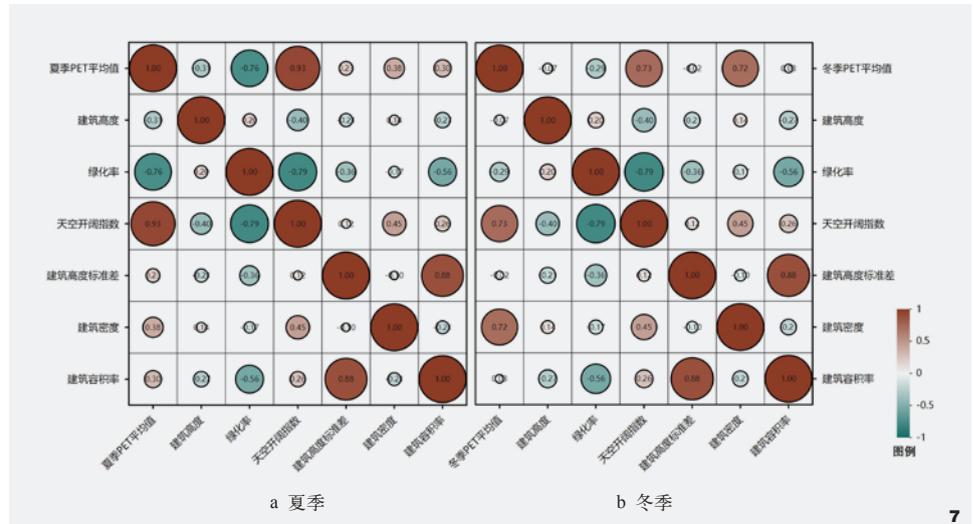
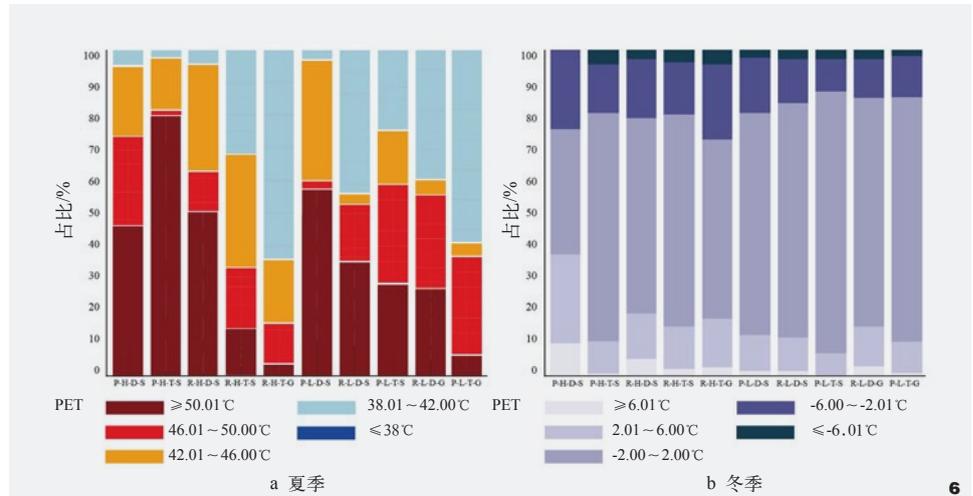


图6 不同等级PET值占总样本空间面积比例图
Fig. 6 Percentage of the area with different PET classifications in each sample plot

图7 城市空间形态参数与PET平均值之间的相关性
Fig. 7 Correlation between urban form parameters and PET average values

出的结论也会有所差异。例如，在中国的相关研究关注新型居住区时，发现在中高层居住区增加绿地率可以有效降低PET^[7]。而在本研究中，R-L-D-S和R-L-D-G这两种韩国特有的低层密集住宅（韩国独栋）区，增加绿地率对提升热舒适度的效果并不明显。因此，对于这类区域，需要进一步探索除了增加绿化之外的其他方法来提升热舒适度。这一发现为当前愈发重视城市更新的中国，

提供了宝贵的参考和深入的思考，特别是在探索如何通过非绿化手段来改善城市热舒适度方面。

4.3 研究的局限性和未来展望

尽管本研究提供了重要的发现，但仍存在一些局限性。(1) 研究仅基于韩国京畿道的果川市和义王市，样本范围有限，不能完全代表其他地区的城市形态特征和热舒适性

状况, 因此在应用本研究结论时需考虑地域差异。(2) 研究主要采用实地气象监测和数值化微气候模拟, 未来可以结合更多的实地测量数据和长期气候变化模型, 以提高研究的准确性和广泛适用性。

未来的研究可以进一步探讨不同绿化方式(如垂直绿化、屋顶花园等)对城市热舒适性的影响, 并研究不同城市形态在应对极端气候事件中的表现, 为城市规划提供更科学的依据。特别是, 进一步研究绿地配置和城市密度的最优组合, 以找到既能提高热舒适性又能实现土地高效利用的方法。

