

垂直绿化对老旧小区热舒适影响的数值模拟研究

张少杰^{a,b}, 李珊芝^a, 肖铁桥^{a,b}, 马东方^a

(安徽建筑大学 a. 建筑与规划学院; b. 安徽省国土空间规划与生态研究院, 合肥 230601)

摘要: 地面绿地空间的短缺使垂直绿化成为改善热环境的有效途径, 为探究垂直绿化对老旧小区微气候和热舒适的影响程度, 以老旧小区为研究对象, 运用 ENVI-met 数值模拟技术, 使用空气温度 (T_a)、平均辐射温度 (MRT) 和生理等效温度 (PET) 指标量化分析不同垂直绿化率对微气候和热舒适的影响。结果表明, 微气候和热舒适改善程度与绿化率成正比, 垂直绿化不仅可以改善水平方向的微气候, 对垂直方向也有一定的作用, 并可有效提升空间的热舒适水平, 整体表现出早晚好于中午的特征。该研究弥补了社区尺度上对垂直绿化改善微环境和热舒适研究的不足, 可为老旧小区微气候和热舒适度改善以及相关政府部门制定垂直绿化的推进策略提供参考和依据。

关键词: 垂直绿化; 热舒适; 老旧小区; 绿化率

中图分类号: TU986.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)01-0062-10

Numerical simulation study on the effect of vertical greening on the thermal comfort of old residential areas

ZHANG Shaojie^{a,b}, LI Shanzhi^a, XIAO Tieqiao^{a,b}, MA Dongfang^a

(a. School of Architecture & Urban Planning; b. Institute of Territorial Spatial Planning and Ecology of Anhui Province, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Due to the shortage of ground green space, vertical greening becomes an effective way to improve thermal environment. In order to explore the impact of vertical greening on the microclimate and thermal comfort of old residential areas, ENVI-met numerical simulation technology and air temperature (T_a), mean radiant temperature (MRT) and physiological equivalent temperature (PET) indicators were used to quantify the impact of different vertical greening rates on the microclimate and thermal comfort of old residential areas. The results show that the improvement degree of microclimate and thermal comfort is proportional to the greening rate. Vertical greening can not only improve the horizontal microclimate, but also has a certain effect on the microclimate of vertical direction. Besides, vertical greening can also effectively improve the thermal comfort level of the space, of which the overall effect in the morning and evening was better than that at noon. This study makes up for the lack of research on the improvement of microenvironment and thermal comfort by

收稿日期: 2023-12-12

基金项目: 安徽省高校省级人文社会科学研究重点项目 (2022AH050226); 安徽省装配式建筑研究院校科研平台开放课题 (AHZPY2021ZR02); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目 (2023-YF043)

作者简介: 张少杰 (1981—), 女, 安徽界首人。中美双硕士, 副教授, 主要从事微气候监控与预测方面的研究。
E-mail: ShaojieZhang@ahjzu.edu.cn.

vertical greening at community scale, and provides reference and basis for the improvement of microclimate and thermal comfort in old residential areas and the formulation of vertical greening promotion strategies by relevant government departments.

Key words: vertical greening; thermal comfort; old residential areas; greening rate

城市化的推进加剧了城市热岛效应,引发居民生活及健康的各种问题。由于使用年限过长和建设水平较低等原因,老旧小区环境问题频发,老旧小区改造作为改善人居环境的重要抓手,应进一步重视热环境的影响^[1]。在老旧小区改造过程中,需要减少绿地空间来增加停车位,二者争夺空间并以相反的方式影响室外热环境。对老旧小区来说,改变现有的建筑形态很困难,增加绿色植物被认为是缓解日益增加的热压力和提高热舒适的有效策略^[2-4]。目前大部分研究都集中在地面绿化的冷却效果上^[5-7],当地面绿化策略不可行时,应寻求应用于建筑物的解决方案。垂直绿化是快速增加绿化面积、促进建筑节能的有效途径^[8],可以有效地改善周围小气候、提高室外热舒适^[9]、缓解热岛效应^[10]。

陈宇等对南京某办公楼垂直绿化进行研究,结果表明垂直绿化具有明显的降温增湿作用,实施垂直绿化的测点外墙降温 3.72 °C,室内降温 7.45 °C,提高了人体舒适度^[11]。在教学建筑中,垂直绿化对热环境的改善效果同样显著,陈翔等的测试结果表明有垂直绿化的房间室内平均温度下降 2.1 °C,平均相对湿度增加 6.7%^[12]。TALEGHANI 等在夏季测量了 2 个庭院的小气候,一个庭院的墙壁是红砖,另一个是植被,观察到下午有植被的庭院比没有的温度低 4.7 °C^[13]。CUI 等研究南海某工业园不同立面布置对热舒适的影响,结果表明垂直绿化可以降低生理等效温度(PET)0.7~1.4 °C^[14]。

垂直绿化为改善城市热环境、增加绿色基础设施提供了新的机会,具有环境效益和社会效益。孙泽浩等从 5 个方面对老旧小区垂直绿化的可行性进行分析,得出在空间条件、经济效益和社会效益方面具有可行性的结论^[15]。垂直绿化已被城市居民广泛接受,YANG 等也通过访谈的方式得出 75% 左右的中国居民愿意付费参与垂直绿化改造^[16]。

现有针对垂直绿化的研究尺度主要集中在局部或单体建筑,较少关注社区尺度;研究内容大多是对单个气象因子的研究,如温度、相对湿度,较少关注对室外热舒适的影响^[17]。近年来社区尺度的垂直绿化逐渐引起关注,如北京、上海和深圳等城市,其通过发布政策措施、奖励机制等鼓励各部门大力发展垂直绿化,但对垂直绿化在社区尺度上对微气候和热舒适的调节程度,以及改善效果与绿化率之间的关系研究不足。基于此,本文通过数值模拟的方法,以合肥市肥西县老旧小区为研究对象,将垂直绿化应用于社区尺度,探索垂直绿化对微气候和热舒适的影响,弥补社区尺度上对垂直绿化改善微环境和热舒适研究的不足,为老旧小区微气候和热舒适度改善以及相关政府部门制定垂直绿化的推进策略提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

