

# 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

刘启波, 杨雯婷

(长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 居住区室外环境作为人们活动发生较为频繁的主要区域, 其室外舒适度研究日益受到重视. 随着计算机模拟辅助设计领域的发展, 越来越多的研究方法开始选用遗传算法开展自动优化布局. 为优化西安地区居住区室外热舒适并探究建筑布局与其相关性, 本研究以西安市某住区前期设计为例, 结合进化算法与帕累托原理, 使用多目标优化平台 Octopus 制定了基于室外热舒适的建筑布局自生成实验. 该实验通过解集空间择优探究文章背景环境下的最终优化布局方案, 实验结果表明: 该方法可行有效, 能够辅助设计者进行方案生成与决策, 为城市建筑布局提供优化方法策略. 而西安地区的实验数据表明, 本研究所提出优化方案中, 建筑布局在冬季对室外热舒适的改善作用更为显著.

**关键词:** 城市住区; 室外热舒适; 自动布局; 多目标优化; 遗传算法

**中图分类号:** TU 984.12

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2022)01-0054-07

## Study on multi-objective optimization layout of outdoor thermal comfort in residential areas based on climate characteristics: Taking Xi'an as an example

LIU Qibo, YANG Wenting

(School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** As residential outdoor area is the main place where people's activities occur frequently, the study of outdoor comfort has been paid more and more attention. With the development of computer simulation aided design, more and more research methods begin to use genetic algorithm to optimize layout automatically. In order to improve outdoor thermal comfort of residential areas in Xi'an and explore correlation between building layout and outdoor thermal comfort, this research took the early design of a residential area in Xi'an as an example and used multi-objective optimization platform Octopus, combined with evolutionary algorithm and Pareto principle, to develop the self-generating experiment of building layout based on outdoor thermal comfort. In experiment, final optimal layout scheme under the research background environment was explored through solution set spatial optimization. Experimental results show that this method is feasible and effective enough to assist designers in scheme design and decision-making, and could provide further optimization methods and strategies for urban architectural layout. Analysis of experimental data shows that building layout has a significant effect on the improvement of outdoor thermal comfort in winter among optimization schemes proposed in this paper.

**Key words:** urban residential area; outdoor thermal comfort; automatic layout; multi-objective optimization (MOO); genetic algorithm (GA)

在 ASHRAE Standard 55—2020 中, 热舒适被定义为对热环境表示满意意识状态<sup>[1]</sup>. 众多关于热舒适的研究成果都是针对室内条件提出的,

相较于室内, 室外热舒适的研究和应用起步较晚<sup>[2]</sup>. 但随着生活水平和健康意识的不断提升, 人们对舒适室外环境的需求日益增长, 尤其是人们

收稿日期: 2021-01-25 修改稿日期: 2022-01-09

基金项目: 西安市建设科技计划项目(SZJJ2019-17)

第一作者: 刘启波(1970—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为建筑设计理论与方法、人居环境与绿色建筑. E-mail: 2311346290@qq.com

通信作者: 杨雯婷(1995—), 女, 硕士生, 主要研究方向为建筑设计理论与方法、人居环境与绿色建筑. E-mail: 598289795@qq.com

活动发生较为频繁的居住区,其室外环境热舒适的重要性不言而喻。良好的住区室外热环境不仅可以使人感到愉悦,还可以促进室外活动的发生,减少室内活动时间,从而达到节能的目的<sup>[3]</sup>。因此,居住区的室外热舒适度逐渐受到了广大学者的关注。

合理的建筑布局形式能够提高居住区室外热环境的舒适度。近年来,已有较多学者从建筑布局及形态等方面对居住区微环境及热舒适进行探讨优化分析。大多数研究通过实测<sup>[4-5]</sup>或 ENVI-met<sup>[6]</sup>、Fluent、Phoenix 等建筑模拟软件进行室外热环境模拟及实验结果分析,进而得出布局优化结论。然而随着计算机模拟辅助设计领域的发展,越来越多的研究方法开始选用遗传算法开展自动优化布局。该方法通过融合计算机建模、参数化设计、性能模拟与优化算法,自动生成较优设计方案供设计者挑选使用,避免传统优化方法反复调整设计方案且模拟次数过多的不足,提高了优化设计的效率。

