

王婷, 陈小芮, 章家恩, 等. 不同绿化改造方案对小区微气候环境影响的 ENVI-met 模拟研究 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 61-68.
WANG Ting, CHEN Xiaorui, ZHANG Jia'en, et al. Influence of landscape layout on microclimate in residential area based on ENVI-met simulation[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 61-68.

不同绿化改造方案对小区微气候环境影响的 ENVI-met 模拟研究

王 婷^{1,2}, 陈小芮³, 章家恩², 叶昌东¹

(1 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642;
3 广州市设计院, 广东 广州 510620)

摘要:【目的】利用数值模拟不同绿化布局方案对居住区微气候的影响, 以期获取最优绿化方案。【方法】以广州某老旧小区为研究对象, 选取典型湿热天气条件, 对研究区的室外微气候要素进行测量; 利用模拟软件 ENVI-met 构建实况数值模拟模型, 将模拟结果与实测值进行对比分析, 验证模型精度和质量; 对研究区预设的 3 种绿化方案微气候特征进行模拟分析。【结果】清理灌木后温度较现状平均升高 0.1℃, 湿度平均降低 0.51%, 可适当改善低处通风情况; 去除乔木后温度升高近 0.4℃, 湿度降低 1.18%, 整体风速明显增大; 屋顶简单式绿化具有一定的降温增湿效果, 温度降低 0.16℃, 湿度增加 1.17%, 风速较现有绿况变化不大。【结论】ENVI-met 能够较好地预测温度和湿度的日变化趋势, 能有效地评估老旧小区空间的营造与绿化改善效果。

关键词: 微气候; ENVI-met; 老旧小区; 数值模拟; 绿化布局
中图分类号: P463.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)04-0061-08

Influence of landscape layout on microclimate in residential area based on ENVI-met simulation

WANG Ting^{1,2}, CHEN Xiaorui³, ZHANG Jia'en², YE Changdong¹

(1 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
3 Guangzhou Design Institute, Guangzhou 510620, China)

Abstract: 【Objective】The effects of different landscape layout schemes on microclimate of residential area were numerically simulated to obtain the optimal scheme. 【Method】Taking an old residential area in Guangzhou as the research site, we measured key characteristics of the outdoor microclimate under typical humid and hot weather condition. A numerical simulation model was built using ENVI-met software. The accuracy and quality of the model were validated by comparing the simulation results with the measured values. The microclimate characteristics of three landscape layout schemes were simulated and analyzed. 【Result】Comparing with the current landscape condition, after clearing shrubs from the landscape layout, the mean temperature increased 0.1℃ and the mean humidity decreased 0.51%, and ventilation near the ground was moderately improved. After removing trees from the landscape layout, the mean temperature increased 0.4℃, the mean humidity increased 1.18%, and the overall wind speed evidently increased. After the roof was

simply landscaped with green plants, the mean temperature decreased 0.16 °C, the mean humidity increased 1.17%, and the wind speed did not obviously change. 【Conclusion】 ENVI-met model can be used to well predict the diurnal variation trend of temperature and humidity, to effectively evaluate the influence of landscape planning and improvement in old residential areas.

Key words: microclimate; ENVI-met; old community; numerical simulation; landscape layout

随着城市化进程的加快,城市下垫面性质发生巨大改变,造成城乡尺度上的热岛效应,同时对城市街区微气候的影响也日趋显著^[1]。城市微气候是城市内街区尺度的气候状况,除了受局域太阳辐射、风和空气湿度等自然因素影响外,它还受小尺度区域的植物覆盖率、土壤层性质、建筑密度等因素及各类人为因素的影响^[2]。以往对微气候的研究大多采用现场实测加分析的方法^[3],获取连续分布的气象格点数据需大量的人力、物力和资金^[1]。近几年来,不少学者采用软件数值模拟的方法研究复杂多变的城市微气候。秦文翠等^[1]利用 ENVI-met 对北京某居住区的微气候特征进行了模拟分析,模型模拟结果与实测结果较接近,能较好地反映微尺度气候的分布特征;林满等^[4]通过实地观测和 ENVI-met 模拟,研究了广州某小区的微气候特征;章莉等^[5]利用模型模拟居住区中不同绿地率、乔木覆盖率下的不同绿地情景,研究武汉夏季 15:00 时,绿地对居住区场地平均空气温度的调节作用,结果表明绿地对场地温度的调节作用受场地建筑高度、建筑密度、容积率等因素影响。