合肥市位于中国亚热带季风气候区,根据柯本气候分区属于亚热带湿润气候区(Cfa),是典型的夏热冬冷地区。2022 年合肥夏季最高气温超过 40 °C,严重影响了居民的日常生活和户外活动。因此,改善难以忍受的夏季室外热环境是合肥城市设计的关键问题。研究区域是位于合肥市西南面的合肥市肥西县,2022 年,肥西开展老旧小区改造,根据《安徽省城镇老旧小区改造技术导则(2021 修订版)》,因空间不足难以保证绿化要求的小区,宜采用垂直绿化等方式,改善公共空间景观环境。

1.2 气象数据测量及 ENVI-met 验证

ENVI-met 是基于 3D 非流体静力和热力学模型开发的微气候数值模拟软件,最新版本的 ENVI-met 包含绿色立面模块,可模拟垂直绿化对建筑物能源性能和室外气候的影响。

1.2.1 气象数据测量

垂直绿化是指利用植物材料对建筑围护结构进行装饰的绿化方式,也称为立体绿化。为保证研究的准确性,在模拟实验前,需评估 ENVI-met 在合肥地区垂直绿化研究中的精度。鉴于在现实条件下没有找到社区规模的垂直绿化项目,因此以中国科学技术大学东校区的行政楼为测量点(图 1),选取晴朗无风的

典型气象日,于2023年6月11日8:00—18:00进行连续10 h的定点观测。将微气候测量仪(Kestrel 5500)安装在三脚架上,测量位置为高度距地面1.5 m,距离建筑物1.5 m的行人水平^[18],收集的气象参数包括空气温度(T_a)、相对湿度(RH)、风速及风向。

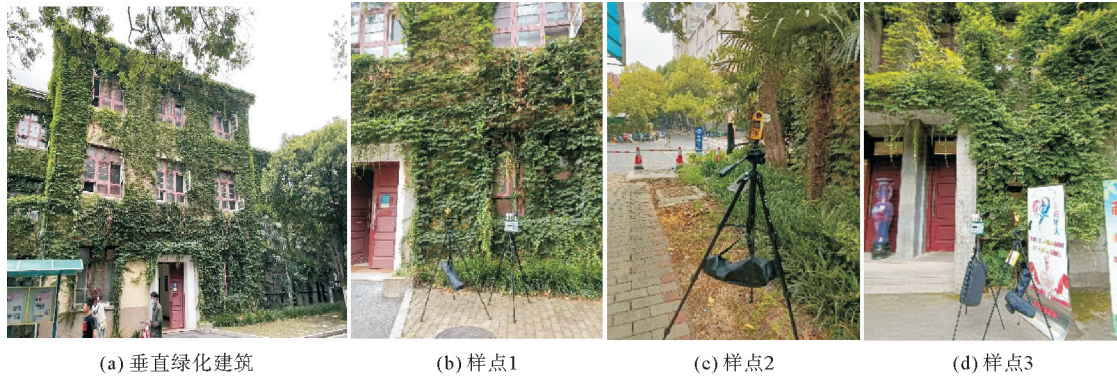


图1 实测样点分布

1.2.2 ENVI-met 性能评估

模拟所需气象数据来自安徽省气象局,在 ENVI-met 中建立场地模拟图,选择 T_a 和 RH 作为验证参数。LAM 等在对室外热舒适数值模拟研究的文献综述中发现, T_a 是最重要的验证参数,其次是 RH^[19]。MULLER 等通过比较 T_a 和 RH 现场测量值和模拟值来评估模型的性能,观察到模型准确地再现了观测值^[20]。

计算观测值与模拟值之间的均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)和一致性指数(d)。一般来说, R^2 与 d 越接近于1,可靠性越高。耿红凯等在微气候研究中,计算出 T_a 、RH 的一致性指数水平平均高,范围在 0.74~0.97,相对湿度 RMSE 值相对较大,范围在 4.17~5.55^[21],如图 2 和表 1 所示,结果表明实测值与模拟值吻合度较好,校验偏差在可接受范围内,说明 ENVI-met 能很好地预测变量指标,可用于后续研究。

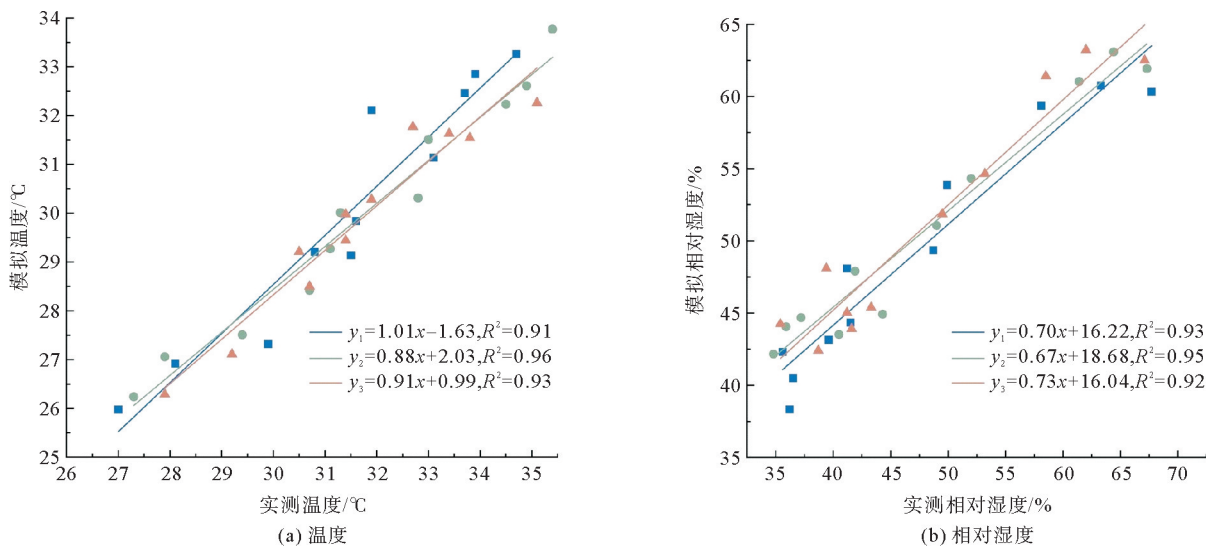


图2 实测值与模拟值拟合

■ 样点1; ● 样点2; ▲ 样点3

表1 各样点验证参数

验证参数	样点1			样点2			样点3		
	RMSE	R^2	d	RMSE	R^2	d	RMSE	R^2	d
T_a	1.62	0.91	0.85	1.84	0.96	0.88	1.88	0.93	0.80
RH	4.39	0.93	0.94	4.39	0.95	0.93	4.58	0.92	0.93

