

# 多模式组合的居住区绿地对热环境影响的模拟研究

冯晓刚<sup>1</sup>, 杨永全<sup>2</sup>, 李 萌<sup>1</sup>, 周在辉<sup>1</sup>, 李凤霞<sup>1</sup>, 王 元<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 山东科技大学 规划设计研究院, 山东 济南 250101)

**摘要:** 居住区作为城镇居民三生活活动最主要的空间单元, 其热环境质量直接决定了小区内居民的舒适感和幸福度。本文在归纳总结城镇居住区绿地组合模式的基础上, 基于非静力流体力学技术和热力学原理, 耦合有限差分及交替方向隐式算法对小区范围内不同模式结构组合的绿地生态系统进行热效应模拟研究, 通过对比分析不同模式组合的绿地系统热环境效应特征, 探寻多模式组合下的居住区绿地与局地热环境间的交互关系。结果表明: 在相同的模拟条件下, “中心+宅间”绿地组合模式的热环境效应最好, “组团+宅间”模式次之, “宅间”模式热环境效应最差; 模拟区域内三种绿地组合模式的最高最低温度差分别为 2.36、2.31 和 2.34 °C, 且温度自西南向东北方呈现圈层式分布特征; 多绿植类型的组合模式对局地热环境的改善效果依次为: 草+灌+乔>草+乔>草+灌>草, 灌木对绿地热环境舒适度的改善效果不显著。该研究能够为居住区绿地规划设计与实践提供科学参考。

**关键词:** 居住区; 绿地; 热环境; 模拟; 多模式

中图分类号: TU 985.12

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0113-07

## Study on the impact of multi-mode combined residential green space on thermal environment

FENG Xiaogang<sup>1</sup>, YANG Yongquan<sup>2</sup>, LI Meng<sup>1</sup>, ZHOU Zaihui<sup>1</sup>, LI Fengxia<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>1</sup>

(1. College of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shandong Metallurgical Design Institute, Jinan 250101, China)

**Abstract:** As the most important spatial unit of urban resident activities, the thermal environment quality of residential area determines the thermal comfort and happiness of residents. On the basis of summarizing the green space combination models in urban residential areas, this paper adopts non static fluid dynamics technology and thermodynamic principles, coupled with finite difference and alternating direction implicit algorithms, to conduct thermal effect simulation research on green space ecosystems with different pattern structure combinations within the community scope. By comparing and analyzing the thermal environment effect characteristics of green space system with different combination modes, the interaction between green space and local thermal environment in residential areas under multi-mode combination is explored. The results show that under the same simulation conditions, the “center + residence” green space mode has the best thermal environment effect, the “cluster + residence” mode takes the second place, and the “residence” mode has the worst thermal environment effect. The maximum and minimum temperature differences of three green space combination modes in the simulation area are 2.36, 2.31 and 2.34°C, respectively, and the temperature presents a circular distribution from southwest to northeast. The improvement effect of the combination mode of different green plant types on the local geothermal environment is as follow, grass + shrub + tree > grass + tree > grass + shrub > grass. This improvement effect of shrubs on the thermal environment comfort of green space is not significant. The study can provide scientific reference for the planning, design and practice of green space in residential areas.

**Key words:** residential areas; greenland; thermal environment; simulation; multi mode

收稿日期: 2022-05-11

修回日期: 2023-02-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51608419); 陕西省自然科学基金项目(2018JM5073); 陕西省教育厅专项基金项目(18JK0453); 西安建筑科技大学自然科学专项基金项目(ZR19001)

第一作者: 冯晓刚(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为城市热环境、智慧城市及历史文化名城和传统村落全要素数字化保护。E-mail: fendao\_ren@163.com

居住区绿地作为城市绿地系统的重要组成,具有缓解城市热岛效应、改善城市生态环境等多重功效<sup>[1]</sup>。不仅为小区生物多样性提供基础环境,更是改善小区热生态环境,有效提升居住区人居环境舒适度和幸福感的生态屏障<sup>[2]</sup>。因此,如何高效配置与空间布局小区内绿化系统,已经成为当前城市生态系统服务的热点问题,对区域乃至城市构建和谐人居环境至关重要。