西安地区地处寒冷地区,四季分明,夏季炎热多雨,冬季寒冷多雾,春秋时有连阴雨天气出现。根据《陕西省旅游气候舒适度评价》研究显示,陕西关中各地区舒适期多分布在4、5、6、9和10月,较不舒适和不舒适的主要月份在1、2、3、7、8、11、12月份,其中1月和12月最冷,7月、8月最热,其全年不舒适期较其他地区更长<sup>[7]</sup>。为同时改善西安地区城市住区冬季与夏季的室外热舒适并探究建筑布局与其关系,本研究应用参数建模、可视化模拟及优化算法进行多目标自动优化布局实验,期望为住区前期布局设计提供方法思路。

## 1 应用于热环境研究的多目标优化研究方法

### 1.1 国内外研究综述

基于环境特征的多目标优化研究多集中于建筑单体或局部<sup>[8-10]</sup>,针对建筑群体的布局性能优化研究较少<sup>[11]</sup>。在住宅布局优化方面,Yi Y K<sup>[12]</sup>在设计前期阶段通过遗传算法优化高层住宅的布局;Bajnsanski I V 等<sup>[13]</sup>使用 Grasshopper 通过自动算法对极端温度日城市地区室外热舒适性的评估和改进。国内也有相关优化实例。刘宇鹏等<sup>[14]</sup>使用 Grasshopper 中的单目标优化插件 Galapagos,探讨基于寒冷地区冬季室外热舒适的建筑自动优化布局的方法;殷晨欢<sup>[15]</sup>通过同一算法对干热地区夏季室外热舒适进行模拟从而优化该区建筑布局;

袁磊等<sup>[11]</sup>采用 Octopus 插件设计了一套完整的基于多性能目标模拟的住宅布局优化系统等。

梳理众多已有研究,可以发现:(1)纵观建筑优化设计的发展,智能参数化设计与优化算法已逐渐成为建筑学经常使用的优化方法,尤其是以 Grasshopper 为主的综合平台;(2)在建筑布局优化方面,单目标优化的研究较多,近年来也逐渐向多目标化的趋势发展;(3)对冬夏季节或极端温度日的室外热舒适布局优化研究较多,缺少基于某地气候特征的室外热舒适布局优化研究。

基于上述已有研究,本研究针对西安地区冬季寒冷,夏季炎热,室外不舒适期长的气候特征,以西安市某地块居住区设计为例,使用 GH 平台的多目标优化插件 Octopus 为驱动,以地块内夏季与冬季室外热舒适为目标进行自动优化布局。通过对多个解进行对比得到较优解,即符合西安地区气候环境条件的较优室外热舒适建筑布局方案,并以此为依据,分析整理出较优的西安市住区的布局模式。模拟分析实验基于建筑设计初期阶段,为加快设计流程,实验对建筑单体进行简化处理。

### 1.2 居住区规划概况

本研究采用西安市某居住区前期布局设计作为实验样例,该住区位于西安市西咸新区丝路经济带能源金融贸易区,属暖温带半湿润大陆性季风气候,平均气温 13.1~13.4℃。年极端最高气温 35~41.8℃,极端最低-16~-20℃。全年以7月最热,月平均气温 26.1~26.3℃,月平均最高气温 32℃左右;1月最冷,月平均气温-0.3~-1.3℃,月平均最低气温-4℃左右,年较差达 26~27℃(图1)。