1.3 老旧小区垂直绿化方案配置

1.3.1 创建理想化的老旧小区模型

根据老旧小区现场实测及航拍分析,老旧小区以平行式布局为主,同时考虑住区过小难以发挥空间形态及景观配置的微气候调控效力,以住区建筑数量大于 4 栋为标准,确定了具有代表性的 70 个老旧小区样本案例。从安徽省城建设计研究总院股份有限公司获取各样本的建筑物和街道几何信息,确定关键性设计要素的常见参数范围。在此基础上,综合考虑《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)以及《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)的要求,形成老旧小区标准化抽象模型(图 3)。

1.3.2 老旧小区垂直绿化方案配置

结合老旧小区现状并参考前人研究方案^[22-23],生成了 4 种垂直绿化方案和 1 个参考裸墙方案。绿化比例根据南北建筑立面的窗墙比确定。除裸墙外,所有方案都假设东西立面的绿化率为 100%,具体设置如表 2 所示。

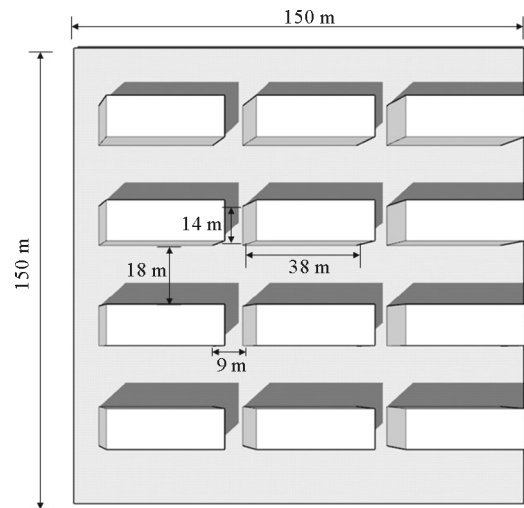


图 3 老旧小区住区标准化抽象模型

表 2 建筑立面不同垂直绿化设置方案

裸墙	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
四面均无绿化	南北立面无绿化,东西立面绿化率 100%	南北立面绿化率 35%,东西立面绿化率 100%	南北立面绿化率 65%,东西立面绿化率 100%	南北立面和东西立面绿化率均为 100%

本文的模型区域为 150 m×150 m×40 m,在水平和垂直方向上使用 1 m 的分辨率,边界条件来源于安徽省气象局,在简单强制模式下运行 22 h。模拟垂直绿化的特征根据垂直绿化实测数据并参考 PENG 等^[23]在南京测量的垂直绿化的参数进行设置,包括 15 cm 厚的沙壤土层和 35 cm 厚的植物层,植物的叶面积指数(LAI)为 3.5,反照率为 0.2,透光率为 0.3,基板与墙壁之间的缝隙为 0.5 m。

2 结果与分析

垂直绿化通过减少表面热流和蒸散效应来降低白天的最高温度。使用 T_a 、平均辐射温度(MRT)和生理等效温度(PET)来评估垂直绿化率对老旧小区微气候和热舒适的影响,并进一步讨论 5 个时间点下各方案 PET 等级的时空分布和占比情况。

2.1 垂直绿化率对空气温度的影响

根据气象站的数据显示,夏季最高气温出现在 14:00,从这个意义上来讲,图 4 显示了行人层水平在 14:00 的温度变化情况。垂直绿化对温度的冷却效果主要是通过遮荫和蒸散作用来实现的,一方面植物形成的阴影可以降低周围环境和下垫面的温度;另一方面植物通过蒸散作用将水变成水蒸气,吸收热量,降低叶片周围温度。为了定量分析不同垂直绿化率对温度的影响,将每个方案和裸墙之间的温度差定义为

$$\Delta T_a = T_{a, \text{方案}i} - T_{a, \text{裸墙}} \quad (i=1,2,3,4)$$

式中: ΔT_a 为温度差; $T_{a, \text{方案}i}$ 为各方案的温度; $T_{a, \text{裸墙}}$ 为裸墙的温度。

图 4 清楚地表明,应用于建筑立面的垂直绿化可以提供不同程度的冷却效果,以改善室外行人层水平的微气候。东南风对冷空气的流动产生重大影响,最大冷却强度通常在下风西北侧,最低冷却强度位于上风边缘^[24]。随着绿化率增加, ΔT_a 呈现不同程度的正比例增长。当绿化率从 0 变为 100%时, ΔT_a 的

最大变化值分别为 0.66、0.74、0.97 和 0.98 °C，平均变化值分别为 0.24、0.26、0.31 和 0.30 °C。方案 1 与裸墙相比，温度变化明显，最高可以达到 0.66 °C。方案 2 与方案 1 相比，温度的变化幅度很小，原因是此时南北立面的绿化排列较分散，形成局部小气候不明显。随着绿化率增加，南北立面绿化增多且集中分布，温度的变化更明显，最大 ΔT_a 为 0.98 °C。方案 3 与方案 4 相比， ΔT_a 最大值以及平均变化值很接近，这可能是因为更多的垂直绿化减缓了墙体表面风速，使温度的变化不显著。