绿地系统与生态环境的关系研究始于上世纪中后期,主要以实地测量、软件模拟与模型构建等方法为主<sup>[3-4]</sup>。研究者主要利用计算机模拟技术(CFD)对室外不同尺度气候环境展开模拟分析,研究尺度包括城市、街区和建筑三种<sup>[5]</sup>。伴随计算机模拟技术的不断发展,CTTC模型(Cluster Thermal Time Constant)应运而生,该模型能够从建筑自身的温度能效来排除外部干扰,从而模拟和计算环境的空气温度。结合流体力学和热力学原理,ENVI-met城市微气候模拟软件诞生,它已经广泛应用于城市表面-植被-空间交互的三维动态微气候模拟研究<sup>[6]</sup>。20世纪90年代,Bruse等<sup>[7]</sup>运用ENVI-met软件模拟了城市表层在受到植物与大气的相互作用后的环境特征,分析了小型场地的空气温度环境特征。Wong等<sup>[8]</sup>结合实测数据,通过软件模拟不同条件下不同的绿化对微气候环境的作用结果,发现绿化率的改变对场地温度变化可达1℃。Cynthia等<sup>[9]</sup>以实测数据为辅助条件设定ENVI-met模型模拟条件,发现每增加5%的绿地,空气温度可降低1℃。M. F. Shahidan等<sup>[10]</sup>发现在热带湿热气候条件下,平均温度可降低3.5和2.7℃;夏季,高密度的中心地区每增加33%的树木,可降低1℃的空气温度。Soudoudi等<sup>[11]</sup>模拟了不同朝向的带状绿地与风向耦合关系对降温的影响,发现当二者平行时可有效改善通风并促使降温幅度增大。Zhao等<sup>[12]</sup>模拟了居民区树木的种植间距对微气候的影响,发现等间距种植的乔木配置遮荫效果最佳,可避免树冠重叠而阻塞风道。帅林茹等<sup>[13]</sup>探索了不同植被种植方式对微环境热舒适度的改善效果,发现植被对热舒适度的影响在一天内呈现先上升后下降的钟型曲线,11:00、16:00改善效果最明显;乔木对热舒适度的改善效果强于草坪与灌木丛形成的简单绿地;乔木密集排布,乔灌草种植方式对热舒适度的改善效果强于其它种植方式。同时,植物配置模式研究发现“乔木+灌木+草地”的绿化模式降温效果最佳。因此,ENVI-met无论在中观尺度还是微观尺度的气候模拟研究中均运用广泛<sup>[14-15]</sup>。然而,针对小区尺度的不同绿地模式对局地热环境的定量影响研究不足,现代小区绿

地组织模式、植被配置等对局地热环境影响的幅度、特征及趋势有待于进一步求证。

因此,本文以ENVI-met模拟模型为基础,展开绿地组织模式和植物搭配对居住区夏季微气候的定量影响研究。首先对西安市现有居住区的绿地组合模式进行测量分析、归纳总结,根据分类结果结合不同植物搭配设置模拟情景,建立模拟模型,设定初始条件及模拟参数,以验证所有模拟条件下的夏季居住区绿地微气候热环境特征,并深入剖析植物类型配置对居住区热环境的影响差异,以期对西安市居住区绿地系统的热生态规划与设计提供科学参考。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究区概况

西安市(33°39' N~34°45' N, 107°40' E~109°49' E)地处陕西省中南部,关中盆地中部,南依秦岭,北接渭河,东临白鹿原,西与咸阳接壤(图1),辖11区2县,总面积9 983 km<sup>2</sup>,常住人口1 295万人。研究区属暖温带半湿润季风气候区,平均海拔424 m,1月最低平均气温0.4℃,7月最高平均气温26.6℃,年平均气温13.3℃,年平均降水量613.7 mm,年平均湿度69.6%<sup>[16]</sup>。西安已经成为全国新十大火炉城市之一<sup>[17]</sup>,2021年最高气温达43.4℃。因此,西安市人居环境形势日趋严峻,定量剖析热环境及其缓解要素间的关系,能够为西安市人居环境改善提供科学决策与参考依据。

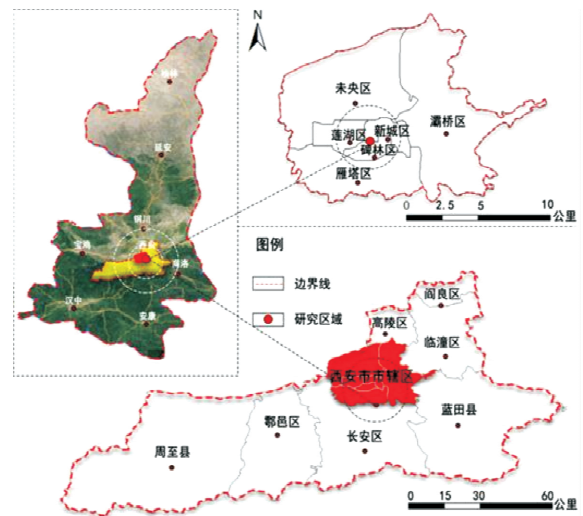


图1 研究样区及采样区位示意图

Fig. 1 Study area and sampling location

### 1.2 数据来源

本次实验数据主要包括2019年6月西安市高分辨率Quickbird影像数据(数据来源google地图)、外业现场测量及调查数据三种。分别在碑林

区、新城区、莲湖区、雁塔区、未央区和灞桥区选择典型住宅 24 个, 共计测量 474 个绿地斑块, 现场测量数据主要包括斑块周长、面积、空间位置、分布及其与周边相邻建筑物之间的相对位置关系, 采样点位地表温度和大气温度数据; 外业调查数据主要包括绿地斑块类型、植被类型、搭配模式、分布模式及绿量等。