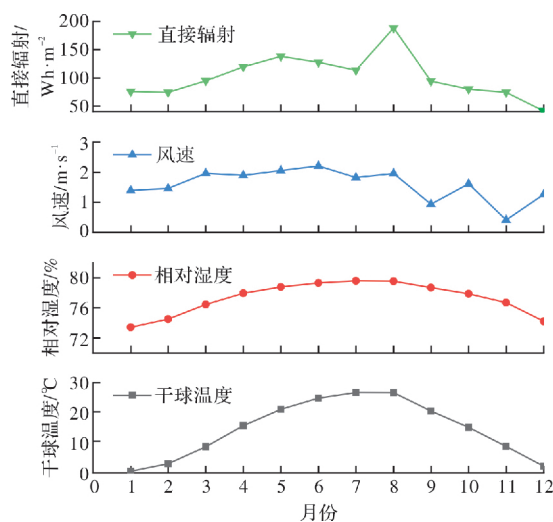


图1 西安月平均气象资料

Fig. 1 Monthly average meteorological data in Xi'an

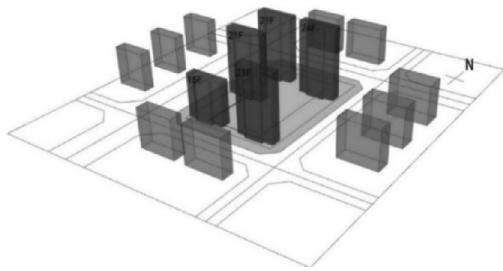


图2 西安市某住区初始方案

Fig. 2 Original design plan of a residential area in Xi'an

## 2 模拟及分析

### 2.1 本研究实验设计

目前常用的室外热舒适模型有通用热气候指数 UTCI、生理等效温度 PET 以及室外标准有效温度 OUT\_SET, 这些评价指标的理论基础与影响因素对比分析如表 1 所示<sup>[3]</sup>。从表中对比可以得出, 相较于其他热舒适模型, UTCI 作为多学科融

合的模型明显更加完善。此外, 众多学者也在成熟模型基础上提出优化, 如钱炜<sup>[16]</sup>在 PMV 基础上建立的城市户外热舒适度的综合评价模型。为保证实验的普遍性及易施性, 本研究结合 Grasshopper 中的 Ladybug 插件, 采用通用热气候指标 UTCI 作为居住区热舒适评价指标, 以地块内冬夏两季室外热舒适为优化目标设计实验。

图 3 为本实验的程序流程框架图。实验首先通过已确定的建筑单体长宽与高度简化建筑模型, 并结合基地信息录入 Grasshopper。同时, 实验录入西安市气候数据作为性能模拟依据, 该数据来自 Ladybug 全球气候数据库。实验根据设计经验生成基地网格, 参数变量为建筑单体的相对位置, 分别为单体的横纵坐标值及旋转角度。其中旋转角度的取值范围为 $-15^{\circ}\sim 15^{\circ}$ , 正南为 $0^{\circ}$ , 南偏西为负值, 取 $5^{\circ}$ 作为该基因皿参数调整粒度, 且各单体的坐标以 10 m 为粒度。

表 1 OUT\_SET、PET、UTCI 理论基础与影响因素对比分析<sup>[3]</sup>

Tab. 1 Comparative analysis of theoretical basis and influencing factors

热舒适模型	理论基础	提出年份	影响因素								
			空气温度	相对湿度	风速	平均辐射温度	平均皮肤温度	皮肤湿润度	核心温度	服装热阻	人体代谢率
OUT_SET	二节点模型、室外平均辐射温度模型	2000	+	+	+	+	+	+	-	+	+
PET	热平衡方程、二节点模型、慕尼黑人体热量平衡模型	1987	+	+	+	+	+	-	+	+	+
UTCI	Fiala 人体体温调节数学模型(340 节点)、服装模型	2002	+	+	+	+	+	+	+	+	+

