

寒地温带季风气候区高校校园室外环境热舒适改善研究 ——以延边大学为例

Research on Improving Outdoor Thermal Comfort of Campus Dormitory Buildings in the Cold Temperate Monsoon Climate Zones: A Case Study of Yanbian University

李金刚^{1,2,3} 许佳聪⁴ 朴璿娥⁵ 金元俊⁶ 尹顺真^{2,7*}
LI Jingang^{1,2,3} XU Jiacong⁴ PARK Seona⁵ JIN Yuanjun⁶ YUN Sunjin^{2,7*}

(1.吉林建筑大学建筑与规划学院, 长春 130119; 2.韩国首尔大学环境规划研究所, 首尔 08826; 3.寒地建筑综合节能教育部重点实验室, 长春 130119; 4.江苏大学艺术学院, 镇江 212013; 5.香港科技大学(广州)碳中和与气候变化学域, 广州 511442; 6.吉林省延吉市气象局, 延吉 133001; 7.韩国首尔大学环境大学院, 首尔 08826)

(1. School of Architecture and Urban Planning, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin, China, 130119; 2. Environmental Planning Institute, Seoul National University, Seoul, South Korea, 08826; 3. Architectural and Urban-Rural Design Energy Conservation Research Center, Changchun, Jilin, China, 130119; 4. Art School, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, China, 212013; 5. Carbon Neutrality and Climate Change Thrust, Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Guangzhou, Guangdong, China, 511442; 6. Yanji Meteorological Bureau of Jilin Province, Yanji, Jilin, China, 133001; 7. Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, South Korea, 08826)

文章编号: 1000-0283(2025)02-0052-09
DOI: 10.12193/j.laing.2025.02.0052.006
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-10-15
修回日期: 2024-12-25

摘要

快速城市化和碳排放的增加正在改变城市气候, 气候变化已成为威胁人类社会延续和生态系统的挑战, 对生态环境、人居健康造成诸多不利影响。校园不仅是公共建筑空间, 也是独立的教育社区, 其规划对社会具有示范作用。研究校园宿舍建筑的气候适应性规划和热舒适度调整对提升城市品质至关重要。尽管国内对湿热地区校园研究已深入, 但东北地区, 特别是对吉林省的相关研究较为不足。选取吉林省延边大学室外环境进行现场实测, 利用ENVI-met软件模拟不同优化方案, 进行对比分析。结果表明采用ENVI-met软件对寒地温带季风气候区校园室外环境模拟具有可行性; 生理等效温度与各测点热环境参数分析中, 天空可视率、植被覆盖率的系数绝对值较高, 与生理等效温度有显著关系; 调整建筑开口角度、局部底部架空均对室外热舒适有改善效果。为校园室外空间的热舒适优化设计提供相关建议策略, 并为该地区校园夏季室外热舒适设计提供参考依据。

关键词

温带季风气候区; 校园建筑; 热舒适度; 建筑室外环境; ENVI-met

Abstract

Rapid urbanization and rising carbon emissions transform urban climates, posing significant challenges to ecosystems and human health. As educational communities and public spaces, campuses play a model role in sustainable planning. While research on campuses in hot and humid regions is extensive, studies on northeastern China, especially Jilin Province, are limited. This study examines the outdoor environment of Yanbian University in Jilin Province through on-site measurements and ENVI-met simulations to analyze and optimize thermal comfort. Results confirm the feasibility of ENVI-met for cold temperate monsoon climates, highlighting the significant impact of sky view factor and vegetation coverage on thermal comfort (PET). Adjustments to building openings and elevated structures effectively improve outdoor comfort, providing design strategies for optimizing campus spaces in this region.

Keywords

temperate monsoon climate areas; campus buildings; thermal comfort; outdoor building environment; ENVI-met

李金刚

1992年生/男/吉林延边人/博士/讲师/研究方向为建筑能耗、室外热舒适分析、城市规划理论、建筑设计及其理论

许佳聪

2003年生/女/浙江宁波人/本科/研究方向为城市热环境评价与优化、城市规划设计

尹顺真

1967年生/女/韩国首尔人/博士/教授、博士生导师/研究方向为气候变化政策、环境社会学、能源政策、环境政策、环境教育

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

基金项目:

韩国国家研究基金会及韩国教育部BK21智慧韩国重点工程资助项目“气候变化时期可持续城市创新型人才培养项目”(编号: 5120200113713); 中国民族建筑研究会科研课题“‘一带一路’东北亚陆海边疆地区中华民族生态治水智慧共同体形塑模式研究”(编号: NAIC202407)

伴随全球变暖趋势和城市化进程，高温、高湿天气以及热岛效应对人们的健康和活动构成了严重威胁。创造健康舒适的室外建成环境成为推动社会可持续发展的核心议题之一^[1]。校园室外公共区域是学生和教职工学习、交流的重要场所，该区域的热舒适度将直接影响学生的生活和学习质量^[2]。良好的热舒适度不仅有助于减少校园建筑的能源使用、促进环境保护，还可以帮助学生缓解学习压力、消除疲劳，对身体健康产生积极影响。目前对室外热环境的研究多集中在住宅区^[3]、城市街道^[4-6]和公园^[7]等，对于校园热环境舒适度的研究相对较少。先前研究主要集中于湿热地区^[8-9]，而有关东北地区^[2]的研究大多分布在辽宁省沿海地区^[2,7]和黑龙江省内陆地区，对吉林省温带季风气候区高校热环境舒适性的研究较为缺失。已有研究指出，城市微气候受到多种地表形态特征和热环境参数的影响，如建筑布局^[10]、植被、地表铺装材料^[11-13]和街道可视因子^[9]等。通过合理配置热环境参数能够有效改善城市空间的微气候环境。

在夏热冬冷的地区，如吉林省延吉市，夏季出现高温、高湿的天数逐年增加，热环境的变化增加热风险。本研究选取延边大学作为案例，通过实测与模拟分析，探讨夏季校园室外空间的热舒适指标与热环境参数的相关性，旨在为校园优化设计提供更多的理论支持。