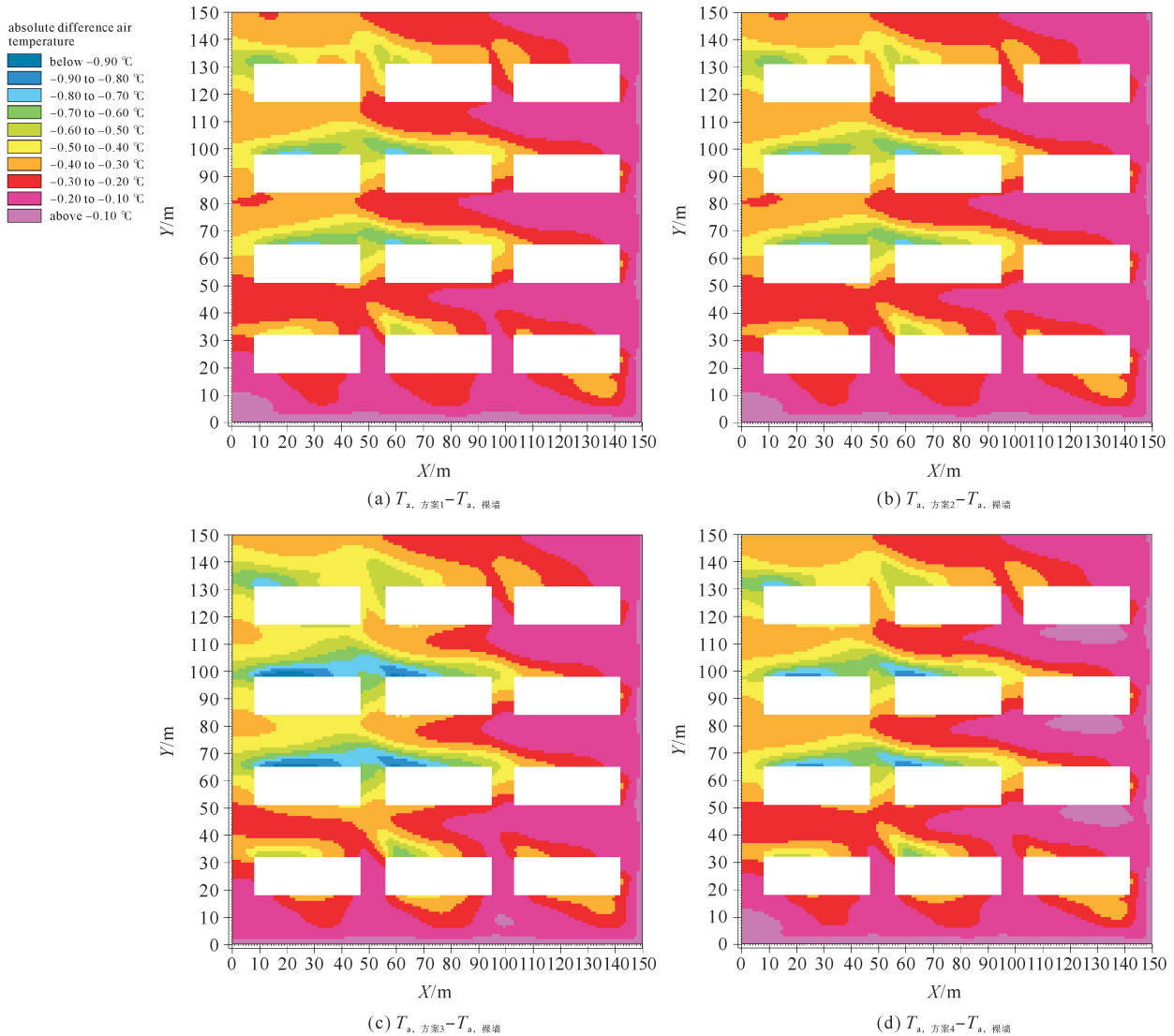


图4 各方案 ΔT_a 行人层变化情况

垂直绿化引起的冷却效果随立面高度的增加而减小，图 5 显示了 ΔT_a 在垂直方向的分布。与行人层规律相似，较高的绿化率提供了更好的冷却效果，当绿化率从 0 变为 100% 时， ΔT_a 的最大变化值分别为 0.65、0.72、0.94 和 0.85 °C，平均变化值分别为 0.16、0.17、0.19 和 0.17 °C。从地面向上冷却强度降低，靠近建筑底部冷却效果更好，这是因为街道底部较低的风速有利于冷空气的积累，并且冷空气密度较高，在重力的作用下，向下平流冷却。从中间往两侧，冷却效益逐渐减弱，最远可达到离建筑 5~6 m，6 m 之后显著降低。