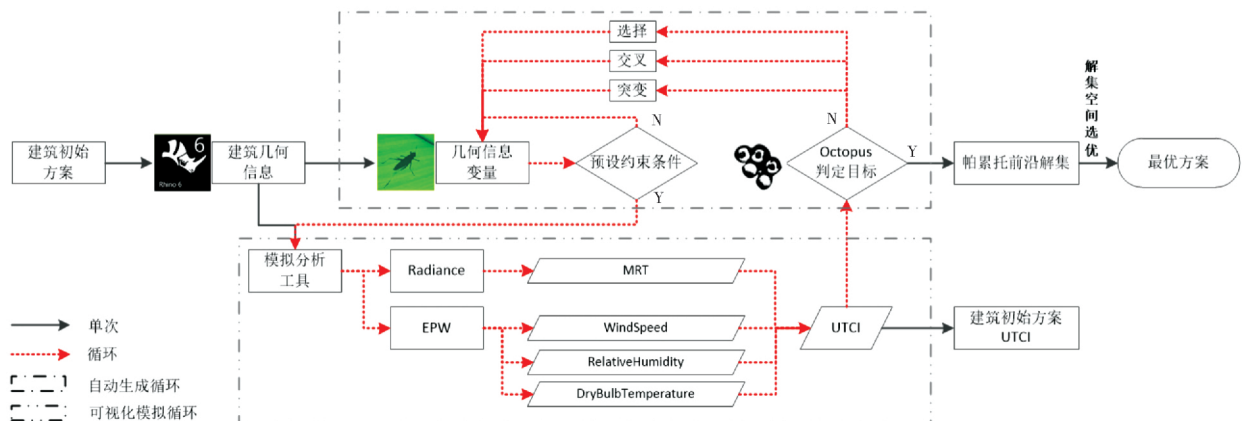


图3 基于参数化平台的实验框架

Fig. 3 Experimental framework based on parametric platform

方案初期, 建筑布局中需要设置的主要约束条件包含日照间距、防火间距、退线要求以及住宅间最小间距等(表 2)。除此之外, 实验也可根据实际项目及地块要求增加约束条件。本研究对约

束流程进行了算法结构优化, 通过串行化计算流程减少大量冗余计算, 极大缩短计算时间, 并对所有满足约束条件的方案进行夏季和冬季的 UTCI 平均值的模拟计算。模拟过程中 UTCI\_sum 的实

验日期选定为典型夏季日 7 月 22 日,  $UTCI\_win$  的实验日期选定为典型冬季日 1 月 1 日, 模拟时间段为 8:00~16:00。此外, 设定场地中的人为静坐类的行动状态, 地面反射率与服装吸收率等选用 ladybug 推荐的默认值。通过 Octopus 优化算法, 实验可得满足设定条件的解集。

表 2 预设约束条件  
Tab. 2 Pre-defined constraints

序号	约束名称	约束条件	单位	补充说明
1	防火要求	高层主体与高层主体应保持 13 m 以上的防火间距要求	m	《建筑设计防火规范》
2	日照要求	计算起点为底层窗台面(距室内地坪 0.9 m 高的外墙位置), 在日照标准日的有效日照时间带内的日照时数 $\geq 2$ h	h	《城市居住区规划设计规范》
3	退线要求	当建筑高度大于 50 m 时, 退城市道路规划红线最小距离为 15 m	m	《陕西省城市规划管理技术规定》
4	住宅间最小间距	高层住宅建筑与高层住宅建筑平行布置时, 遮挡建筑与被遮挡建筑之间的最小间距为 30 m(“被遮挡”是指平行或垂直布置时, 该住宅建筑位于其他建筑的北侧, 其为被遮挡建筑)	m	《陕西省城市规划管理技术规定》

2.2 本研究参数设定

在 Octopus 插件所构建的电池组中, 参数变量作为自变量连接电池 G 端,  $UTCI\_sum$  与  $UTCI\_win$  作为优化目标连接电池 O 端。与 Galapagos 不同, Octopus 默认计算结果趋近于坐标原点的方案为较优解, 即默认找到每个目标的最小值。因此, 实验在目标值设定中, 令  $UTCI\_win$  为负值, 从而将  $UTCI$  计算最大值求解问题转换为最小值求解<sup>[17]</sup>。随后, 实验对 Octopus 相关参数进行设定, 具体设置如表 3 所示。