1 研究区概况

1.1 样地与测点

延边大学位于中国吉林省东部延吉市，靠近中朝边境，属于温带季风气候。夏季湿润多雨，靠近边境的地理位置使得延吉市的气候受到朝鲜半岛气候的间接影响，边境地区的特定地形也对风向和风速产生一定影响，进一步加剧了季节性气候特征。该校占地面积296 hm²，在校师生24万余人。校园规划东侧为教学区，西南侧布置生活区，中心布置行政区和运动区。各教学组团采用中心对称式布局，学生宿舍区采用行列式布局形成室外生活街道。宿舍区建筑物多为南北朝向“L字型”建筑，这与东北地区常见的南北朝向“一字型”住宅建筑稍有差异，该校居住区室外空间属于半围合式庭院式布局。

根据文献回顾，建筑高度、建筑密度、植被覆盖率、天空开阔指数、建筑高度标准差和容积率等参数是分析城市热环境的主要指标^[4,5,7,8,11]。本文选取该校园人群活动较为频繁的4个室外空间作为样地，其测点位置信息及周边环境见图1和表1。测点A位于东侧宿舍区，下垫面沥青，相对围合，配有花坛，植物遮阴；测点B位于西侧宿舍区，周边全部为硬质铺装；测点C位于广场中央，下垫面为硬质



图1 测点位置
Fig. 1 Measurement locations

铺装，四周开阔，无建筑物或树木遮挡，有石凳等休息设施；测点D临近高层宿舍北侧，周边全部为硬质铺装，空间呈东西向开敞，在道路旁边有一定植物遮阴。

1.2 寒地高校宿舍区空间布局

寒地高校宿舍区采用多种空间布局方式。行列式布局宿舍区建筑物多为“一字型”。建筑物为“L字型”的宿舍区则采用半围合式庭院。采用庭院式布局的宿舍区，由多栋建筑组成多个重复性的单元式的庭院建筑。行列式（带形）布局比庭院式布局的温度场的温度更高，相对湿度也 smaller^[12]，但是无法排除植被环境等其他因素导致的差异，故比较结果欠缺一定的客观性，因此有必要在相同植被环境下进行比

较。还有学者指出围合式布局空间中围合面数与缺口方向对室外空间热环境起到不同影响^[13]。本文样地建筑布局为行列式, 由于采用“L字型”建筑, 外部空间呈现出半围合式庭院形态。

2 研究方法

2.1 实地气象监测

夏季室外热环境会受到诸多因素的影响。如连续的阴雨天气会使土壤湿度增加, 土壤中的水分在当天蒸发时会产生降温和增湿的作用, 会干扰对室外热环境机制的分析。为了深入研究夏季典型天气条件下的室外热环境以及室外遮阳设施的调控效果, 本研究设定实验前的天气条件为连续的晴天, 并选择典型的晴朗夏日(2024年8月2-4日)进行现场实测。实验中使用的仪器传感器被放置在1.4 m的高度, 能够测量空气温度、相对湿度、风速以及太阳辐射等环境参数(表2)。其中, 温/湿度设置为每5 min自动采集一次数据, 风速和太阳辐射每0.5 h测量一次。

表1 测点特征参数
Tab. 1 The characteristic parameters of sample sites

测点 Site	面积 /m ² Area	植被覆盖率 /% Green ratio	天空开阔指数 Sky visibility factor	建筑密度 Building density	容积率 Floor area ratio
测点 A	3 000	30	0.70	0.50	1.51
测点 B	1 925	18	0.63	0.60	1.82
测点 C	1 225	14	1.00	0.10	0.15
测点 D	1 870	12	0.68	0.35	1.40

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

测量参数 Parameter measured	测量仪器 Measurement instruments	仪器测量范围 Measurement range	仪器精度度 Instrument accuracy
空气温度	Testo 175H1	-40 ~ 75℃	±0.7℃
相对湿度	Testo 175H1	1% ~ 99%	±3%
太阳辐射	SM206 - SOLAR	0.1 ~ 1999.9 W/m ²	±5%
风速	Testo 405V1	0 ~ 45 m/s	±0.1 m/s

2.2 ENVI-met 模拟局地微气候

ENVI-met可用于模拟建筑室外环境, 是一款基于热力学、流体模拟和植物生理学的高分辨率模拟软件, 能够分析空间布局、地表材质、水体、植被覆盖等多种因素^[11]。本研究利用ENVI-met 5.6模拟室外热环境, 输入参数包括地理信息、气象条件等(表3)。为提高模拟的精准度, 首先对实际场地的空间形态特征进行调研和测量, 其次将研究区域建成3D模型(图2)。模型覆盖400 m×400 m网格的水平区域和150 m网格的垂直区域, 水平和垂直分辨率均为2 m。本研究分析全天保持晴天的2024年8月3日数据。室外空间中人群使用时间多集中在9:00-20:00, 将每个点产生的每小时数据平均后获得12组整点数据。将4个样点空气温度与湿度共96组数据输入模拟软件, 并在ENVI-met中对该时间进行每隔1 h的数据输出。

2.3 局地气候区视角下的城市热环境研究

局地气候分区(Local Climate Zone, LCZ) 框架由Stewart和Oke^[13]于2012年首次提出, 是一

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

参数 Parameter	输入值 Input data
延吉市(经纬度)	42.9° N, 129.5° E
起始时间	0:00
模拟时长/h	24
初始温度/℃	22.5
10 m 高度风速/(m/s)	2.2
风向/°	274.5
2 500 m 高绝对湿度/%	8
2 m 高相对湿度/%	79.91

种系统化的城市气候分类方法。该框架旨在通过标准化的分类体系, 将城市及其周边环境划分为基于地表特性、建筑形态、土地利用和热力学特性的不同区域。LCZ框架考虑了自然表面和人工表面的物理特性, 还将城市气候研究与实际应用相结合。本文所探讨的空间形态主要指对热环境产生直接影响的物质特征。以往研究中普遍认为建筑高度、建筑密度、植被覆盖率、天空开阔度指数、建筑高度标准差以及容积率等城市形态参数, 是分析城市小气候、城市热岛效应和建筑能耗影响的重要指标^[14]。在制定局地气候区(LCZ) 方案时, 这些参数是构建参考标准的关键^[15]。

