

# 城市住区热环境效果模拟与生态节能性研究

姜允芳<sup>1</sup>,李悦<sup>1</sup>,石铁矛<sup>2</sup>,韩雪梅<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学城市与区域科学学院,上海 200241;2. 沈阳建筑大学生态城镇化  
与绿色建筑研究中心,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究城市住区热环境各影响因素的作用和不同环境要素组合对室外热环境的影响,探索有效的空间要素组合状况以达到生态节能的效果. 方法 根据住区建筑形态构成的典型性选取上海市3个行列式布局住区为研究对象,运用 ENVI-met 数值模拟分析方法,分析夏至日室外热环境的影响要素和作用效果. 研究住区不同空间要素组合与热环境的对应关系,从住区整体三维空间构成、建筑形态和绿化形态3个方面比较研究不同要素组合模式的生态节能性效果. 结果 建筑形态相比绿化而言对住区热环境影响更大,建筑三维形态可以解释空气温度差异的25%,高大乔木可以解释温度差异的13%,其蒸发蒸腾作用和遮挡作用带来的降温效果远优于草坪的降温效果. 行列式布局街区建筑高度、形态、绿化的面积、形态等要素组合影响了住区空间气温. 结论 绿地组合模式与住宅组合空间模式相比具有明显的降温效应,可有效改善住区热环境,提高节能效应. 优化城市住区生态节能性空间结构,有效提升空间环境的节能效用.

**关键词** 城市住区;生态节能;热环境;ENVI-met 模拟

中图分类号 TU119<sup>+</sup>4 文献标志码 A

## The Simulation of Thermal Environment and Ecological Energy Conservation in Urban Residential Areas

JIANG Yunfang<sup>1</sup>, LI Yue<sup>1</sup>, SHI Tiemao<sup>2</sup>, HAN Xuemei<sup>1</sup>

(1. School of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai, China, 200241; 2. Research Center of Ecological Urbanization and Green Building, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** To study the effect of various influencing factors of urban residential thermal environment and the influence of different combinations of spatial environmental factors on outdoor thermal environment, the effective combination of spatial factors were explored to achieve the effect of ecological energy saving. According to housing layout, three determinant urban residential areas in Shanghai are chosen as the modeling objects. ENVI-met numerical simulation analysis method is used to analyze the influence factors and effect of outdoor thermal environment in the Summer Sol-

收稿日期:2018-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51578344, 51878279, 51878418)

作者简介:姜允芳(1972—),女,副教授,主要从事生态城市规划与人居环境方面研究.

stice day. The corresponding relationship between different spatial elements combination modes and thermal environment in residential area is studied. The three-dimensional shape of the building could explain 25 percentage of the air temperature difference. The tall tree could explain 13 percentage of the temperature difference. The effect of evapotranspiration and shelter is much better than that of lawn. The combination of factors such as building height, spatial form, green space area and shape in arrayed layout blocks affect the residential spatial temperatures. Compared with the residential space pattern, the green space pattern has obvious cooling effect, which can effectively improve the residential thermal environment and energy-saving effect. Optimizing spatial structure of urban residential areas for ecological energy-saving can effectively improve the energy-saving effect of space environment.