表 3 Octopus 相关参数设置表  
Tab. 3 Parameters settings

参数名称	参数
变量参数	各单体横纵坐标值及旋转角度
测试网格	10 m $\times$ 10 m
优化目标	$UTCI\_win$ 最大且 $UTCI\_sum$ 最小
Elitism/精英比率	0.5
Mut. probability/基因突变可能性	0.2
Mutation Rate/基因突变的程度	0.9
Crossover Rate/价差概率	0.8
Population Size/种群大小	30
Max. Generations/终止运算的代数	20
Convergence Mechanism/收敛机制	SPEA-2 Reduction
Variation Mechanism/变异机制	Polynomial Mutate

2.3 分析

在实验中, 模拟过程经过 20 次迭代后, 种群

状态趋于稳定。结果如图 4 所示, 坐标系中三角形表示最近一代的精英解。

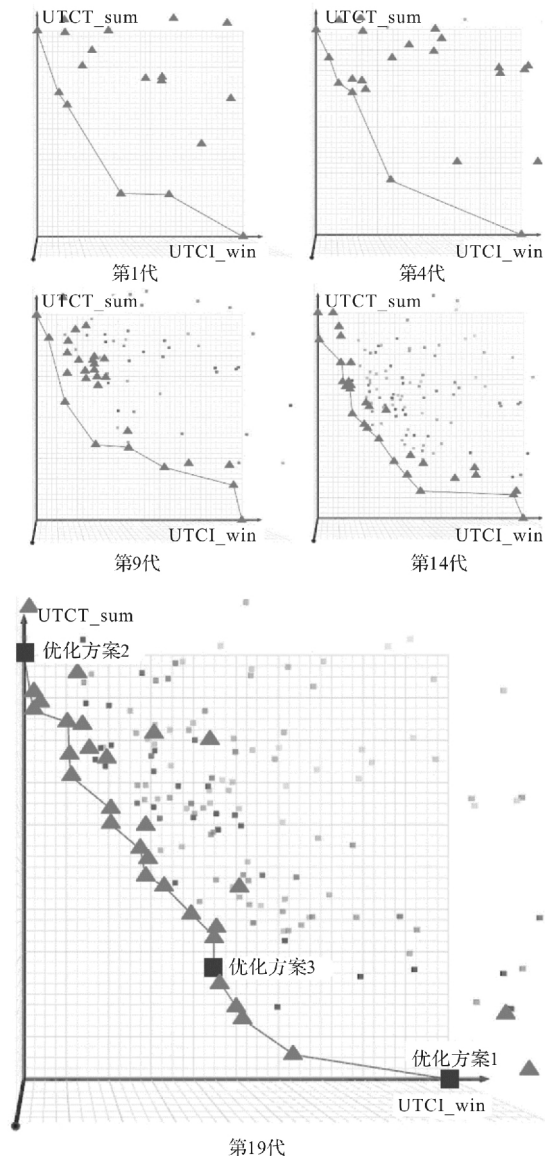


图 4 Octopus 运算结果  
Fig. 4 Operation results

正方形为历史运算中的精英解，正方形的颜色越深代表距最后一次迭代计算越近。靠近坐标原点的最近一代的精英解所构成的折线为帕累托前沿解集，可以看出，随着迭代次数的增加，方案的解逐渐向帕累托前沿收敛(图 4)。通过数据对比及分析，我们可以得到以下结论：西安市某住区冬季及夏季 UTCI 均值在本次优化过程中不完全满足线性关系，在一定程度上服从于类似指数函数的曲线，符合实验预期。

### 3 结果及讨论

帕累托解是较优解的集合，因此设计者可根据实际需求从中选择满足需要的最优解。由于上

文提及 Octopus 默认求解方程的最小值为最优解，参考欧几里得度量原理，本研究选择第 20 代帕累托前沿解集中的三个解作为最终优化方案进行分析比对(图 4 及表 4、5)：