2.4 人体热舒适性指数

本文选用生理等效温度(Physiological Equivalent Temperature, PET) 作为评估人体热舒适度的指标。PET是衡量人体在室内外环境中达到与典型室内环境相似热感受的温度^[16-17]。PET以人体能量预算平衡为基础, 具有热生理意义, 适合于评估不同气候的热条件^[17-18]。此指标在全面评估室外环境的热舒适性方面较为有效。该指数综合考虑主要气象参数、活动、服装耐热性和舒适度个体参数的影

响, 并且每个地区的PET指数存在一定的差异, 根据先前的研究, PET在该区域的适应结果分为非常炎热 ($PET > 41^{\circ}\text{C}$)、热 ($35^{\circ}\text{C} < PET \leq 41^{\circ}\text{C}$)、温暖 ($29^{\circ}\text{C} < PET \leq 35^{\circ}\text{C}$)、微温 ($23^{\circ}\text{C} < PET \leq 29^{\circ}\text{C}$)、舒适 ($18^{\circ}\text{C} < PET \leq 23^{\circ}\text{C}$)、微冷 ($13^{\circ}\text{C} < PET \leq 18^{\circ}\text{C}$)、凉爽 ($8^{\circ}\text{C} < PET \leq 13^{\circ}\text{C}$)、寒冷 ($4^{\circ}\text{C} < PET \leq 8^{\circ}\text{C}$) 和非常冷 ($PET \leq 4^{\circ}\text{C}$)^[19-20]。

3 模拟结果分析

3.1 近地面空气温度变化

在夏季典型气象日, 各测点的平均温度分别为 31.42°C 、 31.57°C 、 32.22°C 、 30.75°C ; 平均湿度分别为 56.62% 、 57.27% 、 55.96% 、 60.09% 。整体变化趋势稳定; 所有监测点的温度在 $14:00-15:00$ 达到最高, 湿度随着温度升高而降低, $15:00-16:00$ 达到最低点。由于周围没有建筑物遮挡, 测点C的平均温度最高。受高层建筑阴影影响导致测点D的平均湿度最高(图3)。

3.2 ENVI-met 模型检验

为验证模拟的准确性, 本研究将 ENVI-met 模型模拟的空气温度与实际监测值进行对比, 并使用均方根误差 (RMSE) 评估测量数据与模拟数据之间的差异。RMSE 表示模拟结果与实测值之间偏差平方的平均值的平方根。RMSE 数值越接近 0, 说明模型的精度越高, 模拟结果与实际情况越接近, 计算见公式 (1)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

式中, n 表示观测数据的总个数, 表示第 i 个观测样本的真实值, \hat{y}_i 表示第 i 个观测样本的预测值, $(y_i - \hat{y}_i)^2$ 表示第 i 个样本预测误