**Key words:** urban residential area; ecological energy saving; outdoor thermal environment; ENVI-met simulation

随着城市空调制冷系统废气排放增多,高温热浪天气增加,城市热环境日益恶化.改善城市住区的外部热环境成为节能减排研究的重要内容.我国从《绿色中国生态住宅技术评估手册》、《绿色奥运建筑评估体系》、《绿色建筑评价标准》到2014年10月《绿色住区标准》正式出台,标志着我国绿色建筑标准实现了从单体建筑到住区的突破.《绿色住区标准》明确提出绿色住区应保证环境舒适,降低热岛效应和绿色种植屋面等.城市建筑群的空间形态、建筑体型、建筑界面性质、水体和绿化等空间构成要素对城市小气候的形成起到明显的作用.对于人口高度集聚的城市来说,城市空间微气候调节直接关联到住区的热舒适性和节能状况.居住住区微气候结合地方城市空间特质的发展模式研究是提高住区热舒适性和节能降耗领域应探讨的重要议题.建筑朝向、街道走向和景观绿化可以有效改善城市的热环境<sup>[1-2]</sup>.住区片状绿化、水体和高反照率材料对夏季温度调节的功能非常重要<sup>[3]</sup>.城市空间高度构成和集聚发展模式组合对住区日间温度影响<sup>[4-6]</sup>.天空开阔度(SVF)也是重要的缓解城市热岛效应的重要指标<sup>[7-8]</sup>.不同临街空间模式(建筑高度、绿地形态与面积、断面构成)与微气候修具有重要关联<sup>[9]</sup>.建筑布局形式(行列式、围合式、点群式)的不同对住区微气候修的影响也会产生热岛效应<sup>[10]</sup>.可见,建筑高度、走向、建筑朝向、空间构成的建筑群构成模

式以及绿化组合模式均作用于住区的热环境特征,综合住区空间构成的这些要素的热环境效应更能够真实反映住区复杂的建筑形态和空间构成.

上海位于亚热带季风气候分区,为了满足居住环境具有良好的日照和通风,其典型的住区形态以行列式空间构成居多.笔者选取上海市3个典型行列式空间布局住区,应用三维微气候数值模拟方法研究夏至日住区空间构成要素,包括建筑群组成形态、建筑高度、相对湿度、绿化等,在住区热环境方面的影响作用,科学分析夏季城市住区生态节能性空间要素的优化结构关系,有效地提升空间环境的节能效用.

## 1 研究区域选择

研究区域选择上海市位于闵行区的上虹新村(S)、万源新城(W)和位于静安区的新梅共和城(M)3个规模为400 m×400 m的住区作为研究对象(见图1).研究区域由城市道路或自然边界围合的城市区域,包括围合住区的道路以及其内部的建筑、绿地、水体等.住区的空间布局均为行列式,内部主要道路均为南北走向和东西走向的十字交叉格局,3个住区均以住宅建筑为主,兼有少量商业建筑和公共建筑.上虹新村由6层住宅建筑组成,平均高度18 m;万源新城北侧布局12栋13层住宅,南侧布局20栋6层住宅,

北侧平均高度为 39 m,南侧平均高度为 18 m,综合平均高度为 25.88 m;新梅共和城多为 14 层以上住宅,14 层以上占所在住区住宅数量的 70%,平均高度为 41.06 m. 3 个

住区除建筑高度指标存在较大差异,其他参数指标均处于相似状况,其中绿地进一步细分为乔灌木覆盖区域和草地覆盖区域,参数具体情况如表 1 所示.