广州属于高密度湿热地区,城市中存在着数量庞大的老旧小区,其建筑布局紧凑,绿化景观欠修整。2017 年以来广州开始了新一轮的城市更新工作,2000 年前建设的老旧小区为主要更新对象之一。目前,广州作为住建部老旧小区改造试点城市,至 2020 年计划推进 779 个老旧小区的改造工作,其中小区人居环境的改善是主要更新目标之一。本研究以广州市天河区华南农业大学内建成历史超过 20 年的某老旧小区作为试验基地,选择代表性的湿热天气条件,在对该小区室外微气候要素实测的基础上,使用 ENVI-met 软件模拟当日微气候要素,将实测与模拟的结果进行对比分析,以验证模型精度与质量。在此基础上,预设 3 个绿化更新方案,模拟不同更新方案的微气候特征,并进行对比分析,以期为期日趋增多的老旧小区更新项目中进行居住区绿化布局设计与优化改造提供一定的参考和依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

本次研究地点位于广州天河区华南农业大学校内的一处典型老旧小区,研究的核心区面积约 14 500 m²,如图 1a 中红色线圈范围,为近似菱形。需要考虑的周边环境建模范围为 240 m×260 m 的近似方形区域,如图 1a 中黄色虚线方框内部分。该小区建于 1996 年,由 12 栋 7 层高约 20 m 的楼梯房组成,分 5 行呈行列式南北向布局。研究范围内下垫面有 5 类,包括建筑屋面、路面(包括混凝土材质及红色透水砖)、植被、水体及广场。该研究区内主要绿化形式为建筑附属绿地和道路绿地,南侧分布有集中绿地,建筑周边有少量宅间绿地。植物类型囊括了乔木、灌木、地被 3 类,均为亚热带地区常见树种。

1.2 现场实测方案

本次现场气象实测数据采用 kestrel 5000 手持式气象记录仪进行定点定时记录,kestrel 5000 具有精度高、性能强和便于携带的特点。仪器相关参数信息如下:风速测量范围为 0.4~40.0 m/s,精度±3%,分辨率 0.1 m/s;空气温度测量范围为 -29~70 °C,精度 0.5 °C,分辨率 0.1 °C;相对湿度测量范围为 5%~95%,精度±2%,分辨率 0.1;大气压力测量范围为 700~1 100 hPa,精度 1.5 hPa/mb,分辨率 0.1 hPa/mb。

实测时间为 2018 年 5 月 19 日 09:30—17:30,每间隔 1 h 实测 1 次,同时考虑核心区内建筑组合的不同位置及下垫面差异,采用均匀布点设置 4 个测试点(图 1b)。其中测点 1 为小区环路西侧,下垫面为水泥;测点 2 和 3 选择行列式住宅间街谷位置,下垫面均为水泥,但测点 2 位于垂直通风道北侧;测点 4 选择在南向开敞绿地,下垫面为草地。使用手持式气象记录仪对 4 个测点的气象数据进行观测并记录,主要记录 1.5 m 处风速、空气温度和相对湿度,风向判断基于人工观测。此外,研究区的马路宽度和建筑物尺寸采用手持激光 D5 测距仪(测试范围为 0.05~200.00 m,精度为±1.0 mm)测定。同时对植被类型和种植情况进行实地调研。



图1 研究区遥感影像图和模型示意图

Fig.1 Remote sensing image and schematic diagram of the research area

1.3 ENVI-met 微气候模拟

1.3.1 模型量化 微气候模拟软件 ENVI-met 由德国波鸿大学的 Micheal Bruce 和 Heribert Fleer 于 1998 年开发^[6]。本次研究所采用的版本为 ENVI-met V4^[7]。本次研究核心区域面积约 14 500 m², 近似于 1 个不规则菱形, 但为使模型更接近于实际情况, 增加模拟运算的准确性, 将建立模型的范围扩大到 240 m×260 m, 水平方向设置 60×65 个网格, 分辨率为 4 m。将 240 m×260 m 建模范围的卫星影像 (数据来源于空间分辨率为 0.61 m 的 Quickbird 卫星, 影像采集时间为 2011 年 7 月), 以 BMP 格式导入软件中作为参照, 绘制建筑、下垫面、植被等要素, 并设置采集模拟数据的监测点位置。

ENVI-met 垂直方向网格分辨率有 4 种类型, 本次研究区域内最高建筑为 45 m, ENVI-met 为保证模拟结果有效, 模型的上边界高度需大于区域内建筑高度的 2 倍, 同时微气候模拟需获取 1.5 m 处数据。模型设置 7 个嵌套网格, 地表类型为土壤和沥青 2 种, ENVI-met 将自动对其进行棋盘式间隔排列^[8]。

1.3.2 参数设置 ENVI-met 软件中需要的主要输入量均基于当地实际地理和气候条件, 软件初始参数设置并不适用于广州市, 因此需要依据当地情况进行相应调整。模型主要输入量包括地理信息、气象条件、土壤条件和模拟控制参数, 具体如下: 地名为广州/中国, 经纬度为 113.37°E, 23.16°N, 时区为东八区 (北京时间), 海拔为 31 m; 10 m 高风速为