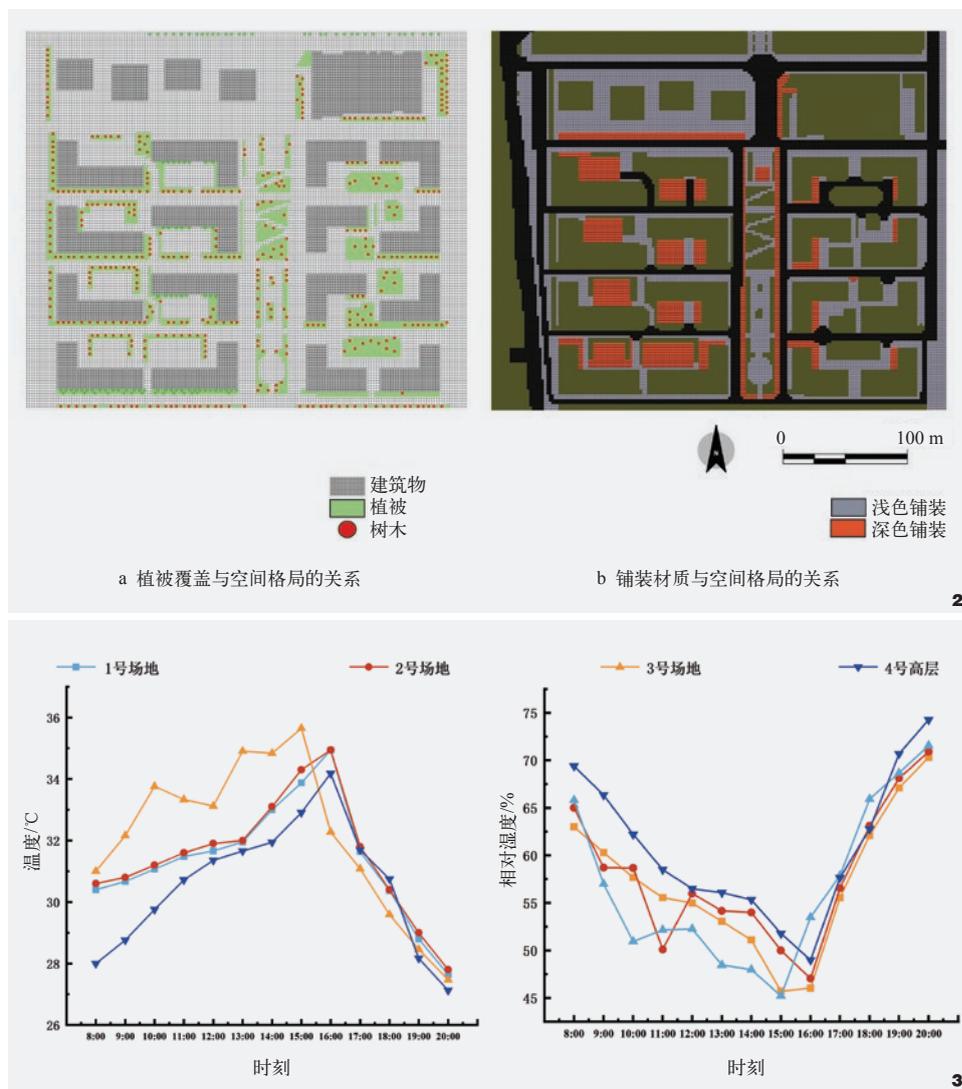


图2 ENVI-met研究区域建模划分
Fig. 2 Division of ENVI-met study area for modeling

图3 近地面实测数据变化
Fig. 3 The variation of near-surface measured data

差的平方。由于 RMSE 对较大误差更加敏感, 因此在模型评估和优化过程中, 通常会优先选择 RMSE 较小的模型作为最终方案。

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 R^2 均超过 0.75 (图 4), 表明该模型能够良好地模拟真实状况。同时, 通过对实测温度与模拟值温度的计算发现 RMSE 值介于 $0.75 \sim 1.40^{\circ}\text{C}$,

温度平均绝对百分比误差值 (MAPE) 均小于 10%。各测点的 RMSE 值都在可承受的范围之内, 这说明实测值与模拟值之间的误差较小。由此可以得出, ENVI-met 模型能较好地预测该地区校园室外空间小气候环境。

3.3 ENVI-met 模拟结果分析

图 5 为 Blomet 模块导出的下午 2 点时段温

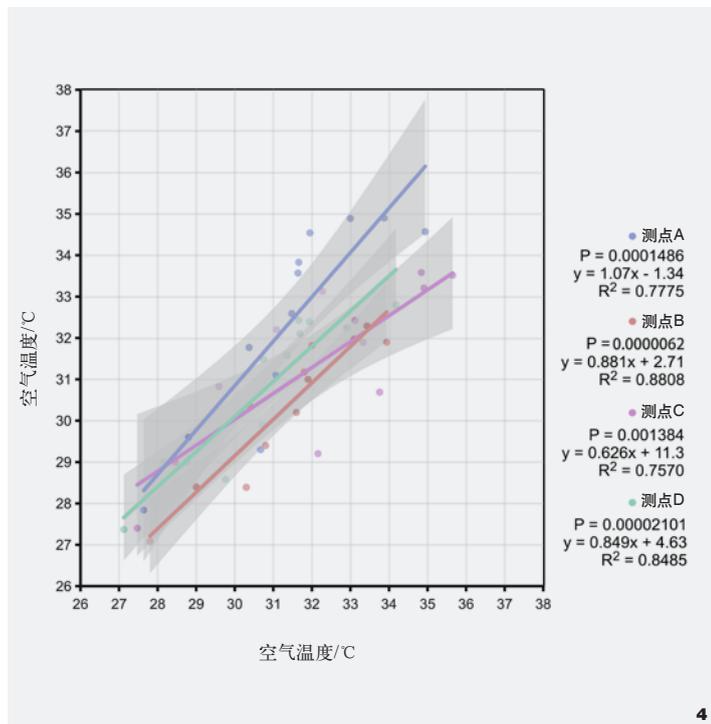


图4 ENVI-met模型校验结果
Fig. 4 Validation results for ENVI-met

度、风速等参数模拟分布图。高温区（深橙到棕色）主要出现在建筑物外侧的开放区域，特别是建筑物北部和西部，这些区域直接受到太阳照射。中等温度区（浅黄到橙色）通常位于建筑物外围或开放区域。舒适温度区域（浅蓝）则出现在建筑物阴影区或者可能受到冷却影响的地方，比如通风较好的区域，这与阳光照射和通风状况有关。通过对风速分布分析图可以看出，低风速区（深蓝到浅蓝色）通常靠近建筑物的背风面或建筑物内侧。中等风速区（浅绿色到黄色）出现在建筑物之间的开放空间或迎风面附近。高风速区（橙色到深棕色）出现在南北建筑之间的通风走廊。

图5为Biomet模块导出的夏日间最热时段湿度与PET分布图。低PET区域（蓝色到浅绿色）与高PET区域（橙色到棕色）的分布与图5的温度分布极为接近。最低PET为36.13℃，最高PET为59.78℃。表明不同区域的热舒适度存在显著差异，在建筑物内部或阴影区，PET明显低于开阔区域。这意味着建筑物内部或阴影区的热舒适度相对较高，而开阔区域的热舒适度则较低。这种差异是由于开阔区域直接受到太阳照射，温度较高，从而导致PET值升高；而建筑物内部或阴影区则受到建筑物的遮挡，温度相对较低，PET值也相应降低。

3.4 空间形态指标对热舒适性的影响

研究指出三面围合式布局更有利于全天热岛强度的降低，四面围合式布局空间最不利热岛强度的降低^[9]。建筑高度、建筑密度、植被覆盖率、天空开阔度指数以及容积率等城市形态参数是分析热环境的重要参数^[14]。并且北高南低的高度递减排列布局能够有效减少高温区域，并改善空气流动^[21]。本研究在不调整建筑前后高度、排布距离的前提下模拟两版方案。并进一步分析PET与热环境参数相关性。

在PET与各测点空间特征相关性分析中，天空开阔指数、植被覆盖率的系数绝对值较高。天空开阔指数越高意味着受建筑、植物遮阳较少，随之受太阳辐射的影响也会直接导致PET升高。由于植物蒸腾作用的影响，植被覆盖率越高会导致PET越低。在本地区植被覆盖率的影响较其他地区显著。湿热地区的研究指出天空开阔指数^[9]的影响大于其他因素。另外建筑密度与容积率也显示了与PET的相关，但影响相对较小（表4）。