2.2 垂直绿化率对平均辐射温度的影响

垂直绿化的植被层能吸收、反射和透射照射到表面的太阳辐射，与前文的定义相似，将各方案和裸墙之间的 MRT 差定义为

$$\Delta M = M_{\text{方案}i} - M_{\text{裸墙}} \quad (i=1,2,3,4)$$

式中: ΔM 为平均辐射温度差; $M_{\text{方案}i}$ 为各方案的温度; $M_{\text{裸墙}}$ 为裸墙的温度。

行人层在 14:00 ΔM 的变化情况如图 6 所示, ΔM 的变化值与绿化率有很强的关联关系。方案 1 到

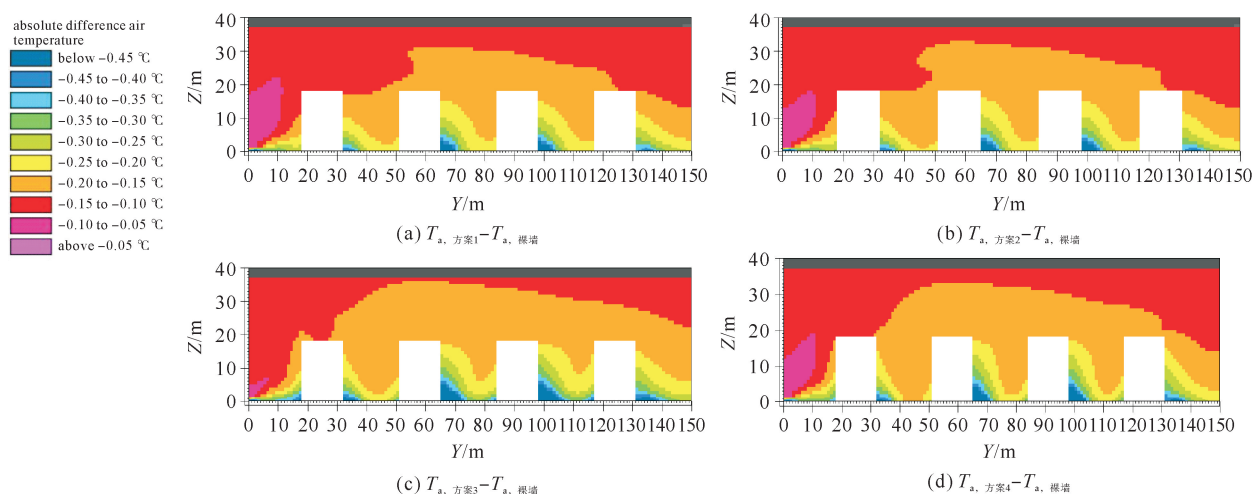


图 5 各方案 ΔT_a 垂直层变化情况

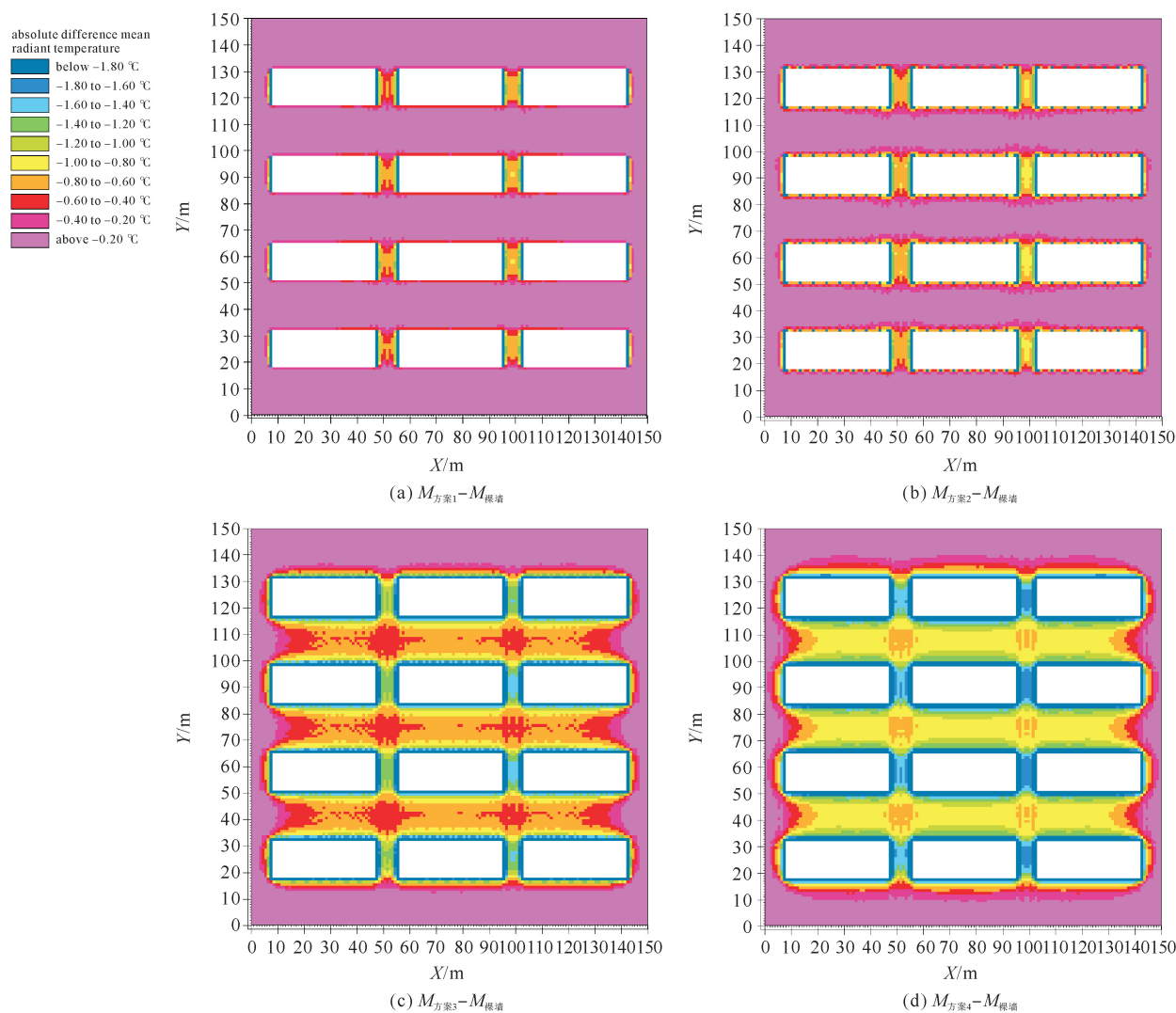


图 6 各方案 ΔM 行人层变化情况

方案4,随着绿化率增加,△M的最大变化值分别为2.86、2.92、3.76和4.12℃,平均变化值分别为0.28、0.36、0.80和1.01℃。其变化趋势与幅度与温度相似,因此此处不做具体分析。值得注意的是,此时太阳位于南面,垂直绿化吸收直接太阳辐射,随着南立面绿化面积的增加,冷却效果明显加强。

垂直平流允许冷空气向上和向下移动,以改善冠层气候。图7显示冷却效果具有明显的垂直模式,其特征是从地面往上冷却强度降低。与行人层的变化情况相似,绿化率越高,△M的变化越明显,△M的最大变化值分别为0.91、1.14、4.72和5.20℃,平均变化值分别为0.27、0.32、0.90和1.18℃。△M的降低程度随距离的增加而减弱。从地面往上,对MRT的改善可以蔓延到屋顶上方10~20m,这与PENG等的研究结果是一致的^[23]。以墙面为参考点,距离墙面越远,△M的变化越小,在距离建筑2m外,MRT改善效果明显减弱。

