

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.02.002

# 天津市老旧居住区室外热舒适研究

袁景玉, 田凯越, 姚 胜

(河北工业大学 建筑与艺术设计学院, 天津 300130)

**摘要:** 居住区的室外空间是老年人进行户外活动的主要场所,其良好的热舒适环境显得尤为重要。以天津市3种典型布局形式的老旧居住区为研究对象,通过现场实测和问卷调研,了解老年人的热感觉并探析小区内不同位置热环境参数的分布规律及存在的问题。同时确定了春季老年人主观热感觉投票值与基于实测值的热舒适指标生理学等价温度之间的函数关系,进一步得到老年人的热中性生理学等价温度约为 $21.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,其热舒适生理学等价温度范围为 $16.5\sim 26.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最后选取典型居住区对其空间布局进行优化设计,采用Phoenics和Ecotect软件对优化后的室外空间热环境进行模拟与分析,从而提出基于热舒适的居住区室外空间设计宜采用在建筑来风向一侧围合,内部为行列式分布的混合式布局方式。

**关键词:** 老旧居住区; 室外热舒适; 生理学等价温度; 空间布局

中图分类号: TU111.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)02-0158-07

## Study on outdoor thermal comfort of old residential area in Tianjin

YUAN Jingyu, TIAN Kaiyue, YAO Sheng

(School of Architecture &amp; Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** As a main place in which to carry out outdoor activities for the elderly, it is particularly important for the outdoor space of the residential area to have a good thermal comfort environment. Taking three typical layouts of the old residential areas in Tianjin as the research object, the field measurement and questionnaire survey were performed to understand the thermal sensation of the elderly and analyze the distribution rule and existing problems of the thermal environment parameters at different locations in the community. At the same time, the function relationship between the thermal sensation vote and the physiological equivalent temperature (a kind of thermal comfort index) based on the measured value was determined. The results show that the thermal neutral physiological equivalent temperature of the elderly is about  $21.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and that the thermal comfort range is  $16.5\sim 26.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Finally, a spatial layout optimization of the typical residential area was conducted, with the Phoenics and Ecotect software used to simulate and analyze the thermal environment of the optimized outdoor space. Thus, it is suggested that the outdoor space design of a residential area, based on the outdoor thermal comfort, should adopt the mixed layout mode in which the building is surrounded in wind direction and that the interior of the residential area should be arranged in a row.

**Key words:** old residential area; outdoor thermal comfort; physiological equivalent temperature; spatial layout

收稿日期: 2020-07-28; 网络出版日期: 2020-11-25

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201125.1508.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508151)

第一作者: 袁景玉,男,博士,教授,研究方向为建筑物理环境和健康城市热环境。E-mail: jyyuan@hebut.edu.cn

通信作者: 姚胜,男,博士,讲师,研究方向为建筑物理环境营造与优化技术。E-mail: yaosheng@tju.edu.cn

室外热环境是居住区室外空间环境营造中非常重要的内容<sup>[1]</sup>。天津市现存老旧居住区大多建于八九十年代,建筑布局、空间等的设计相对随意<sup>[2]</sup>,居住区热环境存在明显的缺陷,而后期的改造、维护中,也更注重建筑本身的处理,对室外热环境考虑较少,从而影响了居住区室外的热舒适<sup>[3]</sup>。

对于居住区室外热环境的研究,Carlestam等<sup>[4]</sup>通过对纳维亚半岛热环境的分析,发现由于当地纬度较高,昼短夜长,且寒冷期较长,因此居民更偏好太阳辐射强烈的地方建造居住和活动场地。美国旧金山市规划部<sup>[5]</sup>提出当地的建筑设计必须要兼顾居民对风速和太阳辐射的需求。近年来,针对居住区热环境分析与改善的课题逐渐增多。在国内,蒋存妍等<sup>[6]</sup>通过调研分析给出了严寒地区过渡季基于热环境的规划启示。刘乐<sup>[7]</sup>通过实测分析西安居住区的室外热环境,进而对小区内规划布局提出改造措施。周峰等<sup>[8]</sup>在提出热环境影响因素的基础上,通过 ENVI-met 软件模拟获得建筑空间形态、密度、容积率等对热环境的量化影响关系。黄泽峰<sup>[9]</sup>对绵阳地区大学校园进行实测调研分析,得到相应的热感觉及热舒适规律,并以生理学等价温度 PET 为指标,通过软件模拟得到不同规划设计因子对热环境舒适度的定量影响。