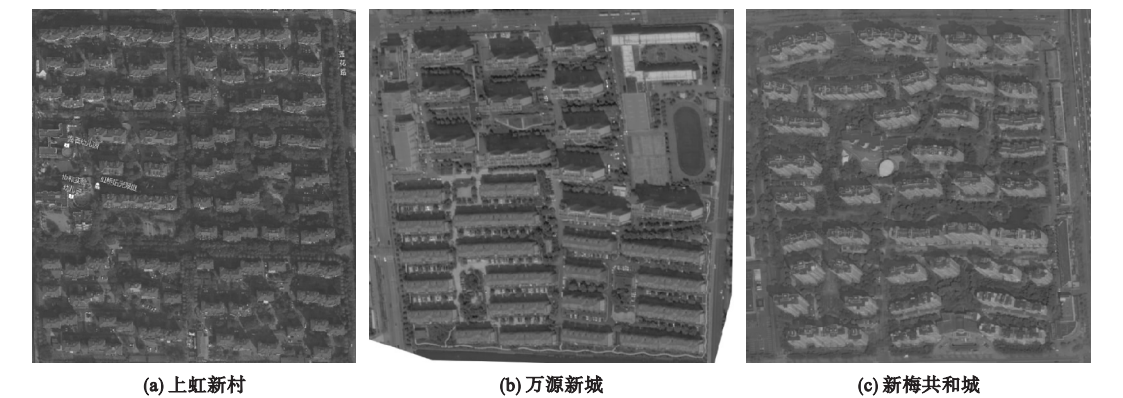


图 1 研究区域谷歌影像

Fig. 1 Google image of the three study areas

表 1 研究区域基本情况

Table 1 Basic information of the study area

住区总面积/m <sup>2</sup>	住宅高度平均值/ m	建筑密度/%	绿地率/%		道路面积/%
			乔灌木	草地	
142 336	18.00	19.55	27.24	12.65	40.56
151 414	25.88	19.13	18.44	19.40	43.03
168 560	41.06	18.43	24.29	14.03	43.25

2 研究方法

2.1 三维模型建立与基本参数设立

微气候主要有现场实测、物理模拟和数值模拟<sup>[11]</sup>的研究方法. 数值模拟因其方便快捷、省时省力的特点而得到迅速推广. 笔者采用三维数值模拟软件 ENVI – met 进行模拟分析. 该软件采用三维非流体静力学模型,对城市小尺度三维空间实体表面(surface) – 植物(plant) – 空气(air)之间相互作用进行动态模拟. 其模拟空间解析度是 0.5 ~ 10 m 和时间解析度数 10 s<sup>[12]</sup>. 采用的软件是 ENVI-met V4.2,用户可自定义气象边界条件<sup>[13]</sup>. 利用 Google earth 影像的空间分辨率为

0.51 m. 在实地考察基础上,将影像图导入 AutoCAD 2008 进行矢量化,获得各住区相关参数. 格式转换生成 ENVI – met 软件可识别的. bmp 格式底图. 应用 ENVI – met 软件子模块“SPACE”进行建模,将生成的. bmp 格式底图导入并建模. 建模完成后,可在“SPACE”模块中可转化为 3 维模型检查. 建模后“projectWizard”模块中设置配置文件. 相关建模文件和配置文件的详细参数如表 2 所示. 模拟选择 2016 – 06 – 23(夏至)作为夏季典型日,气象数据来源于 WunderGround 网站历史数据中虹桥机场的气象数据. 最后选择“envi – met”模块运行模型,运行结果在子模块“LEONARDO 2014”中查看.

表 2 ENVI – met 模拟的建模文件及配置文件参数表

**Table 2** Input parameter values of the modeling and configuration file used for ENVI-met simulations

模拟日期	模拟开始时刻	模拟时间/h	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	风向/(°)	地表粗糙度长度/mm	初始空气温度/℃	相对湿度(2 m)/%	土壤和植被初始温度/℃
2016-06-23	4:00	24	3.0	135	0.1	30	89	26

在研究的 3 个街区中各布局监测点,监测点位于不同的地表类型,分别是位于房前屋后和道路的混凝土地面、草坪上和树下,以此来归纳总结住区不同空间要素组合与空气温度的对应关系。

2.2 住区热环境影响因素分析

3 个街区建模时在不同地表设置监测点,各个街区分别选取了 79 个监测点,汇总 3 个街区共 237 个监测点,获取其在 14:00 的温度数据.量化各监测点的住区建成环境高度、天空开阔度、绿化等要素指标和湿度环境参数指标,作为街区形态因子与热环境相关影响变量.由于 3 个街区建筑高度空间构成数量关系较为复杂,笔者以上虹新村为基准,将万源新城、新梅共和城与之对比,以此量化分析建成环境高度对微气候环境的影响.所选用的横截面模型估计方程:

$$t_i = \theta_0 + \theta_1 w_i + \theta_2 m_i + \theta_3 x_i + \varepsilon_i. \tag{1}$$

式中: $i$  为表各监测点;因变量  $t_i$  为空气温度; $w_i$  为万源新城虚拟变量; $m_i$  为新梅共和城虚拟变量; $x_i$  为控制变量,包括天空开阔度(SVF)、相对湿度、是否位于道路,是否在树下,是否在草地上; $\theta_i$  为对应变量的系数值; $\theta_0$  为截距; $\varepsilon_i$  为残差项。