## 2 模拟模型

### 2.1 模拟原理

大气变化受到诸多因素的影响, 其中风量、温度、湿度和湍流四个参数是大气模型模拟的核心因子<sup>[18]</sup>。以流体力学和热力学为指导理论, 使用有限差分法在交错网格系统上求解模拟模型中的微分方程, 并使用交替方向隐式(ADI)方法和上游对流方案, 对三维对流扩散方程进行解耦<sup>[19]</sup>。

#### (1) 平均气流模型

先将质量守恒的风场  $U_i^{(t+\Delta t)}$  的预后方程分为辅助流场( $u^{aux}$ )和压力场( $p$ ):

$$\frac{\partial u_i^{t+\Delta t}}{\partial t} = \frac{\partial u_i^{aux}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (1)$$

然后从方程中删除压力变量, 从而得出一组用于辅助流场的三个预测方程式。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^{aux}}{\partial t} + u_i \frac{\partial u^{aux}}{\partial x_i} &= K_m \left( \frac{\partial^2 u^{aux}}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u \\ \frac{\partial v^{aux}}{\partial t} + u_i \frac{\partial v^{aux}}{\partial x_i} &= K_m \left( \frac{\partial^2 v^{aux}}{\partial x_i^2} \right) + f(u - u_g) - S_v \\ \frac{\partial w^{aux}}{\partial t} + u_i \frac{\partial w^{aux}}{\partial x_i} &= K_m \left( \frac{\partial^2 w^{aux}}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w \end{aligned} \quad (2)$$

上述方程中的流场包含正确的涡度, 但不是

质量守恒的, 这意味着它不能满足过滤条件方程。此时可以通过求解泊松方程来获得匹配的压力场为

$$\nabla^2 p = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla u_i^{aux} \quad (3)$$

最后, 使用迭代同时松弛(SOR)方法, 可以从以下公式计算出正确且近似质量守恒的流场为

$$u_i^{t+\Delta t} = u_i^{aux} - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (4)$$

式中:  $f(=104\text{sec}^{-1})$  是科里奥利参数,  $p$  是局部压力扰动,  $\rho$  是空气密度,  $\theta$  是  $z$  水平的势能温度;  $K_m$  是湍流交换系数; 参考温度  $\theta_{ref}$  代表了较大规模的气象条件, 并被计算为高度为  $z$  的所有网格单元的平均温度; 参数  $S_u$ ,  $S_v$  和  $S_w$  表示由于植被要素上产生的拖曳力而导致的风速损失。

#### (2) 温湿度模型

空气温度  $\theta$  和比湿度  $q$  的分布由内部源/汇的组合对流扩散方程给出:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = K_h \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} \right) + \frac{1}{c_p \rho} \frac{\partial R_{n,tw}}{\partial z} + Q_h \quad (5)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = K_q \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} \right) + Q_q \quad (6)$$

式中:  $Q_h$  和  $Q_q$  用于将植物的热和蒸汽交换与大气模型关联;  $\partial R_{n,tw} / \partial z$  是考虑到辐射通量的冷却和加热作用的长波辐射的垂直发散度<sup>[20]</sup>。

### 2.2 模拟情景

通过对高分辨率影像解译结果进行实地验证等方式, 结合实际调查与测量数据, 在归纳、总结与模型简化的基础上, 将西安市居住区绿地类型归纳为“中心+宅间”, “组团+宅间”和“宅间”三种模式(图 2)。