韩国和中国在城市化进程中面临的挑战具有相似性, 通过比较研究两国的城市形态与热舒适性, 可以提供更多的实证数据, 帮助制定更科学的城市规划政策。未来, 跨国合作和数据共享将进一步推动城市热环境研究, 为全球城市的可持续发展提供宝贵的经验和指导。

5 结论

本研究通过对京畿道不同城市空间形态在冬季和夏季的热舒适性进行评价, 得出了一些重要的结论, 这些结论可为城市规划与设计提供科学依据。

(1) 城市空间形态对微气候及热舒适性的季节性影响: 城市空间形态对微气候的影响在不同季节的日变化中表现出明显的时段性差异, 其中夏季, 微气候差异在日最高温时段最为显著, 体现为不同城市空间形态间明显的温度梯度; 而冬季, 这种差异在日最高温时段相对较小, 却在上午时段尤为突出。同时, 空气温度和PET在不同形态空间内的变化特征表明, 探讨热舒适需综合多维热舒适指标进行动态观测。

(2) 热舒适性的季节性主导因素分析:

夏季的热舒适性主要受天空开阔指数和绿地率的影响, 其中绿地率通过降温作用可以显著提升热舒适水平; 而冬季则主要受天空开阔指数和建筑密度的影响, 建筑密度在阻挡寒冷气流方面起到重要作用。

(3) 城市空间形态指标的优化策略: 天空开阔指数在夏季和冬季对热舒适性的作用存在相反效应, 夏季表现为天空开阔指数较低的环境更有利于遮阳降温; 而冬季则表现为天空开阔指数较高的环境更有利于获取日照热量。因此, 为提升全年热舒适性, 应在规划过程中结合建筑密度和开放空间的布局, 针对不同季节需求进行动态优化设计。

研究不同城市形态空间在冬季和夏季的热舒适性对城市规划、公共健康管理以及可持续发展具有重要意义。这可以帮助城市规划和设计师优化城市设计, 如街道布局和绿化, 以改善空气流通和遮阳, 提升居民的生活质量。通过降低极端温度的影响, 减少居民对空调和供暖系统的使用, 进而达到节能减排的目的。此外, 优化热舒适性还能减少与温度相关的健康问题, 如中暑和冬季低温病, 从而提升公共健康。 

注: 文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] ANESTIS G, STATHAKIS D. Urbanization Trends from Global to the Local Scale[M]. Amsterdam: Elsevier, 2024.

[2] NATIONS U. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights. Department of Economic and Social Affairs[M]. New York: Department of Economic and Social Affairs, United Nations, 2014.

[3] 刘梦莹, 杨春侠, 范兆祥. 城市空间微气候与人群行为关系的研究综述与展望[J]. 风景园林, 2022, 29: 121-127.

[4] GAMERO-SALINAS J, KISHNANI N, MONGE-BARRIO A, et al. The Influence of Building Form

Variables on the Environmental Performance of Semi-outdoor Spaces: A Study in Mid-rise and High-rise Buildings of Singapore[J]. Energy Buildings, 2021, 230: 110544.

[5] YU H, ZHANG H, QIU L, et al. Evaluation of Renovation Strategies for Existing Residential Districts in Shanghai Based on Coupling Calculation of Microclimate and Energy Consumption[J]. Energy and Buildings, 2023, 298: 113569.

[6] 吴志丰, 陈利顶. 热舒适度评价与城市热环境研究: 现状、特点与展望[J]. 生态学杂志, 2016, 35: 1364-1371.

[7] LI Y, LIN D, ZHANG Y, et al. Quantifying Tree Canopy Coverage Threshold of Typical Residential Quarters Considering Human Thermal Comfort and Heat Dynamics Under Extreme Heat[J]. Building and Environment, 2023, 233: 110100.

[8] NASROLLAHI N, NAMAZI Y, TALEGHANI M. The Effect of Urban Shading and Canyon Geometry on Outdoor Thermal Comfort in Hot Climates: A Case Study of Ahvaz, Iran[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 65: 102638.

[9] 陈方丽. 基于局地气候分区的成都市形态分类样本及其热环境差异性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.

[10] OKE T R. Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations[J]. Journal of Climatology, 1981, 1: 237-254.

[11] PENG F, XIONG Y, ZOU B. Identifying the Optimal Travel Path Based on Shading Effect at Pedestrian Level in Cool and Hot Climates[J]. Urban Climate, 2021, 40: 100988.

[12] LEE H, MAYER H, CHEN L. Contribution of Trees and Grasslands to the Mitigation of Human Heat Stress in a Residential District of Freiburg, Southwest Germany[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 148: 37-50.

[13] ZHANG Y, DU X, SHI Y. Effects of Street Canyon Design on Pedestrian Thermal Comfort in the Hot-humid Area of China[J]. International Journal of Biometeorology, 2017, 61: 1421-1432.