0.48 m/s, 根据风速轮廓线公式计算^[9]; 风向为 160°; 初始空气温度和 1.5 m 高相对湿度采用 2018 年 5 月 19 日 9:30 的实测数据, 初始空气湿度为 30.78 °C, 1.5 m 高相对湿度为 72.15%; 2 500 m 高绝对湿度取气象站数据为 6.24 g/kg^[10]; 0~20 cm 表层土壤温度为 28.85 °C, 相对湿度为 35%, 20~50 cm 中层土壤温度为 30.85 °C, 相对湿度为 40%, >50 cm 深层土壤温度为 31.85 °C, 相对湿度为 45%; 模拟时间为 2018 年 5 月 19 日 09:30—17:30, 输出间隔时间为 60 min, 温湿度边界条件为开式 Open model LBC, 湍流模型边界条件为循环式 Cyclic model LBC, 粗糙度为 0.1。

本次模拟输入的建筑属性包括建筑墙体、建筑屋顶的材质、厚度、传热系数等参数参考《(夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准) 广东省实施细则》设置^[11], 其余未列出的项目均采用软件默认参数。

ENVI-met 自带植物数据库中的树种主要来自高纬度地区, 并不适合本研究区域。本研究在数据库中更新为能代表广州地区的主要地被、灌木、小乔木、乔木和藤本等 5 种植物类型, 对植物的编辑主要包括植株高度与宽度、根系深度、叶面积体密度分布 (Leaf area density, LAD)、根系面积分布数 (Root area density, RAD) 等几个方面, 参考了文献 [12] 的相关参数设置。具体数据如下所示: 在 ENVI-met 植物数据库中, 地被即草地, 植株高度为 20 cm, 中等密度, 根系深度为 0.5 m; 灌木植株高度为 100 cm, 中等密度, 根系深度为 1.0 m; 小乔木植

株高度为 3.3 m, 高密度, 基部无叶; 乔木以植株高度分为 2 种, 10 和 15 m 乔木, 高密度, 基部无叶, 根系深度均为 2.0 m。地被的 LAD 1~10 均为 0.30; 灌木 LAD 1~10 依次为 0.060、0.060、0.150、0.320、0.480、0.690、0.980、1.210、0.890 和 0.120; 小乔木 LAD 1~10 依次为 0.750、0.750、0.750、0.360、0.840、0.920、1.230、1.210、0.780 和 0; 10 m 乔木 LAD 1~10 依次为 0.075、0.075、0.075、0.075、0.250、1.150、1.060、1.050、0.920 和 0; 15 m 乔木 LAD 1~10 依次为 0.040、0.040、0.070、0.110、0.130、0.150、0.140、0.130、0.100 和 0; 采用植被的 RAD 1~10 均为 0.10。数据库种类植物均采用平均密度。

1.3.3 模型评价 参照文献 [13] 的方法, 采用均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 和平均绝对百分比误差 (Mean absolute percentage error, MAPE) 2 个指标对模型的精度进行评价。RMSE 在测试次数 (n) 为有限值时, 可用该公式来衡量模拟值同实测值之间的偏差; MAPE 采用百分比衡量模型误差, 适用于多类不同数据间的比较, 一般认为若 MAPE 值小于 10%, 则模拟精度较高。具体公式如下:

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

(1)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y'_i - y_i|}{y_i} \times 100\%,$$

(2)

式中, y'_i 为模拟值, y_i 为实测值, n 为实测次数。

1.4 不同绿化改造方案

笔者前期参与了大量广州市老旧小区的调研工作, 在调研过程中发现广州老旧小区环境宜居方面有一个主要问题: 通风采光较差, 湿度较大。依据现状, 本研究预设了 3 种基于不同改善目的的绿化方案进行 ENVI-met 模拟。以修整小区杂乱灌木为目的的“乔木+地被”方案, 模型中将现有灌木去除; 以增加老旧小区低层采光为目的的“灌木+地被”方案, 模型中将现有乔木替换为灌木; 以增加现有绿化面积为目的的“屋顶绿化”方案, 本方案在现有基础上用低矮的景天类地被植物对屋顶进行绿化覆盖, 覆盖率为 80%。

2 结果与分析

2.1 模型评价

模型模拟结果使用 RMSE 和 MAPE 进行评价。以距地面 1.5 m 测量数据通过公式计算得到相应数值。风速、温度、相对湿度的日平均 RSME 分别为 0.11 m/s、0.85 °C 和 4.69%, 除风速的 MAPE (63.51%) 过高, 温度 (2.38%) 和相对湿度 (8.31%) 的日平均 MAPE 都小于 10%; 而风速的 MAPE 持续偏高。温度的模拟有效性最高, 相对湿度的模拟精度次之, 风速的模拟有效性相对较差。通过分析并结合前人的评价研究 [14-16], ENVI-met 能够较好地预测老旧小区的微气候环境, 尤其是温度和湿度的日变化趋势。