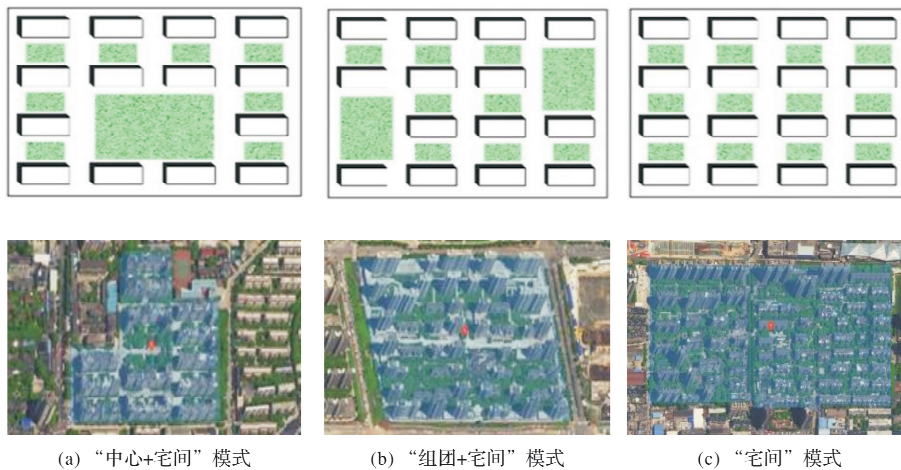


图 2 西安市居住区绿地组合模式

Fig. 2 The model of green space pattern of residents in Xi'an

结合西安市绿地斑块采样结果, 在综合分析基础上, 将绿地植物配置情形设置为草坪(25 cm), 草坪和灌木(或 5 m 高小乔木), 草坪、灌木

(或 5 m 高小乔木)和乔木(15 m)相结合三种形式; 每种绿植配置模式中, 又分别根据“中心+宅间”、“组团+宅间”和“宅间”划分共计得到 9 种绿植模拟



情景。

### 2.3 模拟参数设置

模拟参数设置选择2019年7月23日当天气象参数为原始输入数据。模拟时长为8:00—18:00,共计10 h。参考当日气象数据,模型的初始温度设置为14℃,风向采用夏季当日主导风向西南风225°(顺时针),起始风速为1.8 m/s,相对湿度设置为50%,粗糙长度采用系统默认值0.1,模拟的温度范围设置为16~28℃。为了更好地控制模拟结果,同时需要将温度、湿度的极值及出现时间设置进去,模型区域外的下垫面设置为土壤,以弱化模拟误差。同时,将与当日实测温度数据进行分析比较,从而验证模型精度,基于模拟结果展开不同绿植组合模式的热环境效应分析。

### 2.4 模拟结果验证

为了验证研究结论的可靠性,采取现场测量

的方式,分三个小组分别以“中心+宅间”、“组团+宅间”和“宅间”三种模式选择华陆经九路小区、八府庄小区和雁鸣小区为样区(图3),以1.0 h为时间间隔进行大气温度数据的采集,采集时间8:00—18:00。经对比实际测量1.5 m处的大气温度,72个采样点平均气温差为0.84℃,方差为1.2℃。利用线性统计分析功能对实测数据和模拟数据展开相关性分析,“中心+宅间”模式、“组团+宅间”模式和“宅间”模式的绿地系统中,实际测量温度和模拟结果的相关系数分别为0.944、0.908和0.884,由此表明基于ENVI-met模拟结果与实际测量结果具有很强的相关性,因此,模拟结果可用于绿地热环境模拟与趋势分析研究。进一步分析发现实测温度普遍高于模拟温度,原因在于模拟温度边界条件确定,而实测温度存在小区内外热能的对流与交换过程。

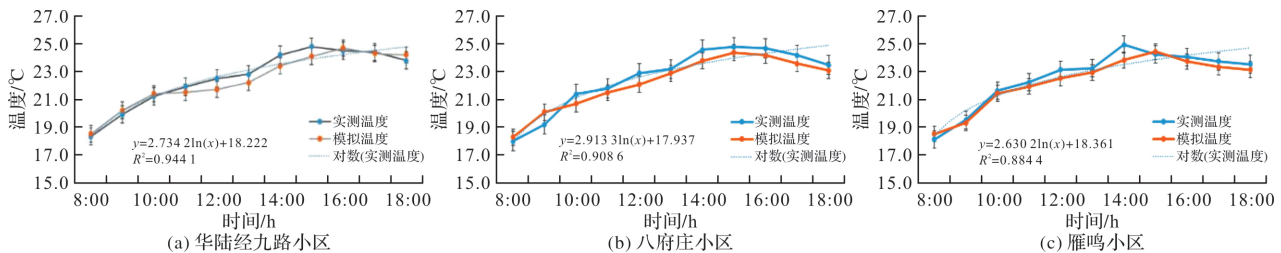


图3 实测温度与模拟结果对比分析

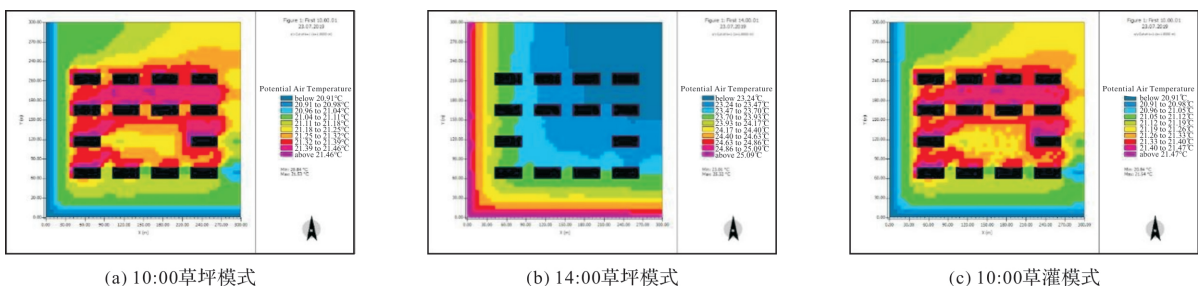
Fig. 3 Comparison of measured temperature and numerical simulation results