[14] QIAO W, WANG Y, JI Q, et al. Analysis of the Evolution of Urban Three-dimensional Morphology: The Case of Nanjing City, China[J]. Journal of Maps, 2019, 15: 30-38.

[15] YAN H, WANG K, LIN T, et al. The Challenge of the Urban Compact Form: Three-dimensional Index Construction and Urban Land Surface Temperature Impacts[J]. Remote Sensing, 2021, 13: 1067.

[16] OLIVEIRA V. Urban Morphology: An Introduction

- to the Study of the Physical Form of Cities[M]. Cham: Springer, 2016.
- [17] BANSAL P, QUAN S J. Examining Temporally Varying Nonlinear Effects of Urban Form on Urban Heat Island Using Explainable Machine Learning: A Case of Seoul[J]. *Building and Environment*, 2024, 247: 110957.
- [18] SONG Z, WANG Y, LI J, et al. How Building Arrangements can Improve Outdoor Thermal Comfort and Indoor Sunlight?[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*, 2024, 177(3): 111-129.
- [19] ZHANG Y, KONG Y, CHEN C, et al. The Impact of Urban Morphology on Thermal Environment under Extreme Heat: A Case Study in Nanjing, China[J]. *Urban Climate*, 2024, 58: 102178.
- [20] STEWART I D, OKE T R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93: 1879-1900.
- [21] ZHU S, LI Y, WEI S, et al. The Impact of Urban Vegetation Morphology on Urban Building Energy Consumption During Summer and Winter Seasons in Nanjing, China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 228: 104576.
- [22] LI Y, DEN HARTOG H, LIU T, et al. Research Progress in Thermal Comfort Assessment of Urban Green Spaces Based on Scientific Knowledge Mapping Technology[C]// 2020 International Conference on Innovation Design and Digital Technology (ICIDDT). Zhenjiang: IEEE, 2021.
- [23] 李英男, 韩依纹. 基于ENVI-met的城市绿地微气候模拟研究进展[J]. *中国城市林业*, 2021, 19: 61-66.
- [24] LI Y, SONG Y, CHO D, et al. Zonal Classification of Microclimates and Their Relationship with Landscape Design Parameters in an Urban Park[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2019, 15: 265-276.
- [25] OKE T R. *Boundary Layer Climates*[M]. London: Routledge, 2002.
- [26] ZHANG J, ZHANG F, GOU Z, et al. Assessment of Macroclimate and Microclimate Effects on Outdoor Thermal Comfort via Artificial Neural Network Models[J]. *Urban Climate*, 2022, 42: 101134.
- [27] HÖPPE P J I J O B. The Physiological Equivalent Temperature – A Universal Index for the Biometeorological Assessment of the Thermal Environment[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 43: 71-75.
- [28] YILMAZ S, IRMAK M A, QAID A. Assessing the Effects of Different Urban Landscapes and Built Environment Patterns on Thermal Comfort and Air Pollution in Erzurum City, Turkey[J]. *Building and Environment*, 2022, 219: 109210.
- [29] MORAKINYO T E, LAM Y F. Simulation Study on the Impact of Tree-configuration, Planting Pattern and Wind Condition on Street-canyon's Micro-climate and Thermal Comfort[J]. *Building and Environment*, 2016, 103: 262-275.
- [30] JI Y, SONG J, SHEN P. A Review of Studies and Modelling of Solar Radiation on Human Thermal Comfort in Outdoor Environment[J]. *Building and Environment*, 2022, 214: 108891.
- [31] WANG Y, NI Z, CHEN S, et al. Microclimate Regulation and Energy Saving Potential from Different Urban Green Infrastructures in a Subtropical City[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 913-927.
- [32] KRAYENHOFF E S, JIANG T, CHRISTEN A, et al. A Multi-layer Urban Canopy Meteorological Model with Trees (BEP-Tree): Street Tree Impacts on Pedestrian-level Climate[J]. *Urban Climate*, 2020, 32: 100590.
- [33] KIM J, LEE D-K, BROWN R D, et al. The Effect of Extremely Low Sky View Factor on Land Surface Temperatures in Urban Residential Areas[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80: 103799.
- [34] DARBANI E S, RAFIEIAN M, PARAPARI D M, et al. Urban Design Strategies for Summer and Winter Outdoor Thermal Comfort in Arid Regions: The Case of Historical, Contemporary and Modern Urban Areas in Mashhad, Iran[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 89: 104339.
- [35] 刘玉洁, 李娜, 阿达来提·阿木提, 等. 中国城市热舒适度研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2024, 49: 43-48.
- [36] 袁旻洋, 张佳琦, 郭蔚, 等. 南京主城区蓝绿空间格局对降温效益的影响及其协同作用研究[J]. *园林*, 2023, 40: 57-64.