2.2 实测结果

研究区域白天的温度、相对湿度和风速进行实测得到的结果显示, 测点 1 的水泥路面在 14:30 出现最高温, 而且由于西晒, 整体保持比其他测点温度较高的状态; 建筑物之间的街谷地带 (测点 2、测点 3) 由于受建筑遮挡的影响, 虽然下垫面也为水泥地, 但较测点 1 的温度低; 测点 4 的开敞绿化地为低温 (图 2a); 空气湿度整体上随着温度升高而降低, 测点 4 为高湿区, 街谷地带测点 2 由于地处建筑物间的风道, 湿度较测点 3 低 (图 2b)。实测过程中, 风速的变化波动较大, 测点 4 为高风险区, 测点 3 是低风险区 (图 2c)。

2.3 实测与模拟结果的对比分析

本次研究主要选取广州典型湿热天气日间段, 主要对研究区距地面 1.5 m 实测微气候环境与其模拟值进行对比。由于边界条件设置的模糊化, 本次研究主要针对核心区域进行分析。由图 3a 可知, 空

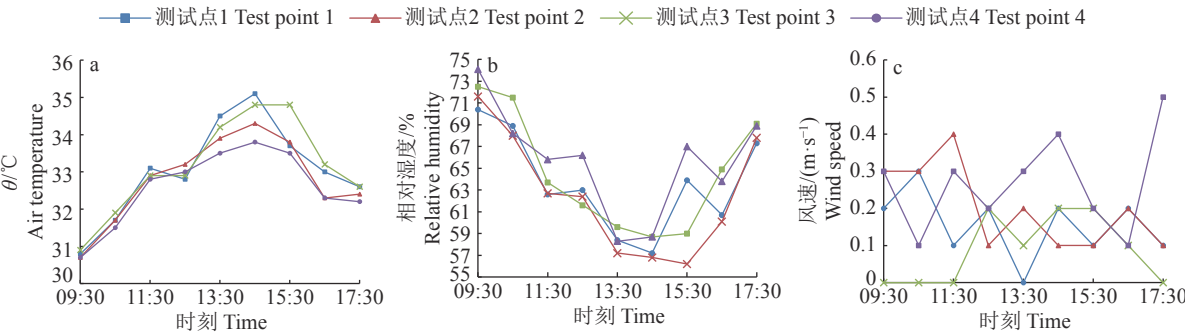


图 2 空气温度、相对湿度和风速实测结果

Fig. 2 Measured air temperature, relative humidity and wind speed

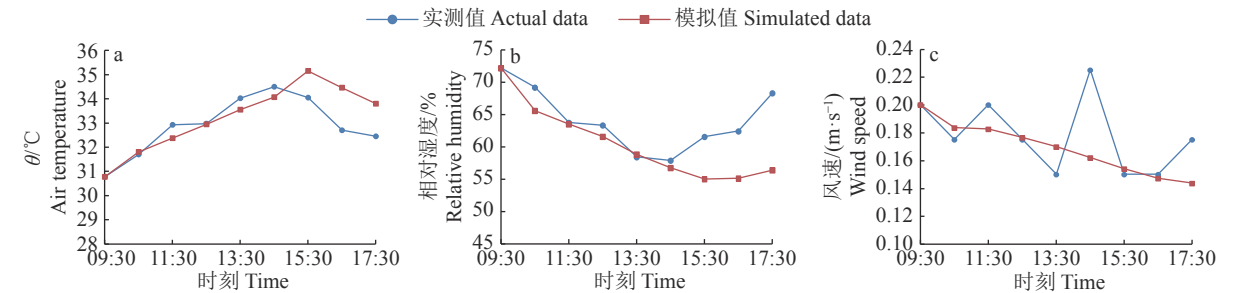


图 3 不同时间点空气温度、相对湿度和风速实测与模拟结果

Fig. 3 Measurement and simulation results of air temperature, relative humidity and wind speed at different time

气温度和相对湿度的模拟值与实测值较接近, 模拟软件很好地捕捉了 2 个物理量的日变化情况。模拟温度与实测温度在 9:30—14:30 基本吻合, 而从 15:30 开始, 模拟值高于实测值, 实测温度最高值出现在 14:30 时, 模拟温度最高值出现在 15:30, 误差均在允许范围内。对不同测试点日平均值进行比较分析, 由图 4a 中实测结果与模拟结果对比可知, 模

拟值普遍高于实测值; 由于太阳直射时间较长, 两者的温度最高点均为测点 2, 两者的拟合度最高, 仅相差 0.2 °C; 而位于开敞绿地的测点 4 为温度最低点, 但模拟与实测结果相差较大, 模拟温度明显高于实测温度, 可能与研究核心区外围周边高大乔木建模误差有关。