对于热舒适的研究,Fanger<sup>[10]</sup>提出了基于人体热舒适平衡方程的预测平均热感觉指标 PMV。Mayer等<sup>[11]</sup>提出了慕尼黑能量平衡模型 MEMI。Höppe<sup>[12]</sup>根据 MEMI 模型开发了生理等效温度 PET。国际生物气象学协会(ISB)<sup>[13]</sup>开发了人体自动调节状态下的多节点通用热气候指数 UTCI。随着热舒适指标应用研究的增多,Cheng等<sup>[14]</sup>在香港预测了 PMV 指标在冬夏季室外太阳辐射、风速影响下的准确性,证明 PMV 并不适用于相对复杂的室外热环境的舒适度评价。Lin等<sup>[15]</sup>对台湾月潭进行实地调研,得到台湾地区热舒适的 PET 范围,并证明了通过当地实测和人体热感受相关性分析可以

得到不同地区的热舒适指标。赖达祎<sup>[16]</sup>通过对天津市室外热舒适的实测研究,就 PMV、PET 和 UTCI 适应性做出判断,指出适合天津的范围。雷永生<sup>[17]</sup>通过对哈尔滨不同室外空间的实测调研分析,建立了严寒地区各季节多维度室外热舒适预测模型。席天宇等<sup>[18]</sup>对哈尔滨旅游景点进行调研,分析了不同地区游客的热适应模式。方小山等<sup>[19]</sup>通过调研与实测提出了广州地区夏季老年人室外热舒适模型。魏宇迪等<sup>[20]</sup>对武汉市城区进行调研分析,建立了夏季热舒适回归模型,并提出了热舒适改进意见。

综上,随着对室外热环境的认识以及研究方法的发展,大多数研究主要集中在针对室外热环境的改造及热舒适指标的适用性理论上<sup>[21]</sup>,对于建筑群体内普遍存在的热舒适问题,尚缺少具体可行的实测和分析方法对其作出定量的评判。天津市作为全国最早的老年型城市之一,老旧居住区所占比重较大,将其老旧居住区布局形式与室外空间热舒适存在的问题相结合尚待进行深入的研究。

本文通过对天津市老旧居住区居住者感受的调研与物理环境的实测,定量地评价室外热环境的舒适度,并提出相应的居住区布局优化措施,希望能为居住区室外活动空间热舒适的改善提供帮助,也为之后新建小区的布局设计提供一定的参考。

## 1 研究方法

### 1.1 对象选取

利用 Google Earth 地图对天津市内 40 多个老旧居住区进行详细观测与记录,通过资料收集与统计发现,天津市老旧住区多为行列式、围合式及混合式 3 种布局形式。选取燕宇艺术家园(行列式)、佳安里(围合式)、佳宁里(混合式)3 个典型小区(见图 1)进行分析,并在每个小区中选取人们经常活动的地点(见表 1)进行下一步调研测试分析。

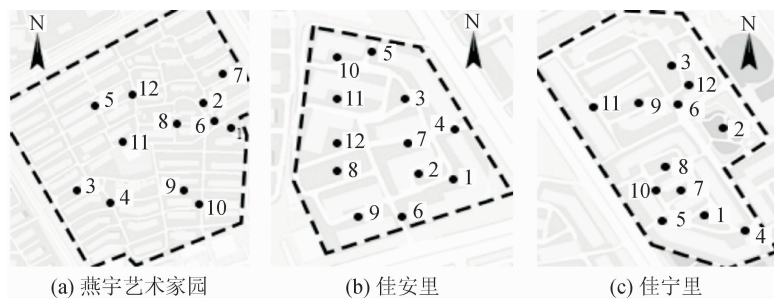


图 1 居住区测点位置分布

Fig. 1 Distribution of measuring points in residential area

表1 测点位置分布表

Tab.1 Distribution of measuring points

测点	点的选取
1~3	大空间活动广场
4~6	建筑山墙间
7~9	宅前空间
10~12	宅间活动小广场

$$T_{mrt} = \left[ (T_g + 273)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 V_a^{0.6}}{\epsilon D^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (1)$$

式中:  $T_g$  为黑球温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_a$  为空气温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $V_a$  为风速( $\text{m/s}$ );  $\epsilon$  为发射率,对于黑球  $\epsilon = 0.95$ ;  $D$  为黑