通过 ENVI – met 软件“LEONARDO 2014”子模块显示各住区不同时刻的温度分布,可以直观分析不同住区热环境分布的整体趋势.将温度分布图导出数据处理后可分析不同时段温度的变化或某时刻温度的差异.笔者主要分析热压力最大时刻即 14:00 住区热环境分布情况。

根据 3 个住区的建模,以硬质要素建筑、商铺、道路等和软质要素乔木、草地等为界线划分各个住区为数个围合的开敞空间,将开敞空间分为住宅组合和绿地组合两类进行分析.以 14:00 为例,分析不同要素组合模式与空气温度的关系,达到生态节能的效果。

3 住区热环境影响要素的关联性分析

采用 ENVI – met 软件“Leonardo”子模块导出 3 个住区的 237 个监测点相关的空间形态数据和气象模拟数据.分别把反应建成环境高度的形态变量、地表性质、相对湿度等影响空间气温的住区建成环境因子加入横截面模型估计方程模型,得到结果(见表 3).表中模型 1 通过在式(1)中仅仅包括控制万源新城和新梅共和城虚拟变量构成方程 1,回归结果反映了住区建成环境高度变化对空气温度的影响作用;模型 2 在方程 1 的基础上,在空间形态结构的回归中加入控制变量的“天空开阔度”因子构成方程 2,回归结果反映建筑三维空间形体的热环境影响关联作用;模型 3 和模型 4 在回归中加入地表性质变量,构成控制变量的“在树下”因子加入的方程 3 和“在草地上”因子加入的方程 4,回归关联分析以进一步探究建成环境覆被受影响热环境的重要程度.模型 5 在回归中进一步加入相对湿度变量,构成方程 5,回归结果反映住区空间三维形态变化引起的空间湿度环境对空气温度的影响关联程度。



表3 住区人行高度处空气温度影响因素回归结果

Table 36 Regression result of the effect of various factors on the thermal environment															
相关影响变量	模型 1			模型 2			模型 3			模型 4			模型 5		
	回归	显著	稳健	回归	显著	稳健	回归	显著	稳健	回归	显著	稳健	回归	显著	稳健
	系数	性	标准误	系数	性	标准误	系数	性	标准误	系数	性	标准误	系数	性	标准误
万源新城监测点	-0.245 0	***	0.056	-0.215 1	***	0.057	-0.188 3	***	0.053	-0.181 2	***	0.052	-0.205 0	***	0.056
新梅共和城监测点	-0.478 5	***	0.061	-0.412 7	***	0.063	-0.353 8	***	0.058	-0.338 2	***	0.059	-0.325 4	***	0.058
天空开阔度				0.466 0	**	0.203	0.868 4	***	0.200	0.972 6	***	0.202	0.862 1	***	0.217
树下							-0.364 2	***	0.046	-0.406 8	***	0.050	-0.299 8	***	0.070
草地上										-0.128 4	**	0.054	-0.112 9	**	0.055
相对湿度													-0.045 2	**	0.019
常数项	33.883 3	***	0.046	33.634 2	***	0.114	33.496 6	***	0.110	33.475 6	***	0.110	36.151 7	***	1.174

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示可以在1%、5%的水平下通过显著性检验。

表3中5个模型的方程1结果显示,相比上虹新村,万源新城各监测点的空气温度普遍较低,而新梅共和城的空气温度则更低.万源新城监测点的温度总体比上虹新村低0.205 0℃,新梅共和城则比上虹新村低0.325 4℃.根据模型1的相关系数的 $R^2$ 数值,仅高度一个因素,就可以解释23.7%的温度差异.可见住区的建筑层高对于空气温度有很显著的影响,低层住区温度最高,中层住区温度次之,高层住区温度最低.

