

# 基于 ENVI-MET 的湿热气候中小学院活动场地改造设计研究 ——以深圳市福田区翰林学校为例

朱星洁<sup>1</sup>, 虞刚<sup>2</sup>, 毛雨霁<sup>3</sup>, 林晓钰<sup>4</sup>

**摘要:** 本研究针对湿热气候条件下中小学院空间的热环境问题, 探讨了优化改造策略对室外热舒适度的影响。以深圳市福田区翰林学校为案例, 采用 ENVI-met 数字模拟工具, 基于地域化修正的 UTCI 压力类别, 对其合院空间进行了模拟分析。研究发现, 增加遮阳设施、更换围合界面的立面材质及地面植被和铺装材料是提高合院空间热舒适性的有效手段。遮阳设施的覆盖面积对热环境改善最为显著, 立面材质的选择对环境性能亦有显著影响。本文提出的改造策略不仅能有效降低合院空间的热负荷, 且为类似气候区的中小学户外活动空间提供了设计依据和实践参考。

**关键词:** 湿热气候; 中小学院; 合院改造; 环境性能模拟

**Keywords:** Hot and humid climate; Primary and secondary schools; Courtyard renovation;

Environmental performance simulation

**资助项目情况:** 国家自然科学基金青年项目(批准号:52208018); 广东省基础与应用基础研究基金(批准号:2023A1515011351); 哈尔滨工业大学深圳校区思政课程和课程思政专项课题(批准号:HITSZIP22014)

## 引言

全球气候变化加剧了城市热岛效应, 导致湿热地区城市中极端高温事件的发生率显著增。中小学院园教学楼之间的合院空间, 是青少年在校生活的主要课间活动场所。受到湿热气候的影响, 学生在室外活动中易受到出现疲劳、呼吸急促和心率加快等症状, 极端情况下可能引发热痉挛、热衰竭和中暑等严重健康危害 [1-2]。因此, 合院空间的热环境舒适性是影响学生健康活动的主要因素。在新建中小学院园中, 设计者已逐渐重视合院活动空间的空间营造, 致力于通过适当的设计方法提升热环境舒适 [3]。但是, 对于大量建设于上世纪八九十年代建造的中小学院园, 其合院空间形态及结构已基本确定, 如何通过适宜的改造策略提升合院活动空间的热环境, 创造适合学生活动的户外空间仍有待进一步研究。

数字模拟技术的发展为中小学院园合院空间热环境的改造设计提供了技术支持。设计者通过对建成环境进行建模及物理环境的模拟分析, 辅助判断改造手法与热环境改善性能之间的关系, 并对设计方案进行调整优化。Grasshopper 及其中的 Ladybug 组件将建筑组团布局与物理环境模拟进行联动,

<sup>1</sup> 朱星洁, 哈尔滨工业大学(深圳), 建筑学院研究生

<sup>2</sup> 虞刚, 哈尔滨工业大学(深圳), 教授

<sup>3</sup> 毛雨霁, 哈尔滨工业大学(深圳), 建筑学院研究生

<sup>4</sup> 林晓钰(✉), 哈尔滨工业大学(深圳), 副教授, linxiaoyu@hit.edu.cn

比较不同方案的物理环境模拟结果，并进行设计优化，得出更具气候适应性的建筑布局。ENVI-met 工具对于小范围的室外微气候环境模拟精确性较高，通过物理环境模拟及热舒适度评价，可进一步提出室外空间的优化设计策略。

基于研究范围及研究对象的特征，本研究选取 ENVI-met 作为数字模拟工具，以学生户外活动的热舒适性提升为主要目标，以深圳市福田区翰林学校合院空间为主要研究对象，运用环境性能模拟方法探索合院空间改造策略与室外热环境之间的影响关系，并基于模拟结果提出适应湿热气候的校园合院改造设计策略，旨在为类似气候区的中小学户外活动空间改造提供设计依据。

## 1 研究方案概述

### 1.1 基本设计条件

翰林学校位于深圳市福田区梅东三路 4 号，是福田区政府于 2005 年 9 月开办的一所九年一贯制公办学校，占地面积 30100 平方米。校园由体育馆、教学楼、食堂等建筑组成，形成一个紧密联系的合院式布局。校内主要的合院位于一座五层高的回字型公共教学楼内，合院长 44 米、宽 22 米，开口朝向西偏南 15 度，建筑首层的西侧平面设有一个开放式的架空连廊。从合院的使用现状来看，其热环境容易受到外界的影响，其物理环境性能和使用效率较低，有待提升改造（图 1）。



图 1 翰林学校基本信息（图片来源：作者自绘）

### 1.1 优化目标与技术路线

本研究以湿热地区校园合院微气候环境为研究对象，考虑到湿热地区夏季的高温和高湿与中小学生对气温变化的高敏感性，将热舒适度确定为关键的环境性能优化目标，并将其转化为可量化的评价参数。研究过程采用以下方法：使用 ENVI-met 热环境模拟软件进行几何建模、环境热舒适模拟及优化方案的比较选择。具体研究步骤如下：① 热舒适度评价指标选用；② ENVI-met 模型建立；③ 模拟条件设定；④翰林学校合院空间形态与热舒适的关联机制及其优化策略；⑤ 翰林学校合院热舒适度优化设计与优化结果；