## 1.2 现场测试

为了研究热环境的客观影响因素,对居住区的主要热环境物理要素温度、湿度、风速、黑球温度进行实测,也为各测点平均辐射温度( $T_{mrt}$ )以及生理学等价温度 PET 的计算提供数据支持,其中平均辐射温度的计算见式(1)。测试中用到的仪器设备主要有温湿度记录仪、热敏式风速计以及黑球温度计等,其具体参数见表2。

球温度计黑球直径( $\text{m}$ ),取  $0.15 \text{ m}$ 。

表2 测试仪器参数

Tab.2 Parameters of test instruments

仪器名称	型号	参数	测量范围	误差及分辨率
温湿度记录仪	TR-74Ui-H	温度	$0 \sim 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}/0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
		湿度	$10\% \sim 95\% \text{ RH}$	$\pm 5\% \text{ RH}/1\% \text{ RH}$
热敏式风速计	Testo 425	风速	$0.0 \sim 10.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\pm (0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} + 5\% \text{ rdg}) / (0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$
黑球温度计	AZ-8778	黑球温度	$0 \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}/0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

春季作为过渡季,天气变化较缓,适宜进行户外活动,良好的居住区室外热环境则显得非常重要。调研中实测时间为2019年4月27日,天气晴朗,分别在10:00和15:00这两个居民活动较多的时间点同时对3个小区进行测试。每个小区从1号点出发,记录测点1.5 m高度处测点的物理参数,每个点停留3 min便迅速转移到下一点进行测试。

### 1.3 问卷调研

实测的同时在小区的大空间活动广场发放调查问卷,在测试者的解释引导下完成,每次在每个大空间活动广场发放10份,共180份。本次调研受试者为在活动广场停留的50岁以上的老年人,男性116人(64.4%),女性64人(35.6%),其中51~60岁之间84人(46.7%),61~70岁之间70人(38.9%),70岁以上26人(14.4%)。

调查问卷的主要内容包括受访人员的基本信息(如年龄、性别、体重、身高、衣物热阻以及活动类型、活动地点和活动时间的长短等),对公共空间的热感觉、对热环境参数的偏好以及对小区热舒适改造的建议。考虑到天津市过渡季的气候特征,热感受采用ASHRAE推荐的7级分度标尺中的凉(-2)、微凉(-1)、中性(0)、微暖(+1)、暖(+2)等5级标度。

### 1.4 优化模拟

通过对3个居住区室外热环境物理要素的现场测试数据进行对比分析,选取典型居住区进行建筑

布局的优化设计与模拟,其中选用Phoenics软件计算室外的风速场和温度场,Ecotect软件计算太阳辐射场。就小区内1.5 m(人员呼吸区域)高度处15:00的物理参数模拟结果进行重点分析,同时提取代表性测点的数据输入RayMan热舒适模型中计算得到相应的PET值,并与优化前进行比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 现场实测结果分析

由于太阳方位的原因,下午小区内热环境存在更多的问题。因此,对3个小区15:00的热环境参数进行分析。

见图2,燕宇艺术家园的室外温度介于 $16 \sim 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而佳安里与佳宁里分别为 $16 \sim 18.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $18 \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,各小区内不同位置测点的温度出现轻微波动,但总体上佳宁里的室外空气温度明显高于佳安里与燕宇艺术家园约 $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可见围合度越高,小区内热环境温度也越高。见图3,燕宇艺术家园的湿度分布于 $46.8\% \sim 49.5\%$ 之间,而佳安里与佳宁里小区分别为 $45.4\% \sim 47.3\%$ 、 $43.8\% \sim 48\%$ ,其中因燕宇艺术家园9、10测点有局部景观水体、佳宁里活动空间1、2、3、11测点布置有集中绿化,湿度与同一小区内其他测点相比存在明显的波动,而佳安里小区由于不存在景观水体与集中绿化的影响,其湿度波动相对较小。