5个模型的方程2结果显示,天空开阔度(SVF)对住区温度的影响比较明显.天空开阔度(SVF)越大,监测点的温度越高.在控制了建筑物三维形态影响后,建筑物层高仍然有非常显著的降温作用.当加入天空开阔度后,模型相关系数的 $R^2$ 仅增加到25.6%,表明建筑物三维形态的差异大约可以解释温度差异的1/4,其中高度起到了主要的解释作用,故建筑物三维空间形态对空气温度有较大影响.

5个模型的方程3和方程4结果显示,进一步增加绿化地表材料、相对湿度要素,草地上或者树木下的监测点相对于道路来说,温度更低,并且树下的降温作用更加明显.位于树下的监测点温度总体上比道路上的点低0.299 8℃,位于草坪上得监测点温度总体上比位于道路上的点低0.112 9℃.可见,高大乔木的降温效果比草坪的效果更佳.模型相关系数的 $R^2$ 分别增加到0.382和0.396,能够解释地表植被覆盖的影响作用.

5个模型的方程5结果显示,在控制了草地和树木对于相对湿度的影响后,发现湿度更大的监测点其温度更低,这间接反映绿化形态的影响作用.模型相关系数的 $R^2$ 增加到0.410,空间环境不同带来的相对湿度对空气温度有一定程度的影响.

## 4 住区环境要素构成的生态节能性分析

### 4.1 住区空间构成的生态节能性分析

比较住区热环境模拟结果(见图2),可以分析住区空间构成的生态节能作用情况.上虹新村内的温度整体较高,住区主要道路温度明显偏高;万源新城温度分布则存在南侧高北侧低的状况,与南北侧布局6层和13层的住宅建筑存在明显的一致性,应该是较高的建筑遮挡部分阳光直射,形成阴影区,从而导致温度较低;新梅共和城由于整个住区的楼层较高,温度分布图中深蓝色区域即温度低于33.05℃的区域明显增多,住区内红色区域分布较少,整体热环境相对最优.

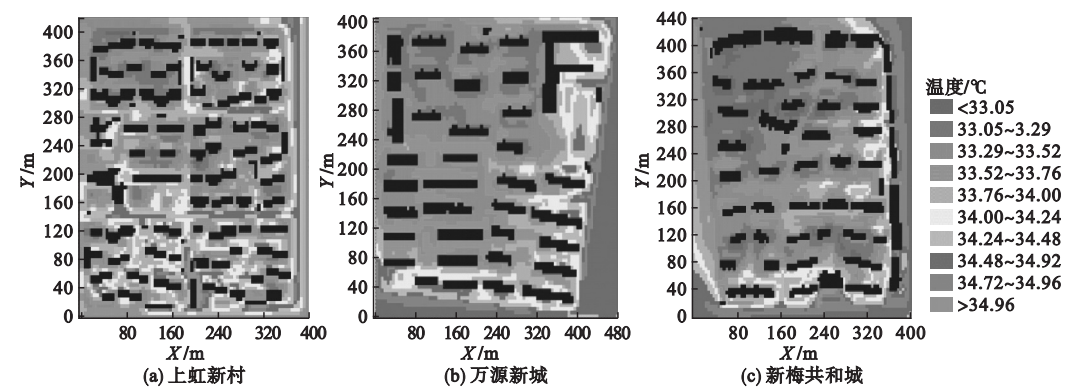


图2 住区1.5 m高度处14:00温度分布图

Fig. 2 The air temperature distribution snapshots of residential area at 1.5 m height at 2 pm on June 23, 2016

图3为3个住区14:00各温度段所占面积与住区总面积的比值,新梅共和城温度低于33.29℃的比例达到40%,而上虹新村和万源新城温度低于33.29℃的比例仅为8%,进一步表明住宅高度较高住区在14:00热环境较优. GULYÁSÁ等<sup>[14]</sup>曾对建筑遮挡、树木遮挡与生理等效温度的相关性进行研究,证明了遮挡对城市室外热环境的重要影响.可见,较高建筑物形成的遮挡作用对于改善住区夏季热环境的重要性.