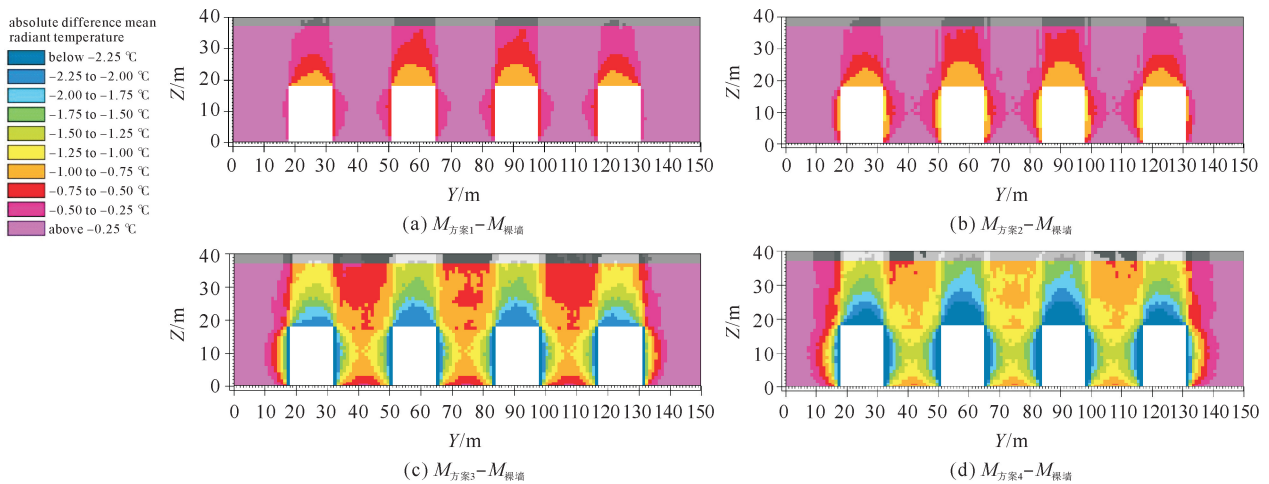


图7 各方案△M垂直层变化情况

2.3 垂直绿化率对热舒适度的影响

人体热舒适被定义为“人体对周围环境的满意度的心理状态”,主要受空气温度、太阳辐射温度、风速、湿度、衣服和代谢率产生等条件的影响。PET是最常用的人体热舒适度计算指标,这主要是因为它包含了全面的户外微气候和人为因素,使其更容易被接受^[25]。

将各方案和裸墙之间的PET差定义为

$$\Delta P = P_{\text{方案}i} - P_{\text{裸墙}} \quad (i=1,2,3,4)$$

式中:△P为PET差;P_{方案i}为各方案的PET值;P_{裸墙}为裸墙的PET值。

△P的大小主要取决于垂直绿化率,特别是在白天。图8显示了在14:00行人层△P在所有方案下与裸墙的对比如变化。△P的变化情况与绿化率成线性关系,绿化率越高,对热舒适的改善效果越明显。随着绿化面积的逐步增加,△P的最大变化值分别为1.59、1.62、2.03和2.22℃,平均变化值为0.48、0.51、0.72、0.74℃。综合上述结果分析,在进行老旧小区垂直绿化时,方案3是改造效果较好同时经济性较高的选择,其次是方案1。

2.4 各方案下PET时空分布情况

热舒适指标PET受地理位置和气候的影响,南京与合肥均属于Cfa气候区,参考DENG等^[26]在南京的热舒适研究,结合合肥当地气候条件,将PET分为9个等级(表3),选取6:00、9:00、12:00、15:00、18:005个时间点,对1名体重75kg,身高1.75m的成年男性进行PET指数计算。比较不同时间点的热舒适分布状况,绘制各等级PET值所占比例,以更清晰地表明垂直绿化对热舒适的改善情况。

由图9可知,与裸墙相比,各垂直绿化方案在各时间点表现出不同程度的改善效果。

6:00,太阳高度角较低,太阳辐射弱,裸墙环境中以“温暖”和“热”等级为主,“热”占比超过一半。与裸墙相比,方案1—4各PET等级有非常明显地改善,随着绿化率增加,“舒适”“略暖”“温暖”的占比均有所增加,“热”的区域缩减。