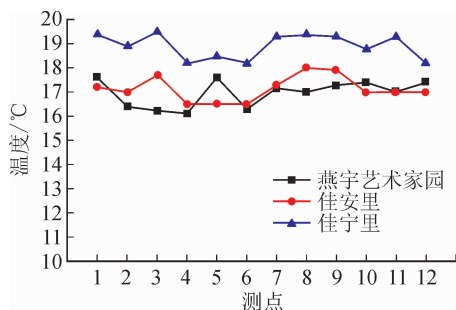


图2 不同位置温度分布

Fig. 2 Temperature distribution at different locations

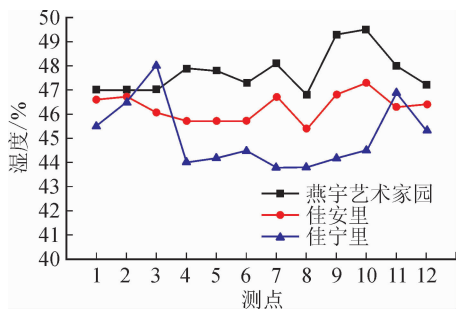


图3 不同位置湿度分布

Fig. 3 Humidity distribution at different locations

见图4,燕宇艺术家园的风速波动最大,佳安里次之,佳宁里最小,而平均风速佳安里最小,燕宇艺术家园最大。大空间活动空间测点受位置的影响差异较大,燕宇艺术家园测点2受行列式竖向狭管效应的影响,测点3由来风向角隅风的作用,风速可达1.8 m/s;而佳安里和佳宁里测点2由建筑的布局造成风速差异较大。佳安里和佳宁里山墙间测点4~6由狭管效应形成骤增的风口;燕宇艺术家园测点4和6形成竖向气流,风速较大,而测点5由于周边建筑错列布局,风速平稳。此外,建筑宅前空间风速均相对平稳。3个居住区受其排布方式的影响,其中燕宇艺术家园宅间活动小广场在建筑错列布局的影响下,稳定在0.8 m/s左右;而佳宁里和佳安里则由于西侧建筑的遮挡,风速更小。

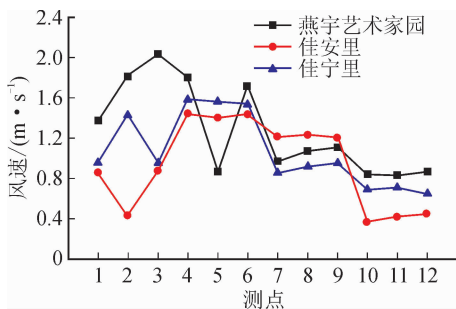


图4 不同位置风速分布

Fig. 4 Wind speed distribution at different locations

计算得出,15:00太阳位置偏西,居住区内太阳辐射较上午存在明显问题,此时仍属于居民外出活动的高峰时段。由图5可看出,由于燕宇艺术家园为行列式布局,其室外空间太阳辐射良好, $T_{mrt}$ 值普遍较高;佳安里建筑以围合式布局为主,下午部分空间受西侧建筑遮挡的影响,太阳辐射偏低,整个小区 $T_{mrt}$ 值波动大。相对而言,佳宁里内部空间 $T_{mrt}$ 波动性最小。燕宇艺术家园、佳宁里大空间活动广场 $T_{mrt}$ 值均较高,佳安里测点2为西侧建筑围合形成的空间,由于太阳方位的变化,下午仅有少量直射阳光的存在, $T_{mrt}$ 值低于其他测点,在27°C左右;其他大空间活动广场测点 $T_{mrt}$ 值在34~38°C之间。建筑山墙间的测点受建筑不同程度的遮挡,3个小区有不同的 $T_{mrt}$ 值。宅前空间受建筑高度和住宅间距的影响,3个小区 $T_{mrt}$ 值不同。对于宅间活动小广场,佳安里测点10、11、12和佳宁里测点10、12受西侧建筑遮挡的影响,低于其他测点;燕宇艺术家园活动小广场 $T_{mrt}$ 值良好。

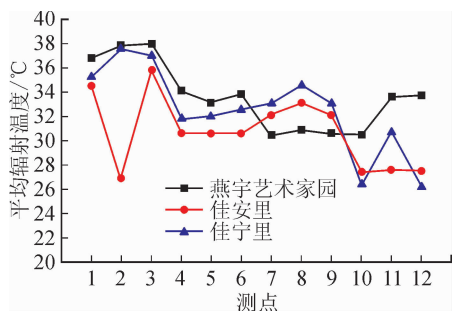


图5 不同位置平均辐射温度分布

Fig. 5 Mean radiation temperature distribution at different locations

## 2.2 调查问卷结果分析

见图6,从3个小区的舒适度问卷统计结果可以看出燕宇艺术家园居民的整体感觉偏凉,佳安里适中,佳宁里小区偏暖,其中燕宇艺术家园居民热感觉中凉、微凉各占36.7%、53.3%,佳安里小区微凉、适中、微暖分别占35%、37.5%、17.5%,而佳宁里居民热感觉适中、微暖、暖的比例分别为27.5%、40%、7.5%。