由于PET受多个气象指标的综合作用，在建立PET与各个气象指标相关性关系时，采用多元线性回归分析。在分析结果中 p 值小于0.05则说明两个变量呈线性相关。为了比较开敞空间与围合空间的PET与气象指标影响差异，研究基于ENVI-met模拟得出的PET分布结果，对两种场地空间的每小时PET平均值和气象指标进行多元回归分析。表5中温度与风速对PET具备统计显著性。表6中太阳辐射对PET具备统计显著性，但其系数较小，可解释为由于遮罩总体影响程度不大，但在特定时间内具备正相关影响。

3.5 建筑开口角度与底部架空对热舒适性的影响

空间围合形态与室外热环境的关系密切^[22]。研究指出，敞开型架空层对改善热环境的影响显著^[23]。建筑开口角度会对其周围风环

表4 PET与各测点空间形态指标的相关性指数
Tab. 4 Correlation index of PET with thermal environment spatial parameters

指标参数 Indicator parameters	系数 Coefficient	标准偏差 Standard deviation	T 统计量 T statistic	p 值 p -value
常数	15.023	3.210	4.682	0.002
天空开阔指数	2.357	0.689	3.422	0.013
植被覆盖率	-1.123	0.450	-2.495	0.045
建筑密度	0.876	0.327	2.680	0.029
容积率	0.432	0.194	2.226	0.056

注：R²为0.932，修正后的R²为0.824。

境^[24]及室外热舒适度^[25]等方面起到影响。基于先前研究的发现，对调整建筑开口角度、底部架空进行模拟。

对比方案中对样地A西侧建筑物进行调整开口角度(图6, 图7), 模拟发现调整前场地内少部分区域超过1.65 m/s。风速较低的区域(蓝色区域)出现在建筑物的阴影区, 尤其是建筑物密集区域的中央部位。调整后最大风速从2.34 m/s提高到2.75 m/s, 并且风速超过1.96 m/s的区域增多, 特别是在建筑物之间的过道和南北走廊区域。从PET室外热舒适模拟分布图对比发现, 调整后局部高温区域有所减少。

通过对样地A西侧建筑物一层架空处理, 架空高度为4m, 模拟局部底部架空对风速、PET的影响(图8, 图9)。结果发现优化后的风速范围(删除两端极值区间)从原来的0.25 ~ 1.64 m/s变化为0.32 ~ 1.98 m/s。并且对比优化后的方案PET的平均值, 约降低了2℃。架空之前低风速区域主要出现在建筑物内侧或受遮挡的区域。局部底部架空可改善低风速区域。在建筑物密集或遮挡区域, 风速改善效果明显。综上所述, 在该区域建筑开口角度与底部架空对热舒适性的影响较为明显, 降温效果分别为4.24℃、6.28℃。可起到改善室外热舒适的效果(图10)。

4 结论

本文以寒地温带季风气候区校园为研究对象, 选取的样地建筑布局为行列式, “L字形”建筑形态, 外部空间采用半开放庭院式院落形态。通过对夏季典型气象日现场实测与ENVI-met模型模拟发现样地中热风险区域存在以下问题:(1) 局部区域存在自然风不足和辐射过强的问题;(2) 建筑物间距过于窄的区域无法形成风廊, 导致通风散热不

表5 开敞空间PET与气象指标的相关性指数

Tab. 5 Correlation index of open space PET with meteorological indicators

指标参数 Indicator parameters	系数 Coefficient	标准偏差 Standard deviation	T 统计量 T statistic	ρ 值 ρ -value
温度	24.411	9.174	2.660	0.037
湿度	5.965	2.350	2.538	0.044
太阳辐射	-0.001	0.004	-0.293	0.778
风速	7.089	5.815	2.719	0.034

注: R^2 为0.782, 修正后的 R^2 为0.646。

表6 围合空间PET与气象指标的相关性指数

Tab. 6 Correlation index of enclosed space PET with meteorological indicators

指标参数 Indicator parameters	系数 Coefficient	标准偏差 Standard deviation	T 统计量 T statistic	ρ 值 ρ -value
温度	-5.143	12.990	-0.395	0.705
湿度	-1.642	4.227	-0.388	0.7110
太阳辐射	0.029	0.008	3.635	0.010
风速	6.408	2.928	2.188	0.071