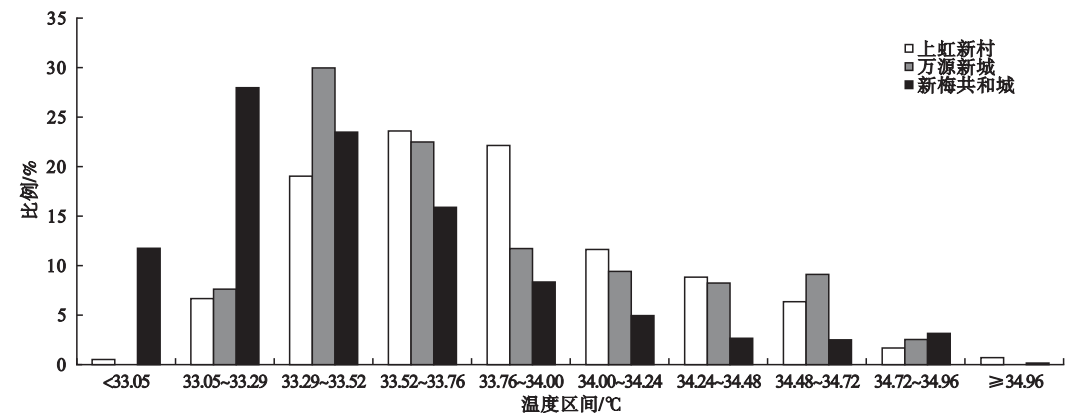


图3 住区14:00各温度区间所占比例

Fig. 3 Distributions of the grid cell - level T1.5 m on 14:00

在分析14:00空气温度分布基础上,进一步计算了3个住区所有网格1.5 m高度处日间逐时平均温度,剔除了建筑物和道路周边数据.图4为3个住区8:00—24:00的平均温度变化.在10:00—16:00,上虹新村平均温度最高,万源新城次之,新梅共和城最低,温度差异在12:00—14:00尤为明显.12:00上虹新村平均温度比万源新城高约0.29℃,比新梅共和城高约0.39℃;13:00上虹新村平均温度比万源新城平均温度高约0.34℃,比新梅共和城高约0.50℃;14:00上虹新村平均温度比万源新城平均温度高约0.08℃,比新梅共和城高约0.32℃.

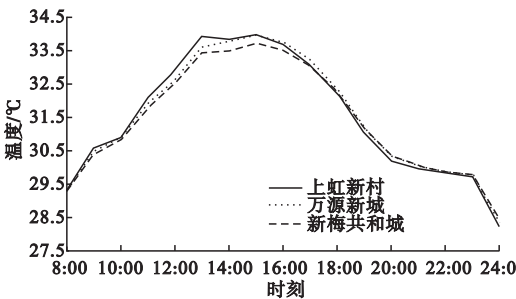


图4 住区逐时平均温度变化

Fig. 4 Hourly mean temperature (Ta) change of residential areas

4.2 住区建筑组合构成的生态节能性分析

夏季室外热环境良好,有利于节省空调使用频率和时间. 通过在研究区域布置采样点归纳总结住区不同空间要素组合与空气温度的对应关系(见图5),更能够发现建筑群和外部空间构成要素对热环境的影响. 3个

街区设置的监测点分别以街区名称特定字母和数字结合标记,上虹新村(S)9个监测点分别记为S1,S2,⋯,S9,万源新城(W)9个监测点分别记为W1,W2,⋯,W9,新梅共和城7个监测点分别记为M1,M2,⋯,M7.