- (1)夏季 UTCI 值最低即最佳夏季室外热舒适值；
- (2)冬季 UTCI 值最低即最佳冬季室外热舒适值；
- (3)冬夏 UTCI 较优值。

冬夏 UTCI 较优值被定义为在图 4 所示的二维空间中，与冬夏 UTCI 理想解的距离最近解的值，其中冬夏 UTCI 理想解的值  $Q$  可被公式描述如下：

$$Q_{UTCI} = [\min(f_{UTCI\_win})\min(f_{UTCI\_sum})] \quad (1)$$

故解  $x$  所构成的冬夏 UTCI 较优值  $P$  可被公式描述如下：

$$P_{UTCI} = \sqrt{[f_{UTCI\_win}(x) - \min(f_{UTCI\_win})]^2 + [f_{UTCI\_sum}(x) - \min(f_{UTCI\_sum})]^2} \quad (2)$$


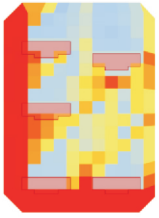



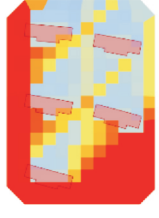
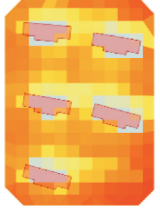





表 4 优化方案

Tab. 4 Optimization scheme

序号	描述	UTCI_win 平均值/℃	UTCI_sum 平均值/℃
初始方案	原始方案	1.08	32.86
优化方案 1	夏季 UTCI 值最低即最佳夏季室外热舒适值	1.58 (较初始方案 +0.50)	32.63 (较初始方案 -0.23)
优化方案 2	冬季 UTCI 值最低即最佳冬季室外热舒适值	2.31 (较初始方案 +1.23)	32.81 (较初始方案 -0.05)
优化方案 3	冬夏 UTCI 较优值即距理想点最近的解	1.99 (较初始方案 +0.91)	32.68 (较初始方案 -0.18)

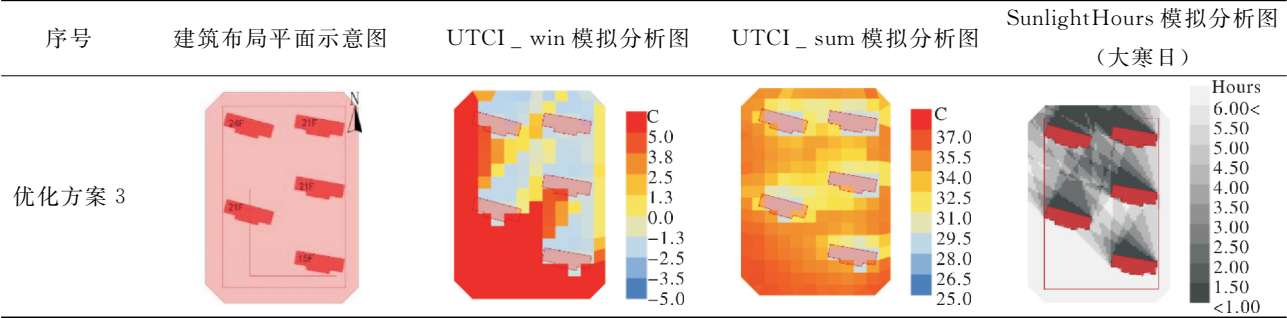
表 5 优化方案

Tab. 5 Optimization scheme

序号	建筑布局平面示意图	UTCI_win 模拟分析图	UTCI_sum 模拟分析图	SunlightHours 模拟分析图 (大寒日)
初始方案				
优化方案 1				
优化方案 2				



续表 5



相较于初始方案,第 20 代优化方案的建筑基本均为南偏西朝向,同时,从优化数据中可以得出建筑布局在冬季对住区的热舒适改善作用更显著这一结论。夏季是一年中太阳高度角最大的季节,建筑基本暴露于日照中,因此,建筑布局在间距及角度的改变对夏季日照仅产生轻微影响,而冬季时则恰好相反<sup>[18]</sup>。