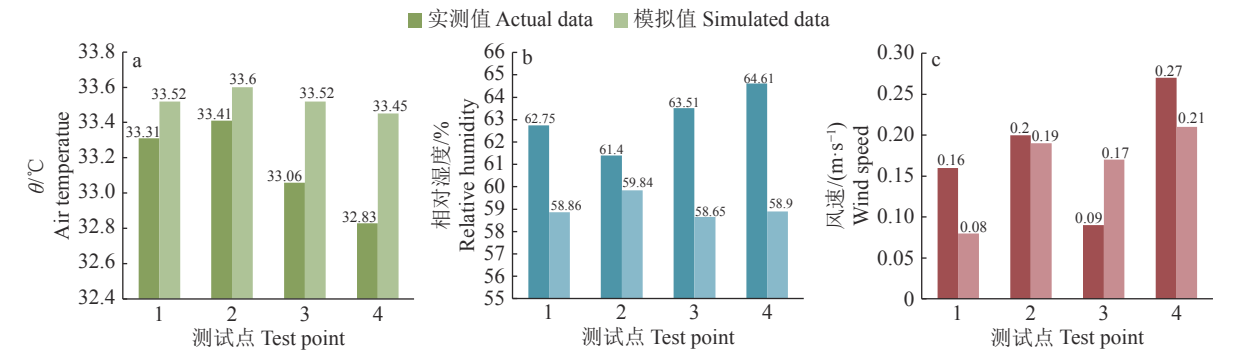


图 4 不同实测点空气温度、相对湿度和风速实测与模拟结果

Fig. 4 Measurement and simulation results of air temperature, relative humidity and wind speed at different measured points

由于通常存在高温低湿和低温高湿现象, 如图 3b 显示, 本研究中相对湿度的曲线走势也与温度相反, 呈波谷形态; 模拟值与实测值变化趋势较一致, 模拟值略低于实测值, 且同样在 15:30 以后出现偏差。如图 4b 中对不同测点湿度模拟与实测分析结果表明, 相对湿度在研究区域内部相差较小, 绿化较多的区域相对具有较好的增湿效应; 测点 4 模拟与实测的相对湿度均最高; 老旧小区内部由于建筑的组合排布, 空气中水汽散失较慢, 出现空气相对湿度分布较均匀的特点, 测点 2 由于日均温度最高, 同时位于建筑街谷风道位置, 日均湿度为最低, 模拟结果中最低湿度出现时间为 15:30。

在对风速的模拟方面, 由于模型本身模糊了一些环境影响的偶然性, 相对于复杂的城市环境来说, 风环境的模拟较稳定, 而实测过程中, 风速瞬时

变化大, ENVI-met 不能模拟逐时动态风速, 因此风速模拟上误差可能会较大 (图 3c)。在图 4c 中显示风速测点 1 到测点 4 的模拟值与实测值日均值差值分别是 0.08、0.01、0.08 和 0.06, 在时间平均值上两者较接近, 分别是 0.18 和 0.16 m/s, 从这方面来讲, 本次模拟也能较好地反映实测情况。

2.4 不同绿化改造方案微气候模拟分析

基于老旧小区现状情况, 针对不同改善目的的预设绿化方案进行了微气候 ENVI-met 模拟, 加上现状绿地布局, 形成了 4 种不同绿地布局方案的模拟对比, 图 5、图 6 和图 7 分别是 14:30 的空气温度、相对湿度及风速模拟分布图, 图中 a~d 分别为现状、乔木+地被、灌木+地被、增加屋顶绿化的模拟情况分布图。