## 3 结果与分析

### 3.1 “中心+宅间”模式气温场模拟结果

运用ENVI-met软件模拟了8:00—18:00大气温度变化情况。以上午10:00和下午14:00大气温度为例(图4),图4(a)表明由于受主导风向西南风的影响,宅间绿地部分温度略低;而居住区中心草坪整体温度较之宅间绿地相对较低,表明相对于裸地或混凝土地面,植被对于空气温度的改善效果较为显著,温度差0.69℃。图4(b)表明建筑物西侧与南侧的温度较高,其它区域温度较低;与上午温度模拟结果相比较,下午低温区域增加明显,但整体气温升高显著,整体上升约2~

4℃。图4(c)表明草灌混合模式较单纯的草坪模式低温区增加,宅间绿地大气温度无明显变化;图4(d)表明下午14:00草灌混合模式温度较图4(b)模式无明显变化。图4(e)表明草灌乔组合模式上午10:00宅间绿地变化不明显,而位于模拟区域中间位置的绿地温度变化较为明显,低温区显著增加,温度差为0.68℃;下午14:00整体温度升高,同时低温区域增加,温度差最大为2.36℃。对比分析上述三种模式发现,随着模拟区域整体温度的升高,温度变化自西南向东北方向呈现圈层式分布走向,分析原因可能是与西安地区的夏季主导风向相关。





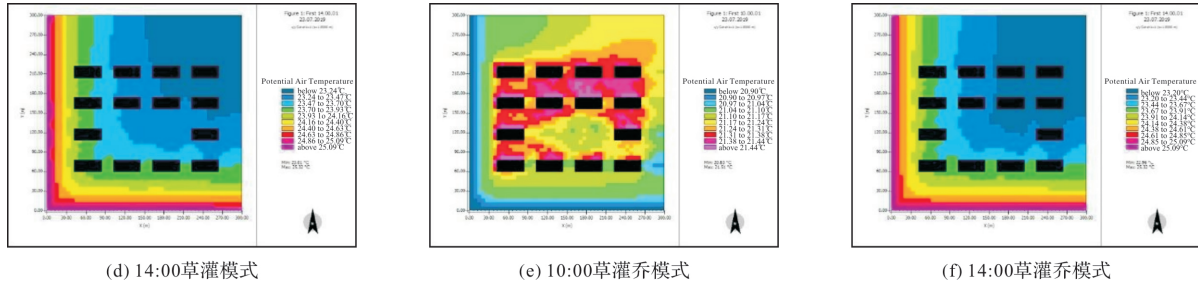


图 4 “中心+宅间”组合模式下的大气温度模拟结果

Fig. 4 The simulation results of air temperature under central and between dwelling green space

### 3.2 “组团+宅间”模式气温场模拟结果

图 5(a)可知: 上午 10:00 该绿地组合模式对应的绿地组团气温较低, 绿地面积大小影响大气温度, 面积大小与降温效果呈正相关关系; 同时发现, 两块组团绿地的大气温度存在空间分异, 西南组团气温略低于东北组团, 两者温度差 0.72 °C。下午 14:00, 随着太阳的升高和太阳辐射的增强,

模拟区域整体温度升高显著, 温度差最大为 2.31 °C。组团大气温度差异表现为西南组团高于东北组团(图 5(b)); 图 5(c)表明上午 10:00, 宅间绿地大气温度变化不明显, 组团绿地大气温度小幅上升, 西南组团气温增加, 东北组团气温降低(图 5(e))。然而, 下午 14:00, 两种模式的大气温度分布与变化均不显著(图 5(d)、(f))。