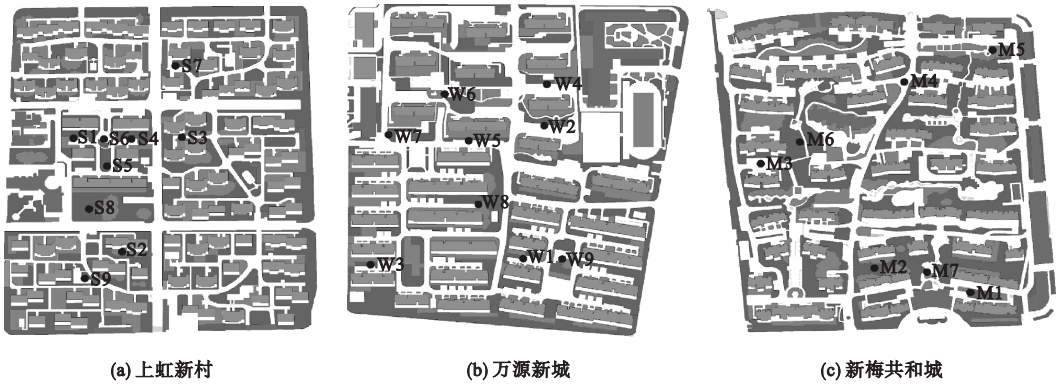


图5 采样点位置示意图

Fig. 5 The sketch map of sampling point

对比S1和W1、W2和M1两组采样点,建成环境高度相同,绿化形态和绿化比例接近,研究建筑朝向的改变对于热环境的影响,对应的局部均温分别为33.73℃和33.79℃、33.42℃和33.82℃. 建筑朝向倾斜一定角度,在规划设计时一般建筑间距系数减小,建筑间距的改变使得通风环境有所改变,建筑朝向有一定夹角的外部空间产生局部温度较高,不利于节能. 采样点S2和W3,建成环境高度相同,选取行列式错接和水平条状行列式两种空间形态模式进行比较,行列式错接同样产生局部高温区域. 研究发现,水平条状行列式与行列式变形(通过改变住宅朝向和错接)比较,空气温度相对较低.

对比S3和M2,S4、W4和M3,S5和W5三组采样点,研究建成环境高度的影响. 采样点S3和M2,南部8层和北部14层的小高层建筑之间的外部空间较6层建筑之间的外部空间温度差约0.33℃;采样点S4、W4和M3对应的两排建成环境高度分别为5、13和21层递增,局部均温对应为33.50℃、33.42℃、33.30℃,可以看出,随着建成环境高度增加,

两排建筑之间外部空间气温越低.

S4、W4和M3,S5和W5两组采样点比较发现,单元独栋建筑相对板式拼接建筑对局部热环境更有利,更有利于节能. S6、W6和M4采样点对应的局部均温分别是33.57℃、33.31℃、33.23℃,表明住宅侧面空气温度变化也存在住宅建筑越高对应的空气温度越低,较高建筑物相对间距较大和遮阴作用,相对而言空气流通更畅. 采样点S7、W7、M5对应的局部均温分别是33.68℃、33.49℃、33.74℃,与其他采样点相比,住宅围合模式,往往由于空气流通不畅造成局部温度较高,不利于生态节能.

4.3 绿地形态构成的生态节能性分析

绿地组合模式与住宅组合空间模式相比具有明显的降温效应,可有效改善住区的微气候,提高节能效应. 采样点S8、W8和M6对应的局部均温分别是33.46℃、33.44℃、33.09℃. 绿地规模尺度大的块状集中绿地更易于形成局部冷岛,反映住区中心绿地降温作用不可忽视;高层建筑构成的住区由于建筑密度的减小,外部开敞性增强,带状的环形绿化有利于通风和温度低的气流扩散,相对

热环境较好,降温效果还是比较好的. 采样点 S9、W9 和 M7 对应的局部均温分别是  $34.11^{\circ}\text{C}$ 、 $33.75^{\circ}\text{C}$ 、 $33.47^{\circ}\text{C}$ , 比较组团级绿地的降温效果. 健身或游戏场地即有硬质铺地与绿地相结合的降温效果相对较弱; 片状乔木绿化的降温效果优于同面积草地.

综合分析可知: 绿地降温效应受绿地形状的影响, 较大规模的集中绿地和环网状的绿地均具有强降温效应, 环网状绿化对住区热环境影响更大. 此外, 与健身或游戏场地相结合的块状绿地其降温效应相对较弱.