从图 5 中 14:30 的温度分布图可以看出, 建筑

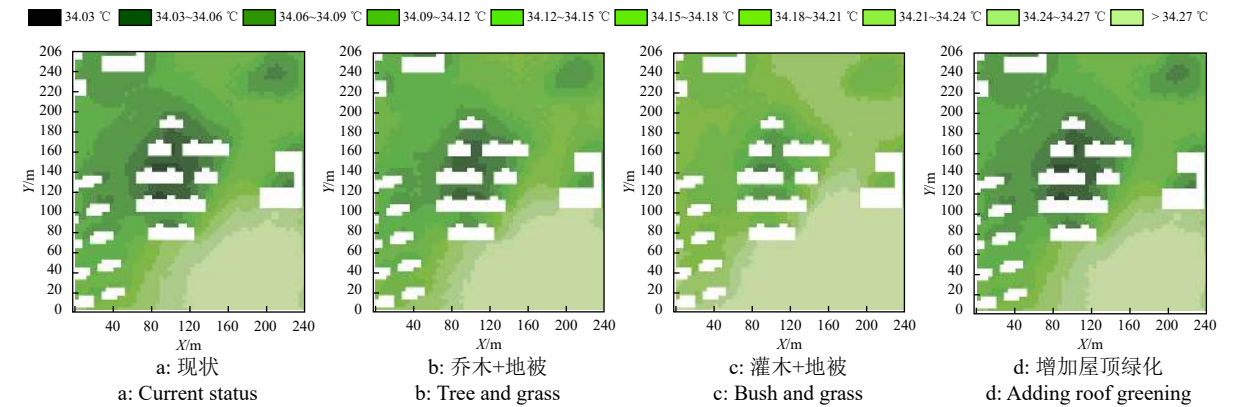


图 5 不同绿化方案情景下的空气温度模拟分布图

Fig. 5 Simulated distribution of air temperature in different greening layout

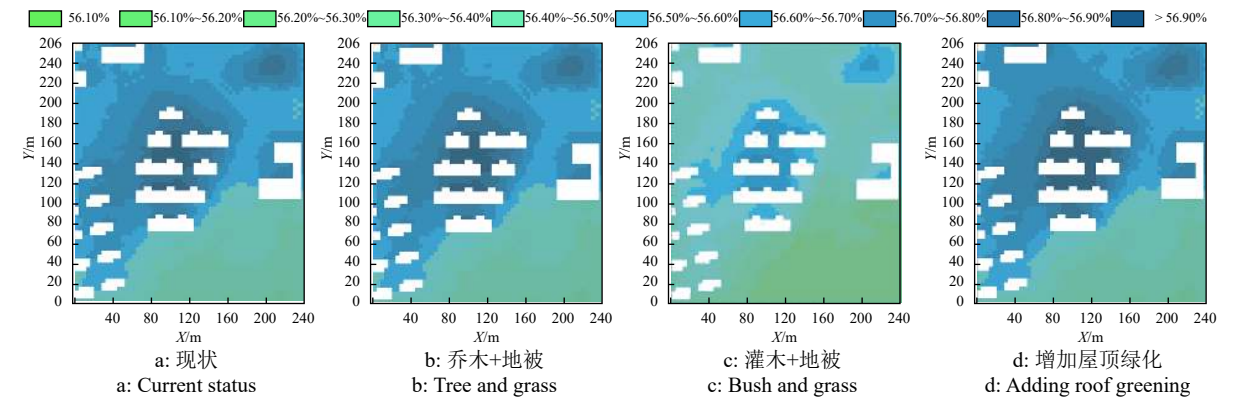


图 6 不同绿化方案情景下的相对湿度模拟分布图

Fig. 6 Simulated distribution of relative humidity in different greening layout

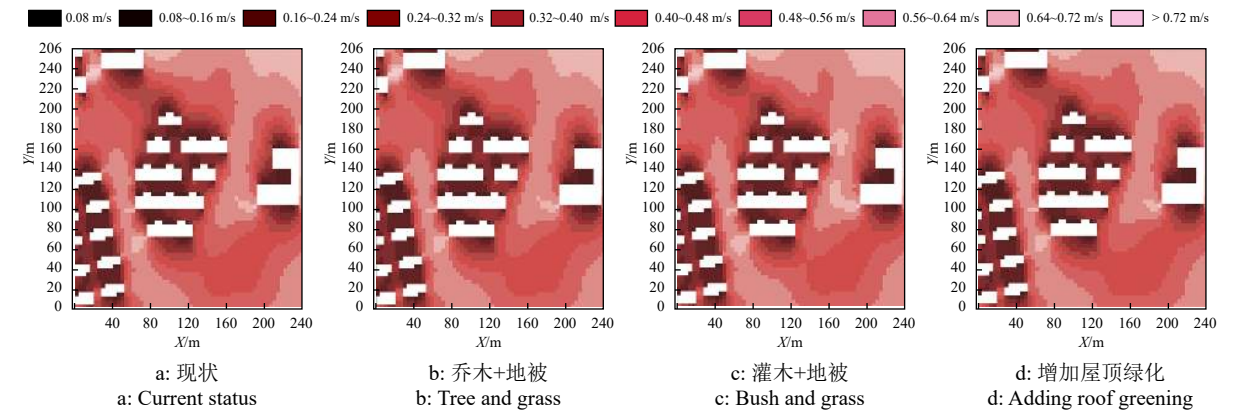


图 7 不同绿化方案情景下风速模拟分布图

Fig. 7 Simulated distribution of wind speed in different greening layout

阴影区域是主要低温区，以下垫面为水泥混凝土的小区道路上高温区最多，灌木+地被尤其明显。从图 8a 的模拟比值图也能看出，乔木+地被和灌木+地被由于绿化量的减少，整体温度升高，尤其是减少乔木的灌木+地被，最高温度为 34.80 °C，屋顶绿化高温时段温度为 34.30 °C，现状为 34.46 °C，乔木+地被为 34.55 °C，4 组模拟的最高温都出现在 15:30。由此表明乔木对场地降温作用明显；灌木的减少对场地温度的升高有一定的影响，但不明显；