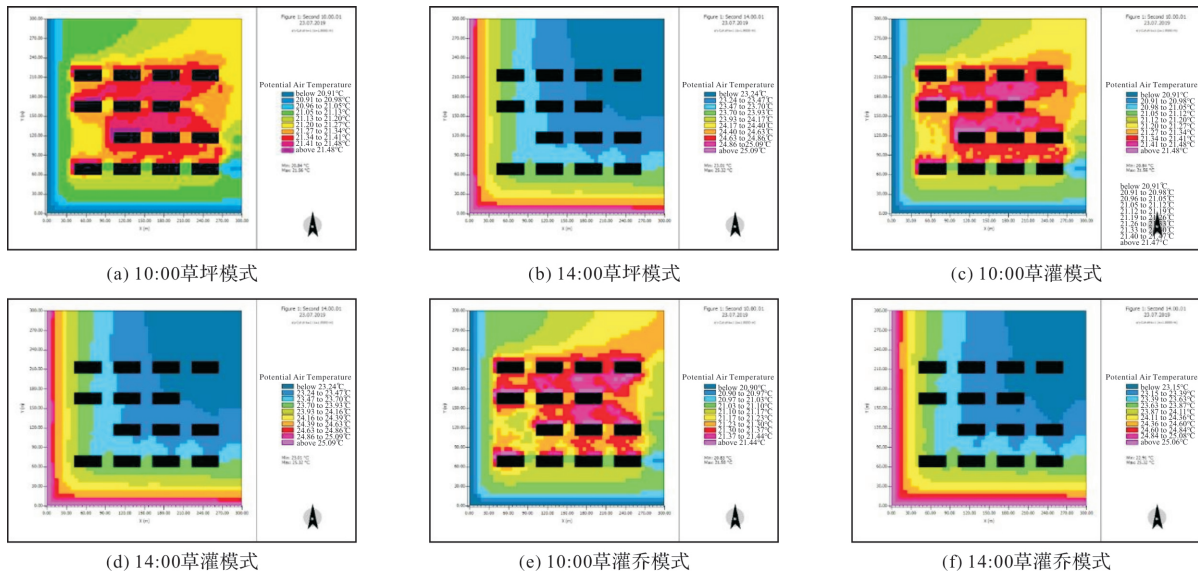


图 5 组团+宅间植被模式下的大气温度模拟结果

Fig. 5 The temperature simulation results of cluster and between dwellings green space

### 3.3 “宅间”模式气温场模拟结果

图 6 为“宅间”绿地分别在草坪, 草灌及草灌乔三种模式的上午及下午的气温场模拟结果。图 6(a)表明模拟区除了最南和最西侧一排建筑物之间有相对低温的区域外, 其他大部分区域的大气温度相对较高; 建筑山墙之间的空间由于处于建筑阴影之下, 大气温度相对较低; 图 6(b)表明, 下午随着太阳的升高和整体大气温度的上升, 整个模拟区域的空气温度上升显著, 温度差最大为 2.31 °C。图 6(c)表明, 草灌模拟区域温度分布与草坪模式基本相似, 模拟区最南与最西侧低温区较纯草模式增加, 但增加不显著, 且随时间变化;

下午 14:00, 前两种模式的大气温度分布变化不明显(图 6(d)); 图 6(e)表明草灌乔模式下的温度分布变化显著, 上午宅间绿地的大气温度变化明显, 模拟区最南和最西一排建筑之间的大气温度持续降低, 低温区面积增加, 同时宅间绿地区域的大气温度变化为小幅度下降, 温度差 0.7 °C; 图 6(f)表明, 下午 14:00, 大气整体温度升高, 但相对低温区域仍然增加, 温度差最大为 2.34 °C; 对比三种模式下的下午空气温度分布图发现, 随着模拟区域整体温度的升高, 空气温度变化呈现出自西南向东北圈层式分布。