优化方案 1 在满足约束条件的前提下,将低层建筑单体置于基地东北处,高层建筑则置于南侧,使更多的室外空间处于建筑阴影中。同时,主导风向侧较为疏散地布置建筑单体可以创造更多夏季舒适区。优化方案 2 采用“南低北高”的建筑布局,并在场地南侧让出更多无建筑遮挡的室外空间,且冬季主导风向侧较为密集地布置建筑单体,该设计可以在抵挡冬季主导风的同时利用太阳辐射创造更优的冬季室外舒适区。优化方案 3 以方案 2 为基础扩大建筑间距、微调建筑朝向,减少了南向无遮挡区域面积,增大了建筑阴影区域面积,在满足场地冬季热舒适要求的同时,兼顾了夏季防晒需求。

西安市位于Ⅱ A 建筑气候区,按照《建筑气候区划分标准 GB50178-93》要求,该区域建筑应首要满足冬季日照及防寒保温要求,一定程度上兼顾夏季通风防晒需求。故综合模拟优化得出的方案与西安市气候特点,认定优化方案 3 为较优解。

最终,结合冬夏两季的模拟分析图及上述分析,设计者在后期住区布局设计时,应当将居民冬季室外活动区域放置于 UTCI<sub>win</sub> 值高的位置,即优化方案 3 的西南角处,将居民夏季室外活动区域结合水景与植物的配置放置于建筑阴影中,以期居民创造更好的住区室外活动空间。

4 结论

(1)冬季及夏季 UTCI 均值随迭代次数的增加逐渐收敛,所生成的帕累托前沿及 UTCI 数值变化曲线符合实验预期,进而证明参数化设计与多目

标优化算法可应用于设计前期阶段,可为最终的方案决策提供强有力的支持。

(2)该方法可应用于住区前期建筑布局方案的生成,辅助设计者快速选择合理的建筑布局以充分利用自然气候对建筑产生的正面影响,并为活动场地的布置提供可靠数值依据。除此之外,此方法简化了不断调整建筑布局与模拟的过程,提高效率的同时避免了因设计者主观原因造成的备选方案缺失。

(3)结合建筑优化布局领域诸多研究成果,本实验方法可得出以下结论:在西安地区,相较于夏季,建筑布局优化在冬季对住区的室外热舒适改善作用更显著;在具体布局时宜采用“南低北高,上风向密,下风向疏”的布局原则;而在场地的布置方面,宜预留南向且无建筑遮挡的区域为冬季室外活动区或幼儿及老人的活动场所,夏季室外活动区宜结合植物水景布置在建筑阴影区。

在实验中,仅通过优化单体建筑的坐标位置与旋转角度得到室外热舒适的改善高达 1.23℃,但实验过程中,为缩短模拟优化时间,简化实验步骤,本研究未在实验模拟过程中采用实时模拟风环境,这一设计可能对最终热舒适的结果产生一定影响。此外,优化对象为设计前期阶段建筑布局,未考虑个体人的年龄与体质要素、景观要素与下垫面材质等因子对室外热舒适的影响。下垫面不同会产生差异较明显的微气候<sup>[19]</sup>,因此,在后续的研究中将在西安市室外热舒适模拟优化中加入以上影响因素,进一步改进和完善实验设计。

参考文献 References

[1] ASHRAE. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy; ASHRAE Standard 55-2020[S]. ASHRAE Standards Committee, 2020.