即使仅采用简单式屋顶绿化，在高温时段对研究区域的降温效果依然明显。

从图 5 和图 8b 可知，4 组模拟均遵循“高温低湿、低温高湿”的规律，不同预设方案的相对湿度与空气温度分布都呈现出明显的镜像关系，低湿区均分布在温度较高的区域，即小区道路位置。与温度分布相契合，4 组模拟出现最低湿度的时间点均为 15:30；灌木+地被低湿效应明显，最低湿度 53.80%；现状、乔木+地被高湿区域分布较接近，主

要分布在建筑四周以及乔木密集区域, 两者最低湿度分别为 54.98% 和 54.47%; 屋顶绿化建筑物周围变化最明显, 颜色变化最深, 其最低湿度为 56.15%, 比最低值高出 2.35%。由此可见, 在建筑物屋顶设置简单的绿化, 可以改变相对湿度的空间分布, 使建筑物周围出现不同程度的增湿。

从图 7 可以看出, 小区道路作为风道, 风速较建筑物间明显增大; 建筑组团闭合的环境里空气通风较差, 建筑间南北向峡谷处湍流加剧, 风速加大。风速模拟分布图区别不大, 究其原因, 一方面是由

于老旧小区建筑较密集, 不同绿地布局模式对风速分布的影响并不大; 另一方面是由于湿热季节初始风速数值低的缘故; 再者, 与 ENVI-met 不能模拟逐时动态风速有关。但从风速模拟曲线图 8c 中依然能看出不同模拟方案的微差别。乔木+地被 1.5 m 处风速略大于现状绿化布局, 可能是由于预设清除灌木层, 打通了乔木树冠以下通风道的原因; 而灌木+地被整体风速大于其他方案, 表明乔木对风速的影响比较大。

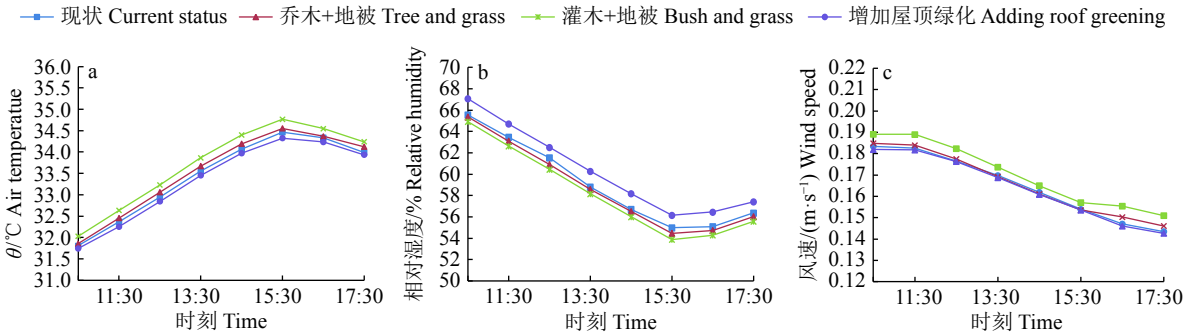


图 8 不同绿化方案的空气温度、相对湿度及风速模拟对比图

Fig. 8 Comparison of simulated values of air temperature, relative humidity and wind speed among different greening layouts

3 结论与讨论

以广州典型老旧小区为研究对象, 采用观测和模拟相结合的方法, 选取广州地区典型湿热晴朗天气, 研究了老旧小区气温、湿度和风速的微气候特征。基于对模型评价较符合实测的前提下, 对研究区域预设的不同绿化方案进行微气候效应模拟分析, 得到以下结论:

采用 RMSE 和 MAPE 2 个指标对 ENVI-met 模型拟合及预测能力进行评价, 结果表明, 其模拟精度较好, 能较好地捕捉该区域的温度、湿度时空变化趋势, 与实地观测结果较吻合。风速的模拟误差较大, 但对于多个绿化方案风速模拟对比分析仍具有可行性。

通过分析实测数据与模拟的微气候环境特征, 可知绿化对湿热地区微气候环境降温的改善作用较好, 测试点中下垫面为水泥路面的非阴影区域温度要明显高于绿化区域; 但温度低点出现在建筑阴影区, 表明温度的分布不仅受绿化率的影响, 还与植物的配置、建筑的空间组合等有关; 相对湿度在研究区域内部相差较小, 绿化较多的区域比硬质下垫面区域湿度稍大。在老旧小区内部, 由于建筑排布较紧密, 加上植被生长相对高大密集, 空气中水汽散失较慢, 出现空气相对湿度分布较均匀的特