注: R^2 为0.857, 修正后的 R^2 为0.761。

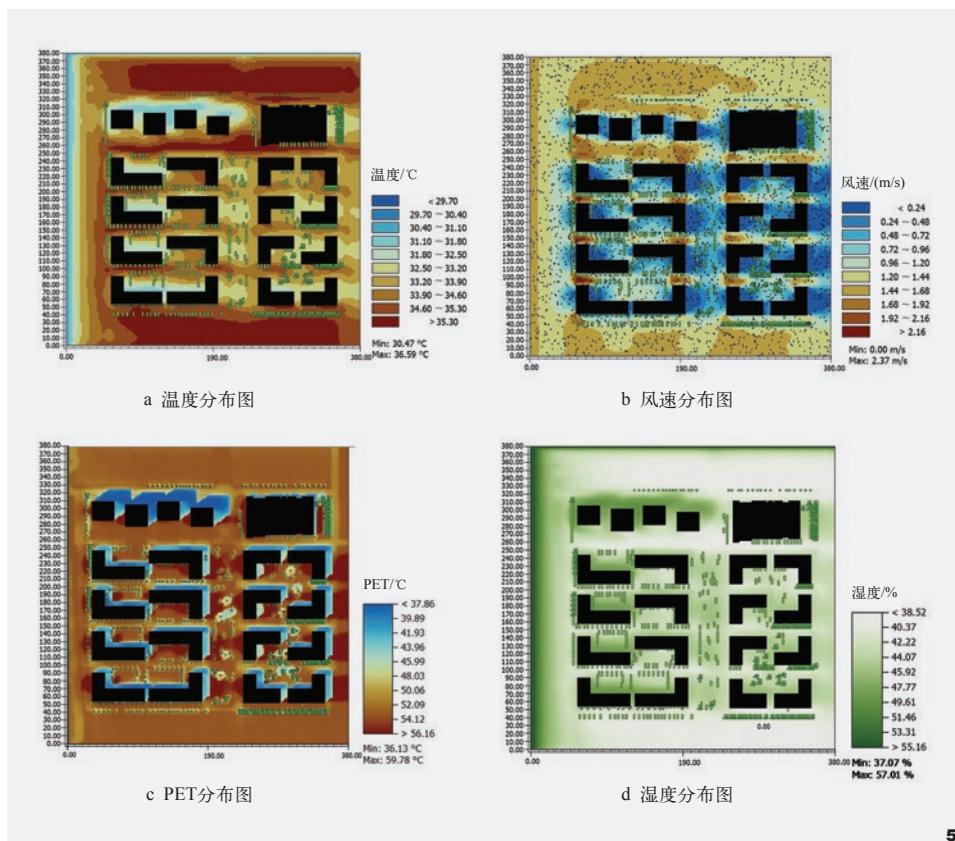


图5 夏季高温时段ENVI-met模拟结果
Fig. 5 ENVI-met simulated results of high temperature period in summer

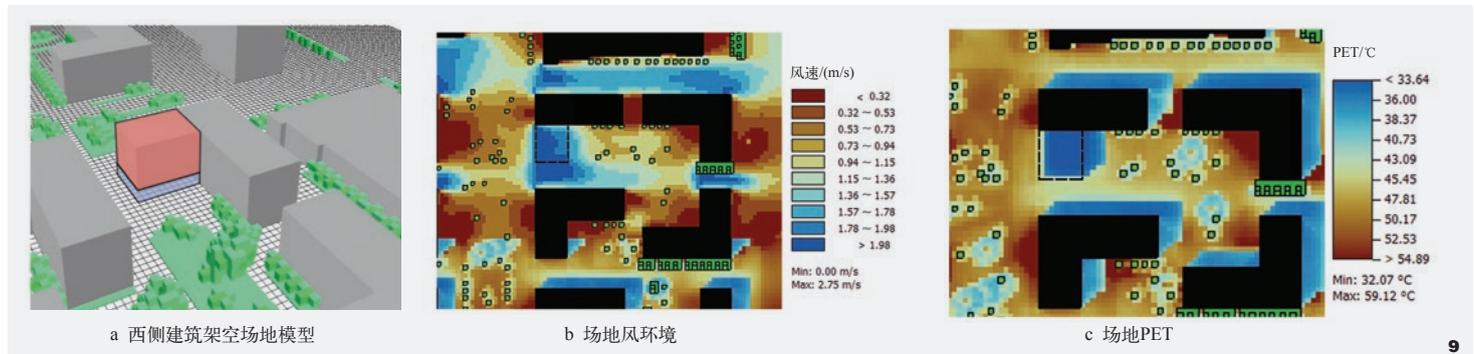
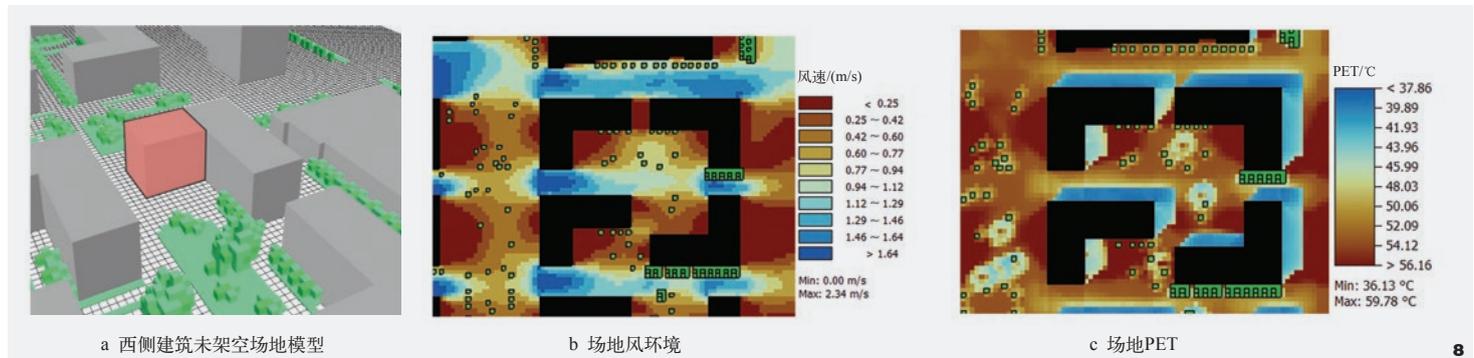
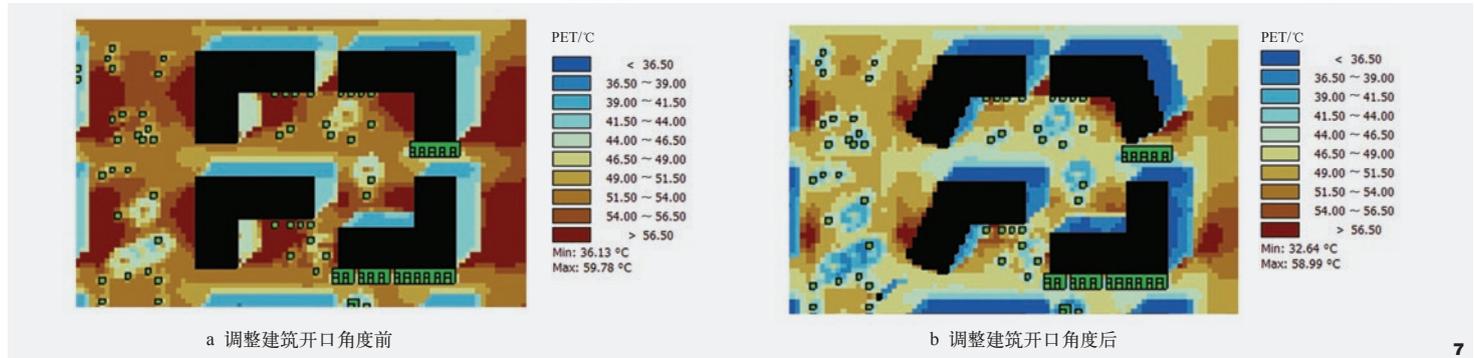
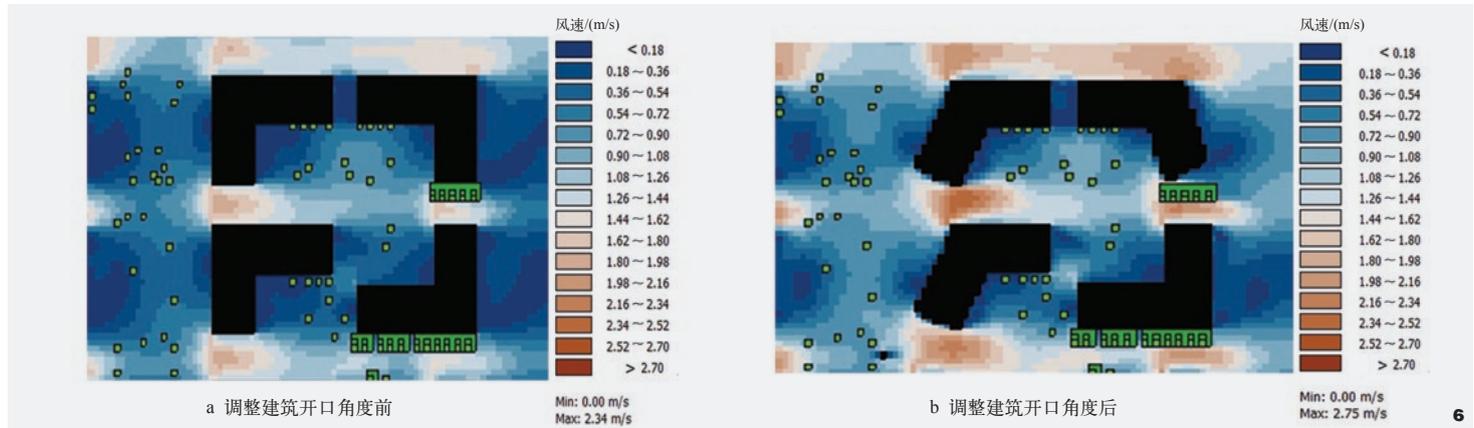