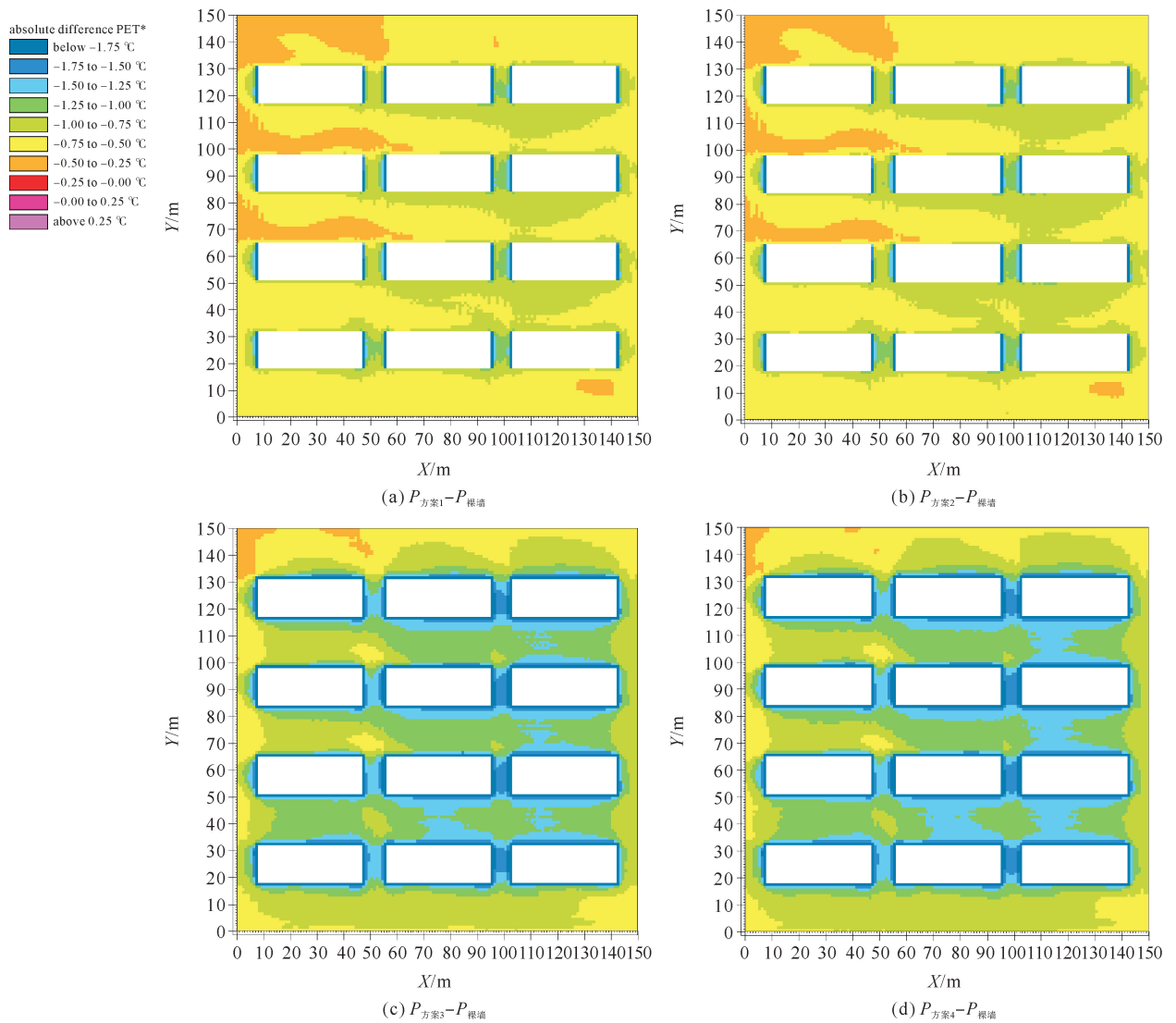


图 8 各方案 ΔP 行人层变化情况

表 3 合肥地区夏季 PET 等级

PET 等级	很冷	冷	凉	略凉	舒适	略暖	温暖	热	很热
温度/°C	<-4	-4~8	9~16	17~22	23~28	29~32	33~38	39~44	>44

9:00, 太阳辐射加强, 空间内“舒适”等级消失, 裸墙环境中“热”占比高达 85.1%。此时方案 1 “温暖”等级占比增加了 6.7%, “略暖”的等级占比增加了 42.9%, “热”占比明显减少, 降幅高达 49.5%。同理, 随着绿化率增加, 各等级的增减情况与方案 1 类似。

12:00, 太阳高度角较高, 太阳辐射持续加强, 空间内阴影面积减少, 各空间热舒适等级均较高, “热”“很热”占据很大的比例, 热舒适性较差。随着绿化率的升高, 绿化面积增多, 空间内“略暖”和“热”的比例升高, 而“很热”的比例下降。

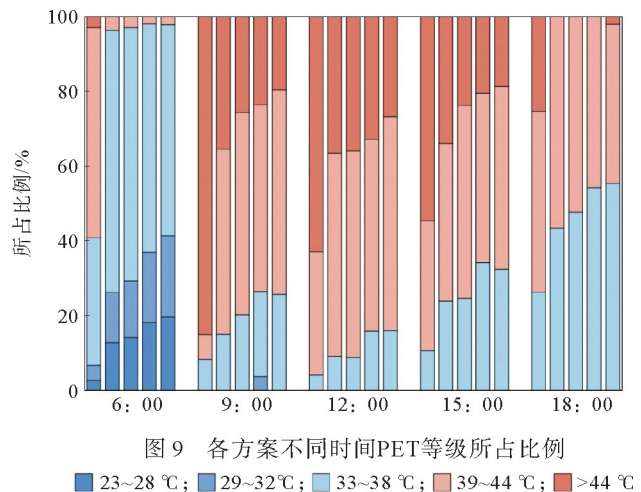


图 9 各方案不同时间 PET 等级所占比例

■ 23~28 °C; ■ 29~32 °C; ■ 33~38 °C; ■ 39~44 °C; ■ >44 °C

15:00,与12:00相似,各空间内热舒适只有“略暖”“热”“很热”3个等级,随着绿化率增加,“略暖”和“热”的比例升高,“很热”的比例下降,热舒适有所改善。

18:00,太阳高度角低,太阳辐射减弱,各空间中“略暖”的比例增加,而“很热”的比例大幅减少或者没有。然而,由于日间热量的累积效应,地表温度仍维持在较高水平,空间不舒适比例较高。随着绿化率的增加,“热”“很热”占比下降,有效改善了空间的热舒适。

3 结论

垂直绿化对于建设环境友好、可持续发展的城市至关重要,当地面绿地空间不足时,通过建筑立面空间来增加绿化率,成为提升夏季空间环境的有效选择,并可显著改善老旧小区的微气候和热舒适。

1) 垂直绿化不仅可以改善水平方向的微气候和热舒适,对垂直方向也有一定程度的调节作用。总体上,微气候和热舒适的改善程度与绿化率呈线性关系,绿化率越高,改善效果越显著。方案3与方案4的改善效果相似,说明当绿化率达到一定阈值时,额外的绿化将不再引起明显的变化。

2) 垂直绿化有效提升了空间的热舒适水平,尤其是降低空间中“极热”所占比例,受太阳高度角和辐射强度的影响,整体表现出早晚的改善效果好于中午的特征。

3) 综合各方案参数的变化发现,方案1与方案2变化幅度相似,这是因为虽然方案2南北立面有35%的绿化,但是绿化比较分散,形成局部微气候的能力较弱,因此垂直绿化应尽量集中分布。

综上所述,对老旧小区来说,在进行垂直绿化规划时应首选方案3,其次是方案1,这是对微气候和热舒适改善效果比较好同时经济性也比较高的选择。

通过数值模拟研究,量化分析了垂直绿化对老旧小区微气候和热舒适的影响,弥补了社区尺度上垂直绿化对微气候和热舒适影响研究的不足,增强了在不同垂直绿化率下垂直绿化对微气候和热舒适改善效果的理解,对改善热环境、提升室外热舒适度具有重要意义。

本研究有2个局限性,代表了未来有待探索的研究方向。首先,本研究主要对比分析了白天温度最高时间点垂直绿化对微气候和热舒适的改善作用,随着夜间热浪和城市热岛效应的加剧,有必要进一步研究垂直绿化在夜间的冷却性能。其次,本次研究关注点主要在室外的微气候和热舒适改善,但是垂直绿化在很大程度上也可以改善室内热环境和热舒适,因此未来的研究应将室内与室外相结合,以提供更好的理论支撑。

参考文献(References):