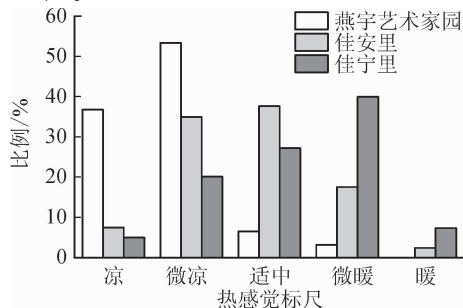


图6 热感觉投票分布

Fig. 6 Distribution of thermal sensation vote

平均辐射温度( $T_{mrt}$ )值由实测的黑球温度间接

见图7,在3个小区内,居民偏好的热环境主要集中在对温度、风速和太阳辐射方面的优化,而对湿度变化的需求不明显。总体上56%以上的居民认为当时的温度处在适中范围内,其中燕宇艺术家园居民对温度的满意度最低,有63%的居民希望增高空气温度,佳安里则有34%的居民希望增高温度。60%以上的居民都能够适应所在小区的室外湿环境,可见居民对于湿度的偏好不明显。就室外风速而言,燕宇艺术家园的居民有64%希望降低风速,而佳安里和佳宁里分别有45%和71%的居民希望风速保持不变。此外,燕宇艺术家园的居民对太阳辐射的满意度最高,达到67%,而佳安里受建筑遮挡的影响,有47%的居民希望获得更多的太阳辐射,佳宁里也有31%的居民认为有必要加大太阳辐射。

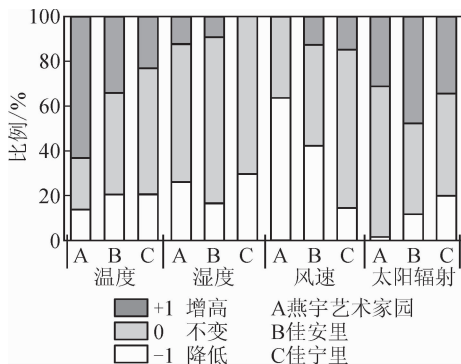


图7 热环境偏好投票分布

Fig.7 Distribution of votes for thermal environment preference

### 2.3 热舒适指标计算与分析

生理学等价温度 PET 是评价室外热环境舒适度的定量指标<sup>[12]</sup>。选用 RayMan 软件对 PET 值进行计算,其准确性已经得到证实<sup>[22]</sup>。在初始阶段根据现场测试数据输入:空气温度、空气湿度、风速、平均辐射温度、计算的日期和时刻、地理位置以及人员的年龄、性别、体重、身高、活动强度和衣服热阻等参数值,进而计算得出不同测点的 PET 值,其中活动的代谢率取 1.0 met,衣服热阻取 0.9 clo<sup>[23]</sup>。

由图8可看出,佳宁里内部空间热环境较稳定,PET 值波动最小。平均 PET 值燕宇艺术家园最小,在 16~21 °C 之间;佳宁里最大,在 17~24 °C 之间。大空间活动广场 PET 值波动较大,其中燕宇艺术家园测点 2、3 风速大,温度低,佳安里测点 2 受西侧建筑遮挡太阳辐射较低,佳宁里测点 2 位于居住区外,建筑群体的不合理布局导致风速偏大,这些因素都使活动广场的 PET 值偏低。而佳安里、佳宁里测点 1、3 太阳辐射良好,风速稳定,PET 值较高。

对于建筑山墙间测点,受风速影响,PET 值普遍较低,测点 5 由于建筑的错列布局,PET 值较高。宅前空间的间距影响了热环境的变化,进而影响了各居住区的 PET 值分布。宅前小广场燕宇艺术家园各测点由于错列布局营造的活动空间 PET 值普遍较高,佳安里测点 10、11、12 和佳宁里测点 10、12 受太阳辐射影响,PET 值偏低。