图6 开口角度对风速的影响
Fig. 6 Wind speed distribution after changing angle

图7 开口角度对PET的影响
Fig. 7 PET distribution after changing angle

图8 局部底部未架空对风速、PET的影响
Fig. 8 The impact of no partial bottom elevation on wind speed and PET

图9 局部底部架空对风速、PET的影响
Fig. 9 The impact of partial bottom elevation on wind speed and PET

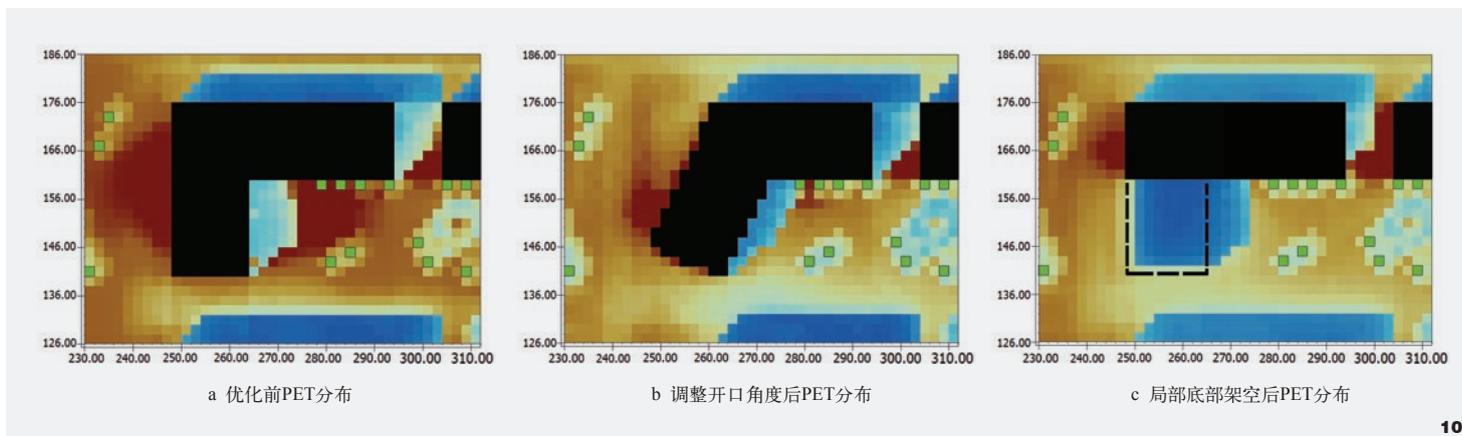


图10 优化区域的PET平均值对比
Fig. 10 Comparison of PET average values in optimized regions

足；(3) 过于围合的建筑形态导致风湍流负压，导致风速过低热量无法排出。

结合模拟与其他区域研究对比分析得出以下结论：(1) PET与各测点热环境参数分析中，天空开阔指数、风速、植被覆盖率的系数绝对值较高，与PET有非常显著的相关性。在本地区，温度是主要影响因素，风速与植被覆盖率的影响较于其他地区更为显著。(2) 在开敞空间和围合空间需采用不同的热舒适改善策略。本研究发现该地区的开敞区域PET受温度以及风速的影响更为显著。而在围合空间的PET受太阳辐射的影响更为显著。因此在本地区开敞空间可通过遮阳设施或树木的合理布局有效降低地面及空气温度，从而改善室外热舒适度。(3) 在不同气候、地理条件下，微气候参数对室外热舒适的影响程度存在差异，不同改善方式对室外热环境的影响也显著不同。该地区室外环境主要受通风廊道、底部架空、植被覆盖程度的影响，通过模拟发现调整建筑开口角度、局部底部架空均对室外热舒适起到改善效果。