点; 风速值在不同时空差异较大, 绿化空旷地与建筑峡谷地带风速大于建筑排列封闭区域, 过长的单元拼接不利于通风, 灌木密集区对 1.5 m 高处风速的影响也较大。

不同绿化预设方案的模拟表明, 研究区域设置拓展式屋顶绿化后, 对改善微气候环境效果较好, 可明显起到降温增湿的作用; 灌木+地被绿化方案对研究区风速增加效果较明显, 但会使整体温度增高; 乔木+地被绿化方案增加了低处风速, 温度改变并不明显; 说明乔木对研究区域温度降低效果较灌木地被更明显, 对风速也有较强的减缓作用。

城市微气候研究对城市规划设计和更新有着重要意义。本研究采用 ENVI-met 选取广州典型老旧小区作为研究对象进行微气候的数值模拟, 能反映实测与场景案例微气候特征的差异, 预判不同绿化方案带来的微气候效应变化。南方地区老旧小区往往建筑较密集, 绿化植被生长时间较长, 乔灌木枝繁叶茂, 植株欠修整, 导致小区内部通风较差, 容易造成潮湿、闷热、蚊虫滋生等问题。从微气候模拟研究中发现, 清除杂乱的灌木丛而保留乔木和地被层, 既可改善低处通风, 又不影响绿化对降低温度的改善; 对多年生长的乔木进行适当修剪, 既可以改善通风也可增加低层住户的采光, 但修剪不能过度, 否则会使整体温度上升^[17]; 老旧小区一般屋顶承

载力较差,故采用轻型拓展式屋顶绿化,可在无法扩增地面绿地的情况下增加绿化率,进而起到降温、滞蓄的效果^[18]。通过本次研究,在小区更新规划设计中运用数值模拟得到的直观数据,可对不同绿化方案的比较提供一定的指导和参考,以便更好地进行空间的营造与绿化改善。

参考文献:

[1] 秦文翠, 胡聃, 李元征. 基于 ENVI-met 的北京典型住宅区微气候数值模拟分析 [J]. 气象与环境学报, 2015, 31(3): 56-62.

[2] SU X, CAI H, CHEN Z, et al. Influence of the ground greening configuration on the outdoor thermal environment in residential areas under different underground space overburden thicknesses[J]. *Sustainability*, 2017, 9(9): 1656-1679.

[3] 陈卓伦, 赵立华, 孟庆林. 广州典型住宅小区微气候实测与分析 [J]. *建筑学报*, 2008, 55(11): 24-27.

[4] 林满, 王宝民, 刘辉志. 广州典型小区微气候特征观测与数值模拟研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(1): 124-129.

[5] 章莉, 詹庆明, 蓝玉良. 武汉市居住用地绿地降温效应研究 [J]. *中国园林*, 2018, 34(4): 47-53.

[6] ALI-TOUDERT F, MAYER H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate[J]. *Build Environ*, 2006, 41(2): 94-108.

[7] MIDDEL A, HÄB K, BRAZEL A J, et al. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix local climate zones[J]. *Landscape Urban Plan*, 2014, 122: 16-28.

[8] 郑子豪, 陈颖彪, 千庆兰. 基于三维模型的城市局地微气候模拟 [J]. 地球信息科学学报, 2016, 21(9): 1199-1208.

[9] 方小山. 亚热带湿热地区郊野公园气候适应性规划设计策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[10] Department of Atmospheric Science, University of Wyoming. 59280 Qing Yuan Observations at 00Z 1 Apr 2018[DB/OL]. (2018-04-01)[2018-10-01]. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

[11] 广东省建设厅. 《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》广东省实施细则: DBJ15-50—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 47.

[12] 詹慧娟, 解潍嘉, 孙浩, 等. 应用 ENVI-met 模型模拟三维植被场景温度分布 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(4): 64-74.

[13] 杨小山. 室外微气候对建筑空调能耗影响的模拟方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[14] Z LCH T, MADERSPACHER J, WAMSLER C, et al. Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale[J]. *Urban For Urban Gree*, 2016, 20: 305-316.

[15] CHOW W T L, POPE R L, MARTIN C A, et al. Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: Horizontal and vertical impacts[J]. *Theor Appl Climatol*, 2011, 103(1): 197-211.

[16] PASTORE L, CORRAO R, HEISELBERG P K. The effects of vegetation on indoor thermal comfort: The application of a multi-scale simulation methodology on a residential neighborhood renovation case study[J]. *Enegr Buildings*, 2017, 146: 1-11.

[17] 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 Urban Plan*, 2016, 148: 37-50.

[18] MORAKINYO T E, DAHANAYAKE K W D K, NG E, et al. Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study[J]. *Energ Buildings*, 2017, 145: 226-237.

【责任编辑 霍 欢】