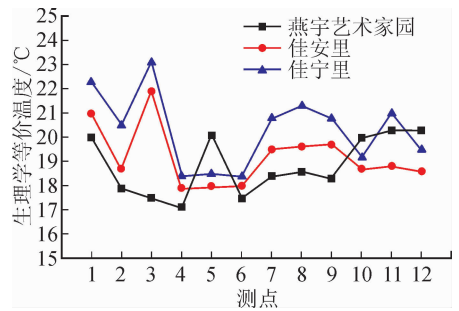


图8 不同位置生理学等价温度分布

Fig.8 Distribution of physiological equivalent temperature at different locations

通过对小区内室外热环境的实测、热舒适指标 PET 值的计算以及对居民热感觉的调查,建立了春季天津市老旧居住区老年人主观热感觉投票值 TSV 与基于实测值的热舒适指标生理学等价温度 PET 之间的对应关系。运用 SPSS 17.0 软件,取问卷调查中 TSV 的平均值,以 0.5 °C PET 进行间隔分组,用加权线性回归的方法得到两者的关系曲线见图9,拟合效果良好,其方程式为:

$$TSV = 0.103PET - 2.195 (R^2 = 0.816) (2)$$

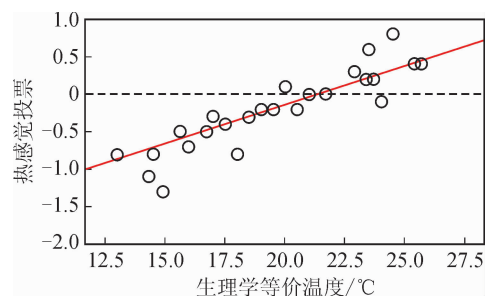


图9 主观热感觉投票与生理学等价温度相关性

Fig.9 Correlation between subjective thermal sensation vote and physiological equivalent temperature

可以看出,当  $TSV = 0$  时,  $PET = 21.3$  °C,即老年人春季室外热中性 PET 值为 21.3 °C。以 TSV 在 -0.5~+0.5 之间的 PET 范围为热舒适范围依据,可知春季天津市老年人的热舒适生理学等价温度区间为 16.5~26.2 °C。考虑到老年人新陈代谢和机体调节能力较弱,喜欢温度更高的室外环境且可承受的外界温度变化范围较小,因此这一结论与赖达祎<sup>[16]</sup>在关于中国北方地区室外热舒适的

研究中得到的天津市居民热感觉对应的 PET 适中尺度为 11~24 °C 基本一致。

## 2.4 优化措施与模拟结果分析

建筑群体的布局形式不同,居住区内不同的室外空间会带给人们不一样的热舒适感受。由以上实测的分析结果可知,居住区规划布局中,选择在建筑来风向一侧进行围合,内部采用行列式的混合式布局其室外热环境 PET 值更高,波动更小。因此,以佳宁里为原型,进行建筑布局的优化设计与模拟,优化设计平面图见图 10。

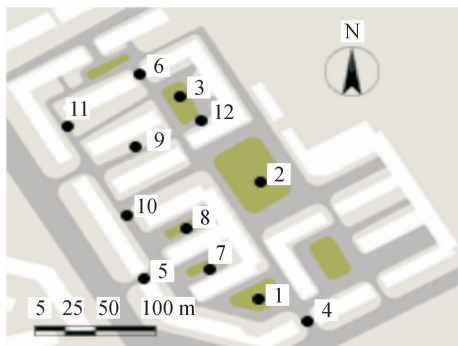


图 10 优化设计平面图

Fig. 10 Optimization design plan

1) 对于外侧围合部分,下午受西侧建筑遮挡,太阳辐射低,在这些空间人们更愿意拥有充足的光照来提高户外舒适度。在建筑来风一侧布置东西向建筑,形成一个连续封闭的二层高挡风面,使左侧底层建筑和道路也有一定的太阳辐射,同时避免外侧建筑角隅风的影响,改善内部的通风效果。

2) 内侧行列式布局的竖向空间以及建筑山墙间空间的狭管效应均导致风速过大,温度降低, PET 值低于热舒适范围,对于此类活动空间,人们更想降低其风速。因此,可选择错列式的布局方式,增加山墙间的间距,使流向小区内部的气流速度变缓。