- [1] 唐劼,鲍家旺.基于热舒适度的老旧住区更新改造影响研究[J].建筑科学,2022,38(10):275-286.
TANG Ji,BAO Jiawang. Research on the influence of renewal and reconstruction of old residential areas based on thermal comfort[J]. Building Science,2022,38(10):275-286.
- [2] MEILI N,ACERO J A,PELEG N,et al. Vegetation cover and plant-trait effects on outdoor thermal comfort in a tropical city[J]. Building and Environment,2021,195:107733.
- [3] 任斌斌,李薇,谢军飞,等.北京居住区绿地规模与结构对环境微气候的影响[J].西北林学院学报,2017,32(6):289-295.
REN Binbin,LI Wei,XIE Junfei,et al. Effects of residential green spaces with different scales and structures on micro climatic environment in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(6):289-295.
- [4] 周佳涵,张晓瑞,刘畅.院落内绿化对院落空间的舒适度影响的数字化研究[J].青岛理工大学学报,2023,44(4):169-176.
ZHO Jiahuan,ZHANG Xiaorui,LIU Chang. Digital research on the influence of courtyard greening on the comfort of courtyard space[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2023,44(4):169-176.
- [5] 李砚晗,李琼.广州老旧住区过渡季室外热舒适评价及调控范围研究[J].建筑科学,2022,38(2):71-81.
LI Yanhan,LI Qiong. Study on outdoor thermal comfort evaluation and control range of old residential districts in Guangzhou in transition season[J]. Building Science,2022,38(2):71-81.
- [6] 刘启波,杨雯婷.基于气候特征的居住区室外热舒适多目标优化布局研究:以西安地区为例[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(1):54-60.
LIU Qibo,YANG Wenting. Study on multi-objective optimization layout of outdoor thermal comfort in residential areas based on climate characteristics: Taking Xi'an as an example[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition),2022,54(1):54-60.

- [7] 刘爽,林程扬,谭丹,等. 湛江5个园林树种夏季微气候研究[J]. 生态科学,2023,42(5):241-246.
LIU Shuang, LIN Chengyang, TAN Dan, et al. Study on microclimate around 5 garden tree species in summer in Zhanjiang[J]. Ecological Science, 2023, 42(5): 241-246.
- [8] 董楠楠,戴旺,杜诚. 立体绿化对室外热环境的影响机制和效益评估指标研究[J]. 城市建筑,2021,18(22):185-190.
DONG Nanna, DAI Wang, DU Cheng. Study on impact mechanism and benefit evaluation index of three-dimensional greening on outdoor thermal environment[J]. Urbanism and Architecture, 2021, 18(22): 185-190.
- [9] 潘澜,郑晓娜,罗霜,等. 垂直绿化的建筑节能与室外降温效应研究进展[J]. 应用生态学报,2023,34(10):2871-2880.
PAN Lan, ZHENG Xiaona, LUO Shuang, et al. Review on building energy saving and outdoor cooling effect of vertical greener systems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10): 2871-2880.
- [10] 罗霜,蔡晓毅,郑晓娜,等. 垂直绿化对城市微气候影响研究综述[J]. 世界林业研究,2023,36(2):45-50.
LUO Shuang, CAI Xiaoyi, ZHENG Xiaona, et al. A review of research on the influence of vertical greenery system on urban microclimate[J]. World Forest Research, 2023, 36(2): 45-50.
- [11] 陈宇,宋双双,侯雅楠. 南京市夏季垂直绿化对人体舒适度的影响探究[J]. 中国园林,2020,36(9):64-69.
CHEN Yu, SONG Shuangshuang, HOU Yanan. Effect on vertical greening in summer on human comfort in Nanjing[J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(9): 64-69.
- [12] 陈翔,付颖坤,车芸,等. 垂直攀爬绿化在夏季对石家庄教学建筑室内外热环境影响实测分析[J]. 建筑节能(中英文),2021,49(3):34-38.
CHEN Xiang, FU Yingkun, CHE Yun, et al. Measured analysis of influence of vertical climbing greening on indoor and outdoor thermal environment of Shijiazhuang teaching buildings in summer[J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(3): 34-38.
- [13] TALEGHANI M, SAILOR D J, TENPIERIK M, et al. Thermal assessment of heat mitigation strategies: The case of Portland State University, Oregon, USA[J]. Building and Environment, 2014, 73: 138-150.
- [14] CUI D J, ZHANG Y, LI X Y, et al. Effects of different vertical facade greenery systems on pedestrian thermal comfort in deep street canyons[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 72: 127582.
- [15] 孙泽浩,张本效. 老旧小区立体绿化的可行性分析[J]. 建筑与文化,2018(1):151-153.
SUN Zehao, ZHANG Benxiao. The feasibility analysis of vertical planting in old residential quarters[J]. Architecture and Culture, 2018(1): 151-153.
- [16] YANG Y, HU K, LIU B, et al. Optimisation of building green performances using vertical greening systems: A case study in Changzhou, China[J]. Sustainability, 2023, 15(5): 4494.
- [17] TAN Y, FUKUDA H, ZHANG L, et al. An investigation into residents' willingness to pay for vertical greening in China[J]. Urban Ecosystems, 2022, 25(4): 1353-1364.
- [18] CUI D J, ZHANG Y, LI X Y, et al. Effects of different vertical facade greenery systems on pedestrian thermal comfort in deep street canyons[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 72: 13.
- [19] LAM C K C, LEE H, YANG S R, et al. A review on the significance and perspective of the numerical simulations of outdoor thermal environment[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 71: 102971.
- [20] MULLER N, KUTTLER W, BARLAG A B. Counteracting urban climate change: Adaptation measures and their effect on thermal comfort[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 115 (1/2): 243-257.
- [21] 耿红凯,卫笑,张明娟,等. 基于 Envi-met 植被与建筑对微气候影响的研究:以南京农业大学为例[J]. 北京林业大学学报,2020,42(12):115-124.
GENG Hongkai, WEI Xiao, ZHANG Mingjuan, et al. Influence of vegetation and architecture on microclimate based on Envi-met: A case study of Nanjing Agricultural University[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(12): 115-124.
- [22] MORAKINYO, TOBI E, ALANLAU, et al. Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2019, 37: 42-55.
- [23] PENG L L H, JIANG Z D, YANG X S, et al. Cooling effects of block-scale facade greening and their relationship with urban form[J]. Building and Environment, 2020, 169: 106552.
- [24] TAN Z, LAU KKL, NG E. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment[J]. Energy and Buildings, 2016, 114: 265-274.
- [25] LIU Z X, CHENG W W, JIM C Y, et al. Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4[J]. Building and Environment, 2021, 200: 107939.
- [26] DENG J Y, HE Y Y, DAI M L. Evaluation of the outdoor thermal environment for three typical urban forms in Nanjing, China[J]. Building and Environment, 2023, 238: 110358.