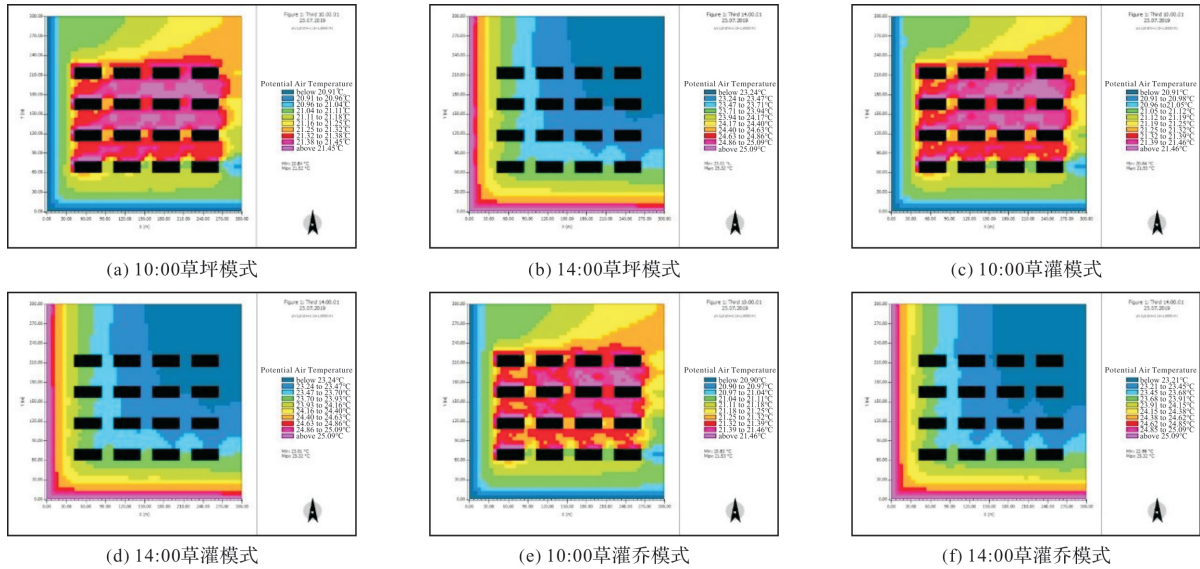


图6 宅间植被模式下的大气温度模拟结果

Fig. 6 The temperature simulation results of between dwellings green space

### 3.4 连续模拟结果

通过对三种不同居住区绿地组合模式的周期性气温模拟结果,分别绘制得到了10 h连续的不同绿地组合模式的气温变化曲线(图7).三种不同绿地布局形态的温度模拟结果表明,上午9:00—11:00,该时间段温度变化差异较大,其中“中心+宅间”模式温度差异最大,“宅间”模式次之,“组团+宅间”模式变化最小,变化量分别为:0.7、0.62和0.5℃.“草坪+灌木”模式显示“宅

间”绿地模式气温变化最大,“组团+宅间”和“中心+宅间”绿地模式结果基本相同,变化量分别为0.8、0.6和0.6℃.“草坪+灌木+乔木”模拟结果显示,“草坪”绿地模式气温变化最大为0.6℃,其余两种类型气温变化不大.三种方案最高温度均出现在下午15:00—16:00之间,高温时段有一个明显的持续过程,该过程持续约1.5 h;同时,在17:00前后温度呈现极值,且气温分布曲线相似.

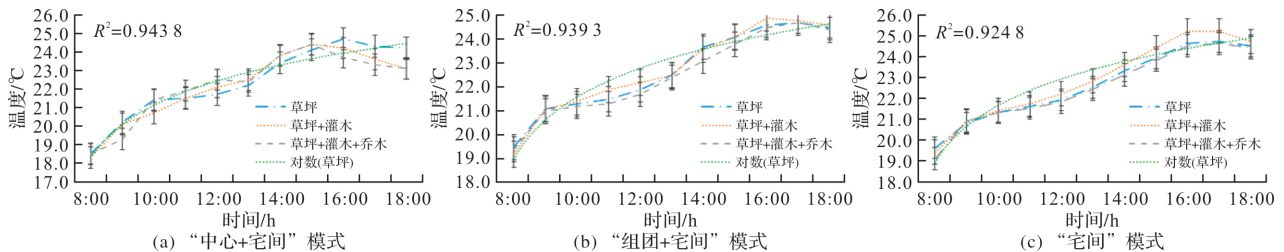


图7 不同绿地组合模式下的周期性气温模拟曲线

Fig. 7 The temperature simulation based on the multi-green space

### 3.5 热环境变化趋势分析

#### (1) 不同绿地配置模式的热环境对比分析

综合分析不同绿地组合模式发现:“中心+宅间”模式的低温区域明显多于其他两种组合方式,表明该模式下的居住区绿地热环境效应较好;从相同绿地组合模式的不同植物配置模拟结果来看,随着垂直空间植物丰富度的增加,三种模式下的低温区域面积均呈现增加趋势,尤其是“中心+宅间”模式和“组团+宅间”模式变化尤为显著.从植物的配置来看,相比增加灌木的配置模式,增加乔木后的居住区绿地热环境效应改善状况更为显著,且这种情况的变化规律与绿地斑块面积大小关系密切,绿地斑块越大,植物种类越丰富,绿地的热环境效应越好<sup>[21]</sup>.反之,如“宅间”模式的

变化一样,虽然丰富植物后的绿地热环境效应有所改善,但效果不显著.

#### (2) 不同绿地的热环境时空变化分析

研究发现伴随太阳高度角和辐射温度的升高,不同模式的绿地温度普遍上升2~4℃,且不同绿地组合模式的大气温度变化区域基本相同,低温区均位于模拟区域的东北方向,即该区域主导风向的下风方向.具体差异表现为“中心+宅间”模式的热环境变化更为显著,尤其是“草坪+灌木+乔木”的配置,低温区增加显著,其他两种绿地组合模式亦呈现相同情况.全天正午时刻温度最高,“草坪+灌木”的植物配置模式对绿地热环境的改善效果不明显<sup>[22]</sup>.其次,绿地的组合模式与植物的空间配置密切相关,“中心+宅间”和“组团+宅