3) 建筑宅前空间的间距需满足日照和通风需求。对于大空间活动广场,合理布置其位置,沿住宅的山墙面加建带状二层配套用房,围合成私密的内向活动空间,其间距增加至 3 倍日照间距,此活动广场的设计能满足老年公寓公共服务设施的要求,也可以保证稳定的室外热环境。

经过前面的实测分析可知,每个小区内的湿度分布相对均匀,模拟中采用实测加权平均值作为其计算依据。太阳辐射、风速、温度等物理参数的模拟分析结果见图 11,优化前后室外空间平均 PET 值的对比见表 3。

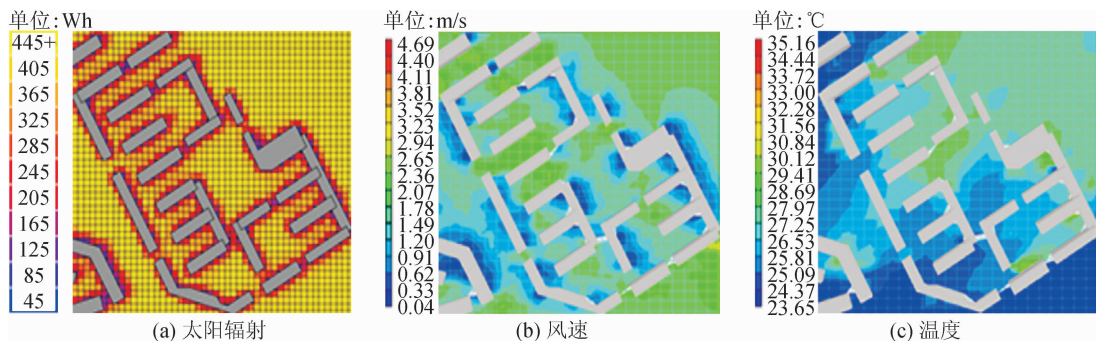


图 11 优化后 15:00 模拟分析图

Fig. 11 Simulation analysis diagram at 15:00 after optimization

表 3 优化前后平均 PET 值对比表

Tab. 3 Comparison table of average PET value before and after optimization

阶段	大空间 活动广场	建筑 山墙间	宅前 空间	宅间活动 小广场
优化前	22.0	18.4	21.0	19.9
优化后	25.6	22.3	24.2	24.0

经过优化设计后,居住区内各测点温度分布相对均匀,风速也趋于稳定。居住区内静风区有所减少,同时入口处风速也得到降低,在实际设计中,开口附近及建筑围合空间的绿化设计,还会使其风速有所降低。通过建筑高度的调整,受西侧影响严重的空间内太阳辐射值得到大幅提高。此外,各测点

的 PET 值也有所提高,并分布更加均匀,不同活动空间测点的 PET 平均值均维持在一个合理的范围内。因此通过优化设计可明显改善居住区的室外热环境,为居民提供更加舒适的户外空间。

## 3 结论

1) 天津市老旧居住区内春季室外温度、湿度波动较小,其中围合程度较高的混合式小区佳宁里平均温度最大,湿度最小;行列式布局的燕宇艺术家园居住区风速波动及平均值均最大;围合式居住区佳安里平均辐射温度波动最大,平均辐射温度偏低。综合各热环境参数的影响,混合式布局的佳宁里小

区生理学等价温度波动小且平均值最高。

2) 针对大空间活动广场,行列式布局的燕宇艺术家园居民的整体感觉偏凉,围合式居住区佳安里适中,而混合式的佳宁里小区则偏暖。此外,居民偏好的热环境主要集中在对温度、风速和太阳辐射方面的优化,而对湿度变化的需求不明显。

3) 就天津市老旧居住区室外空间而言,春季老年人室外热中性生理学等价温度约为  $21.3^{\circ}\text{C}$ ,其热舒适生理学等价温度范围为  $16.5\sim 26.2^{\circ}\text{C}$ 。