## 5 结 论

(1) 建成环境高度、天空开阔度、绿化形态、相对湿度等住区要素均作用于住区温度. 通过多元回归, 天空开阔度大约可以解释温度差异的 25%, 其中高度起主要解释作用. 绿化要素中, 高大乔木大约可以解释温度差异的 13%, 其蒸发蒸腾作用和遮挡作用带来的降温效果远优于草坪的降温效果.

(2) 建筑朝向、形态、高度、绿化的面积、形态等要素组合形成于空气温度的影响. 平行行列式建筑相对有利于通风, 有利于形成较低的空气温度, 此外单元独栋建筑相对板式拼接建筑对局部热环境更有利. 住宅围合模式, 往往由于空气流通不畅也会造成局部温度较高. 通风环境良好, 空气温度较低的空间组合模式, 更有利于达到节能的效应.

(3) 绿地组合模式与住宅组合空间模式相比具有明显的降温效应, 可有效改善住区热环境, 提高节能效应.

## 参考文献

- [1] YAHIA M W, JOHANSSON E. Landscape interventions in improving thermal comfort in the hot dry city of Damascus, Syria: The example of residential spaces with detached buildings [J]. *Landscape & urban planning*, 2014, 125: 1–16.
- [2] WANG Y, BERARDI U, AKBARI H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada [J]. *Energy & buildings*, 2016, 114: 2–19.
- [3] KONG F, SUN C, LIU F, et al. Energy saving potential of fragmented green spaces due to their temperature regulating ecosystem services in the summer [J]. *Applied energy*, 2016, 183: 1428–1440.
- [4] MIDDEL A, HÁB K, BRAZEL A J, et al. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones [J]. *Landscape & urban planning*, 2014, 122(2): 16–28.
- [5] O'MALLEY C, PIROOZFAR P, FARR E R P, et al. Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis [J]. *Sustainable cities & society*, 2015, 19: 222–235.
- [6] HUTTNER S. Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met [D]. Mainz: Johannes Gutenberg-universität in Mainz, 2012.
- [7] OKE T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations [J]. *International journal of climatology*, 1981, 1(3): 237–254.
- [8] 袁超. 缓解高密度城市热岛效应规划方法的探讨: 以香港城市为例 [J]. *建筑学报*, 2010 (增刊 1): 120–123.  
(YUAN Chao. Mitigating urban heat island effects of high density cities: a study at Hong Kong [J]. *Architectural journal*, 2010 (S1): 120–123.)
- [9] 杨鑫, 段佳佳. 不同临街空间模式对小气候环境的影响: 以北京市城区典型临街空间为例 [J]. *城市问题*, 2016(7): 44–54.  
(YANG Xin, DUAN Jiajia. Influences on microclimate environment by different street space modes: taking Beijing's typical urban street space for example [J]. *Urban problems*, 2016(7): 44–54.)
- [10] 李晗, 吴家正, 赵云峰, 等. 建筑布局对住宅住区室外微环境的影响研究 [J]. *建筑节能*, 2016(3): 57–63.  
(LI Han, WU Jiazheng, ZHAO Yunfeng, et al. Influence analysis of building layouts on micro-environment of residence community [J]. *Building energy efficiency*, 2016(3): 57–63.)
- [11] 郭琳琳, 李保峰, 陈宏. 我国在街区尺度的城市微气候研究进展 [J]. *城市发展研究*, 2017, 24(1): 75–81.  
(GUO Linlin, LI Baofeng, CHEN Hong. A review of urban micro-climate research on block scale in China [J]. *Urban development studies*, 2017, 24(1): 75–81.)
- [12] BRUSE M, FLEER H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model [J]. *Environmental modelling & software*, 1998, 13(3/4): 373–384.
- [13] HUTTNER S, BRUSE M. Numerical modelling of the urban climate—a preview on ENVI-met 4.0 [C]. Yokohama, Japan: Proceedings of the 7th international conference on urban climate, 2009.
- [14] GULYÁS Á, UNGER J, MATZARAKIS A. Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: Modelling and measurements [J]. *Building & environment*, 2006, 41(12): 1713–1722.