然而本研究仍存在以下不足，有待后续研究进行探讨。(1) 仅以延边大学为例进行

了实测，未来可通过增加对其他气候区样地模拟分析研究，丰富实测样本数量，分析对比地域性差异，减少周边环境对于实验精度的影响。(2) 仅选择了夏季天气条件进行研究，未来可通过增加冬季、春季、秋季天气条件下的对比研究，更全面地分析该地区热环境。(3) 仅讨论了建筑因素的降温效应，但具有降温效应的因素还包括景观（树木品种、植被覆盖面积、形态等）、下垫面（不透水路面、透水路面）和遮阳设施等，其中某些因素通过现有软件较难以量化计算，还需进一步研究探讨。

注：文中图表均由作者绘制。

致谢：

感谢吉林省生态智慧城镇创新发展战略研究中心对本研究的支持。

参考文献

- [1] 冯锡文. 基于广州地区的全年室外热舒适研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.
- [2] 王墨晗, 梅洪元. 寒地大学校园冬季健康行为的感知环境循证设计——基于东北9座大学校园的实证研究[J]. 建筑学报, 2020(S1): 87-91.

- [3] 冯晓刚, 杨永佳, 李萌, 等. 居住区绿地改造夏季热环境模拟与优化策略研究[J]. 西部人居环境学刊, 2023, 38(05): 59-64.
- [4] HONG J, SIQI L, JIAN K. Thermal Comfort Range and Influence Factor of Urban Pedestrian Streets in Severe Cold Regions[J]. Energy and Buildings, 2019, 198: 197-206.
- [5] 董玉宽, 张哲, 孙诗溢, 等. 基于微气候模拟的城市综合公园活动空间热舒适评价研究——以沈阳市万柳塘公园为例[J]. 西部人居环境学刊, 2023, 38(06): 15-21.
- [6] 余洋, 曾庆蕾, 陆书铎. 中国城市街道的热舒适研究框架: 地域差异、指标阈值和影响因素[J]. 园林, 2023, 40(08): 83-91.
- [7] 肖慧蓉, 毕星, 刘宇晗, 等. 上海城市开放空间夏季热舒适度及访客热偏好研究[J]. 园林, 2023, 40(09): 123-131.
- [8] 熊珂, 张雅茹, 何宝杰. 湿热地区遮阳形式对校园热环境的影响研究[J]. 西部人居环境学刊, 2024, 39(01): 149-156.
- [9] 王健, 郭红霞. 扬州古典园林空间夏季热环境研究——以小盘谷为例[J]. 园林, 2023, 40(04): 118-124.
- [10] OKE T R. Street Design and Urban Canopy Layer Climate[J]. Energy and Buildings, 1988, 11: 103-113.
- [11] 郭飞, 王紫莹. 基于ENVI-met的严寒地区教学组团室外微气候研究[J]. 建筑与文化, 2021(8): 63-65.
- [12] 李坤明, 张华静, 赵立华. 寒冷地区高校校园不同室外空间形态下的热环境长时间尺度测析[J]. 建筑科学, 2020, 36(08): 43-49.
- [13] STEWART I D, OKE T R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies Bulletin of the

- American[J]. Meteorological Society, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [14] BANSAL, PARTH, STEVEN J Q. 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.
- [15] 吴健宇, 林炜昊, 丘楚俊, 等. 街道空间形态对热舒适度的影响研究——以湛江市赤坎老街为例[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(07): 89-96.
- [16] 刘念雄, 秦佑国. 建筑热环境[M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2005.
- [17] HÖPPE P. The Physiological Equivalent Temperature-Auniversalindex for the Biometeorological Assessment of the Thermal Environment[J]. Biometeorol, 1999(43): 71-75.
- [18] MATZARAKIS A, MAYER H, IZIOMON M G. Applications of Auniversal Thermal Index: Physiological Equivalent Temperature[J]. International Journal of Biometeorology, 1999(43): 76-84.
- [19] MATZARAKIS A, MAYER H. Another Kind of Environmental Stress: Thermal Stress[J]. WHO Newsletter, 1996, 18: 7-10.
- [20] 王洁, 郭飞, 张弘驰. 基于UTCI的寒地夏季商业街室外热舒适研究[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(01): 1-4.
- [21] SANG Z P, WANG Y D, LI J G, et al. How Building Arrangements can Improve Outdoor Thermal Comfort and Indoor Sunlight? Proceedings of the Institution of Civil Engineers[J]. Municipal Engineer, 2024, 177: 111-129.
- [22] 林晓钰, 王维仁, 陶伊奇, 等. 立体都市合院对湿热气候条件下的小气候及人体热舒适度的影响研究[J]. 建筑学报, 2024, (SI): 160-165.
- [23] 刘建麟, 牛建磊, 张宇峰. 建筑架空高度及风向对行人区微气候的影响评估[J]. 建筑科学, 2017, 33(12): 117-124.
- [24] 韩昀松. 严寒地区办公建筑形态数字化节能设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [25] 邓寄豫. 基于微气候分析的城市中心商业区空间形态研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.

2025年《园林》 学刊专题征稿

为紧贴时代脉搏, 突显时代主题, 集中展示中国风景园林标志事件和新时代重大规划, 同时本着开放办刊、专题提前策划的工作方针, 2025年《园林》学刊拟选推出如下专题(所列专题顺序, 不作为最终发刊专题顺序):

- (1) 景观地方性与场所依恋; (2) 公园城市高质量发展; (3) 绿色基础设施与廊道规划; (4) 生态智慧景观; (5) 森林城市高碳汇与减排协同路径; (6) 铁路遗产景观; (7) 风景园林绿色低碳路径; (8) 城市气候与环境响应; (9) 数智化风景园林教育教学; (10) 老年友好绿地; (11) 绿地生态系统调节服务与使用者健康; (12) 城市生物多样性; (13) 景观感知赋能规划设计;
- (14) 健康城市与景观疗愈。

专题文章采用学术主持人组稿与作者自由来稿相结合的方式。稿件具体要求可关注“园林杂志”公众号。