4) 在新建居住区设计中,宜采用在建筑来风向一侧围合,内部为行列式分布的混合式布局形式,合理安排建筑间的空间组合,满足居住区功能及热舒适需求。

#### 参考文献:

- [1] 金涛,杨永胜. 居住区环境景观设计与营建[M]. 北京:中国城市出版社,2003.
- [2] 汪丁. 天津市居住小区老年人户外活动空间评价研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2014.  
WANG Ding. The evaluation and research on the elderly outdoor activity space of living quarter in Tianjin[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [3] 张玲. 旧居住区改造问题研究[D]. 天津:天津大学,2017.  
ZHANG Ling. Study on the transformation of old residential district[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [4] CARLESTAM G. Studier avutomhusaktiviteter med automatisk kamera[R]. 1968.
- [5] San Francisco City Planning Department. Downtown: an area plan of the master plan of the city and county of San Francisco[R]. 1985.
- [6] 蒋存妍,冷红. 寒地城市过渡季节住区公共空间气候舒适性分析及规划启示—以哈尔滨为例[J]. 城市建筑, 2017(1):29-32.  
JIANG Cunyan, LENG Hong. Climate comfortable condition analysis and planning implications of residential district public spaces in transition season of cities in severe cold region; taking Harbin as an example[J]. Urbanism and Architecture, 2017(1):29-32.
- [7] 刘乐. 西安地区城市居住区室外热环境研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.  
LIU Le. Research on outdoor thermal environment of urban residential areas in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [8] 周峰,孙澄. 东北严寒地区居住小区室外热环境优化设计研究[J]. 城市建筑,2018(34):119-121.  
ZHOU Feng, SUN Cheng. Optimal design for thermal environment of residential area in severe coldregions of Northeast[J]. Urbanism and architecture, 2018(34): 119-121.
- [9] 黄泽峰. 基于舒适度的绵阳地区大学校园室外活动空间设计策略研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2020.  
HUANG Zefeng. Research on design strategy of outdoor activity space in university campus in Mianyang area based on comfort[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- [10] FANGER P O. Thermal comfort:analysis and applications in environmental engineering[M]. Copenhagen; Danish Technical Press, 1970: 244.
- [11] MAYER H, HÖPPE P. Thermal comfort of man in different urban environments[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1987, 38: 43-49.
- [12] HÖPPE P. The physiological equivalent temperature-a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment[J]. International Journal of Biometeorology, 1999, 43(2): 71-75.
- [13] JENDRITZKY G, DE DEAR R, HAVENITH G. UTCI-why another thermal index? [J] International Journal of Biometeorology, 2012, 56: 421-428.
- [14] CHENG V, NG E, CHAN C. Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: a longitudinal study based in Hong Kong[J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(1): 43-56.
- [15] LIN T P, MATZARAKIS A. Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan[J]. International Journal of Biometeorology, 2008, 52(4): 281-290.
- [16] 赖达祎. 中国北方地区室外热舒适研究[D]. 天津:天津大学,2012.  
LAI Dayi. Outdoor thermal comfort in northern China [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [17] 雷永生. 严寒地区城市室外热舒适多维度评价研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.  
LEI Yongsheng. Multi dimensional evaluation of outdoor thermal comfort in severe cold city[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [18] 席天宇,王翘楚,丁建华,等. 寒地城市景点旅游人群热舒适差异化对比研究[J]. 建筑科学,2019,35(10): 124-129.  
XI Tianyu, WANG Qiaochu, DING Jianhua, et al. Thermal comfort differences between local and foreign tourists in tourist spots of severely cold cities[J]. Building Science, 2019, 35(10): 124-129.
- [19] 方小山,胡静文. 湿热地区老年人夏季室外热舒适阈值研究[J]. 南方建筑,2019(2):5-12.  
FANG Xiaoshan, HU Jingwen. Study of the outdoor thermal comfort threshold of elderly people in hot and humid regions in summer [J]. South Architecture, 2019(2): 5-12.
- [20] 魏宇迪,李鹏. 武汉市夏季室外环境热舒适度主观评价研究[J]. 城市建筑,2020,17(10):71-76.  
WEI Yudi, LI Kun. Study on subjective evaluation of outdoor environmental thermal comfort of Wuhan in summer [J]. Urbanism and Architecture, 2020, 17(10): 71-76.
- [21] 胡兴,李保峰,陈宏. 室外热舒适度研究综述与评估框架[J]. 建筑科学,2020,36(4):53-61.  
HU Xing, LI Baofeng, CHEN Hong. Research review and evaluation framework of outdoor thermal comfort [J]. Building Science, 2020, 36(4): 53-61.
- [22] MATZARAKIS A, RUTZ F, MAYER H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments-application of the RayMan model [J]. International Journal of Biometeorology, 2007, 51(4): 323-334.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 室内人体热舒适环境要求与评价方法:GBT 33658-2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.