[2] 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.
- [3] 冯锡文,何春霞,方赵嵩,等. 室外热舒适的研究现状[J]. 建筑科学, 2017,33(12): 152-158.
- FENG Xiwen, HE Chunxia, FANG Zhaosong, et al. Present research on outdoor thermal comfort [J]. Building Science, 2017,33(12): 152-158.
- [4] 刘哲铭,赵旭东,金虹. 哈尔滨市滨江居住小区冬季热环境实测分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017,49(10): 170-177.
- LIU Zheming, ZHAO Xudong, JIN Hong. Thermal environment of riverside residential areas at Harbin in winter[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017,49(10): 170-177.
- [5] 李坤明,张华伟,赵立华,等. 湿热地区住区不同季节室外热舒适特点研究[J]. 建筑科学, 2019,35(6): 22-29,162.
- LI Kunming, ZHANG Huawei, ZHAO Lihua, et al. Study on the outdoor thermal comfort of residential areas of hot and humid areas in different seasons [J]. Building Science, 2019,35(6): 22-29,162.
- [6] 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, 2016,44(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, 2016,44(3): 57-63.
- [7] 马丽君,孙根年,李馥丽,等. 陕西省旅游气候舒适度评价[J]. 资源科学, 2007(6): 40-44.
- MA Lijun, SUN Gennian, LI Fuli, et al. Evaluation of tourism climate comfortableness in Shaanxi province [J]. Resources Science, 2007(6): 40-44.
- [8] BAKMOHAMMADI P, NOORZAI E. Optimization of the design of the primary school classrooms in terms of energy and daylight performance considering occupants' thermal and visual comfort [J]. Energy Reports, 2020,6: 1590-1607.
- [9] ZHANG A, BOKEL R, DOBBELSTEEN A V D, et al. Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China[J]. Energy and Buildings, 2017,139: 371-384.
- [10] ZHAO S. Searching for office buildings' fenestration geometries with a Bi-phase optimization framework [J]. Science and Technology for the Built Environment, 2020,26(9): 1337-1349.
- [11] 袁磊,李冰瑶. 住区布局多目标自动寻优的模拟方法[J]. 深圳大学学报(理工版), 2018,35(1): 78-84.
- YUAN Lei, LI Bingyu. A multi-objective auto-optimizing simulation method of residential layout design[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2018,35(1): 78-84.
- [12] YI Y K, KIM H. Agent-based geometry optimization with Genetic Algorithm (GA) for tall apartment's solar right [J]. Solar Energy, 2015, 113 (mar.): 236-250.
- [13] BAJANSANSKI I V, MILOSEVIC D D, SAVIC S M. Evaluation and improvement of outdoor thermal comfort in urban areas on extreme temperature days: Applications of automatic algorithms[J]. Building & Environment, 2015, 94(DEC. PT. 2): 632-643.
- [14] 刘宇鹏,虞刚,徐小东. 基于遗传算法的形态与微气候环境性能自动优化方法[J]. 中外建筑, 2018(6): 71-74.
- LIU Yupeng, YU Gang, XU Xiaodong. The automatic optimizing method of morphological and microclimatic environmental performance based on genetic algorithm[J]. Chinese & Overseas Architecture, 2018(6): 71-74.
- [15] 殷晨欢. 干热地区基于热舒适需求的街区空间布局与自动寻优初探[D]. 南京:东南大学, 2018.
- YIN Chenhuan. A preliminary study on the spatial layout and automatic optimization of street zones in dry and hot regions based on heat comfort demand[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [16] 钱炜,唐鸣放. 城市户外环境热舒适度评价模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2001,33(3): 229-232.
- QIAN Wei, TANG Mingfang. Modeling of evaluation metropolitan outdoor thermal comfortable degree[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2001(3): 229-23.
- [17] YUAN F, CHO S. Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance[J]. Solar Energy, 2019,191: 7-18.
- [18] 袁永东. 不同建筑布局对室外热环境的影响及节能效果分析[D]. 上海:东华大学, 2011.
- YUAN Yongdong. Effects of building layout structures on the thermal environment near buildings and analysis of building energy saving[D]. Shanghai: Donghua University, 2011.
- [19] 刘大龙,马岚,刘加平. 城市下垫面对夏季微气候影响的测试研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020,52(1): 107-112.
- LIU Dalong, MA Lan, LIU Jiaping. Test on the impact of urban underground on summer microclimate[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2020,52(1): 107-112.