间”两种模式下的绿地热环境效应更好;从植物配置来看,草坪+灌木+乔木的植物组合更容易获得较好的绿地热环境效应,且当热环境逐步恶化时,增加灌木对于绿地改善热环境效果不显著。

## 4 结论

(1)西安市居住区绿地空间组合模式可归纳为“中心+宅间”、“组团+宅间”和“宅间”三种模式;

(2)不同绿地组合模式的居住区热环境存在空间差异,从改善夏季居住区热环境视角出发,“中心+宅间”和“组团+宅间”模式热环境效应较好,而“宅间”模式热环境效应一般。三种绿地组合模式的最高最低温度差分别为 2.36、2.31 和 2.34℃,且温度自西南向东北方呈现圈层式分布特征;

(3)在绿地植物配置方面,复合式植物配置结构优于单一的植物配置结构,植物种类的空间复杂程度对绿地热环境效应的改善效果依次为草坪+灌木+乔木>草坪+灌木>草坪,且灌木对绿地热环境的改善效果不显著。

不足在于只针对西安市居住区热环境状况进行了模拟研究,其结果只能作为与其类似城市的参考。未进一步考虑风力等因素对热环境模拟结果的影响,且不同季节的热环境也应该存在时空差异,作者会在后续研究中针对上述问题继续完善和深入,以使研究结果更具普适性和全面性。

## 参考文献 References

- [1] 陈华疆. 城市园林绿地微气候效应及其对人体舒适度影响研究[J]. 城市建筑, 2021, 18(14): 170-171.  
CHEN Huajiang. Study on the microclimate effect of urban green space and its influence on human comfort [J]. Urbanism and Architecture, 2021, 18(14): 170-171.
- [2] 孟丹, 刘蕊蕊, 刘聪聪. 北京市植物物候对热岛效应的响应[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 844-854.  
MENG Dan, LIU Xinrui, ZHANG Congcong. Responses of plant phenology to urban heat island effects in Beijing [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 844-854.
- [3] 崔凤娇, 邵锋, 齐锋, 等. 植被对城市热岛效应影响的研究进展[J]. 浙江农业大学学报, 2020, 37(1): 171-181.  
CUI Fengjiao, SHAO Feng, QI Feng, et al. Research advances in the influence of vegetation on urban heat island effect[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(1): 171-181.
- [4] 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(3): 61-66.  
LI Yingnan, HAN Yiwen. Research progress in simu-

- lating microclimate in urban green spaces based on ENVI-met model [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2021, 19(3): 61-66.
- [5] 林冰钰, 杨心怡, 张颖诗, 等. 广州市核心区城市绿地降温效应研究[J]. 生态科学, 2021, 40(2): 26-34.  
LIN Bingyu, YANG Xinyi, ZHANG Yingshi, et al. Cooling effect of urban green space of Guangzhou core area[J]. Ecological Science, 2021, 40(2): 26-34.
- [6] 王晓俊, 卫笑, 邹昊. 城市绿地空间格局对热岛效应的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1904-1911.  
WANG Xiaojun, WEI Xiao, ZOU Hao. Research progress about the impact of urban green space spatial pattern on urban heat island[J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, 29(9): 1904-1911.
- [7] BRUSE M, FLEER H. Simulating surface pant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical mode[J]. Environmental Modelling & Software, 1998, 13(3): 373-384.
- [8] WONG N H, JUSUF S K. GIS-based greenery evaluation on campus master plan[J]. Landscape and urban planning, 2008, 84(2): 166-182.
- [9] SKELHORN C. A fine scale assessment of urban greenspace impacts on microclimate and building energy in Manchester[J], 2014, University of Manchester.
- [10] SHAHIDAN M F, JONES P J, GWILLIAM J, et al. An evaluation of outdoor and building environment cooling achieved through combination modification of trees with ground materials[J]. Build and Environment, 58(2012): 245-257.
- [11] SODOUDI S, ZHANG H W, CHI X L, et al. The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 34: 85-96.
- [12] ZHAO Q S, SAILOR D J, WENTZ E A. Impact of tree locations and arrangements on outdoor microclimates and human thermal comfort in an urban residential environment[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 32: 81-91.
- [13] 帅林茹, 冯莉, 阳少奇. 植被种植方式对城市微环境热舒适度影响的数值模拟研究[J]. 生态学杂志, 2022, 41(8): 1611-1618.  
SHUAI Linru, FENG Li, YANG Shaoqi. Numerical simulation on the effect of planting mode on thermal comfort of urban microenvironment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(8): 1611-1618.
- [14] XING Y, BRIMBLECOMBE P, WANG S F, et al. Tree distribution, morphology and modelled air pollution in urban parks of Hong Kong[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 248: 109304.

(下转第 158 页)