## 2 研究步骤与方法

### 2.1 热舒适度评价指标选用

热舒适度常见评价指标包括预测平均投票（PMV）、室外标准有效温度（SET\*）、生理等效温度（PET）和通用热气候指数（UTCI）等 [4]。UTCI 被定义为参考环境的等效环境温度（°C），通过结合受访者的生理和服装模型以及气象因素（气温  $T_a$ 、相对湿度 RH、风速 WS 和平均辐射温度  $T_{mrt}$ ）来评估环境的热效应。它是一个动态的多节点模型，不受室外停留时间长短和受热历程的限制，并且对外界环境的轻微变化也能进行有效评价 [5]。随着研究的深入，发现不同地

区的气候、季节变化、场地环境、年龄、生理适应以及心理反应等因素，都会影响人体对热环境的感知，进而影响人体的舒适程度。因此，修正后的热舒适水平和范围对于合院设计具有重要意义，它能够引导合院户外热舒适度的优化。本研究采用修正后的 UTCI 热舒适度量表，针对湿热地区的小学校园室外热舒适感受，作为室外热舒适度的优化与评价指标（表 1） [6]。

表 1 UTCI 湿热地区中小學生评价量表（图片来源： [6] ）

(UTCI) (°C)	热感觉	生理应激等级
18.70–28.93 °C	舒适	无热应激
28.93–39.16 °C	温暖	轻热应激
39.16–49.40 °C	热	中等热应激
>49.40 °C	极热	强热应激

## 2.2 ENVI-met 模型建立

ENVI-met 是由德国波鸿大学地理研究所的 Bruse 等通过研究建筑外表面、植被和空气之间的热应力关系开发的用于城市微气候模拟软件，本文使用的版本为 ENVI-met 5.6.2，该软件能够模拟建筑周围及建筑间的气流运动、地表和墙体的热交换过程、植被对微气候的影响，其稳定性和精确度较高，近年来已被多个机构和个人用于研究城市微气候环境的特征 [8-9]。翰林学校的场地尺寸为 200 米×100 米，最高建筑物高度为 20 米。为确保模型更贴近实际情况并提高模拟的准确性，将边界尺寸调整为 230 米×140 米×40 米，确保模型不会紧贴边界。模型共设置了 115×70×20 个网格，分辨率为 2 米。根据现状，合院内立面材质设定为黄色釉面瓷砖，下垫面材质设定为混凝土，核心研究区域为中心矩形合院（图 2）。

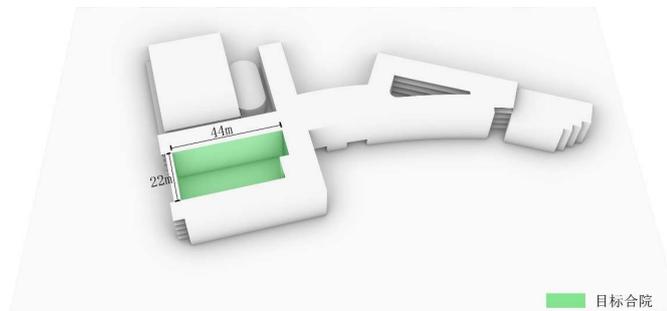


图 2 核心研究区域（图片来源：作者自绘）

## 2.3 模拟条件设定

研究显示，深圳市的过渡季和冬季气候适宜室外活动，但夏季室外热舒适度较低 [10]。鉴于本研究关注中小学校，且 7 月至 8 月为暑假期间师生较少，故选 6 月进行测试，具体日期选定为夏至日，以确保数据的代表性。模拟现状并分析夏至日逐时室外热舒适度显示（图 3），12:00 至 16:00 间合院的平均通用热气候指数（UTCI）显著升高，且达到中等热不适的区域百分比显著增高。这说明合院区域在此时间段内的热环境极为恶劣，迫切需要采取措施进行改善。根据深圳中小学校的课表显示，在热舒适度最差的 14:00 至 15:00 时间段内，学校通常会安排大课间休息，使得这一时间成为合院空间的主要使用时段，因此改善这一时段的合院热舒适度对学生的活动质量和体验尤为关键。

本研究计划在中小學生的主要活动时间段，即 14:00 至 15:00，进行室外环境模拟。以合院单位时间（1h）的平均 UTCI 及平均达到中等热应激的面积百分比，来比较不同的合院形态对室外热舒适的

影响，设定人体衣着量(短袖长裤状态)为 0.5 clo，热舒适度计算的人体模型选用的是儿童，计算时的高度被设定为 1.5 米，以更贴近中小学生的实际情况。

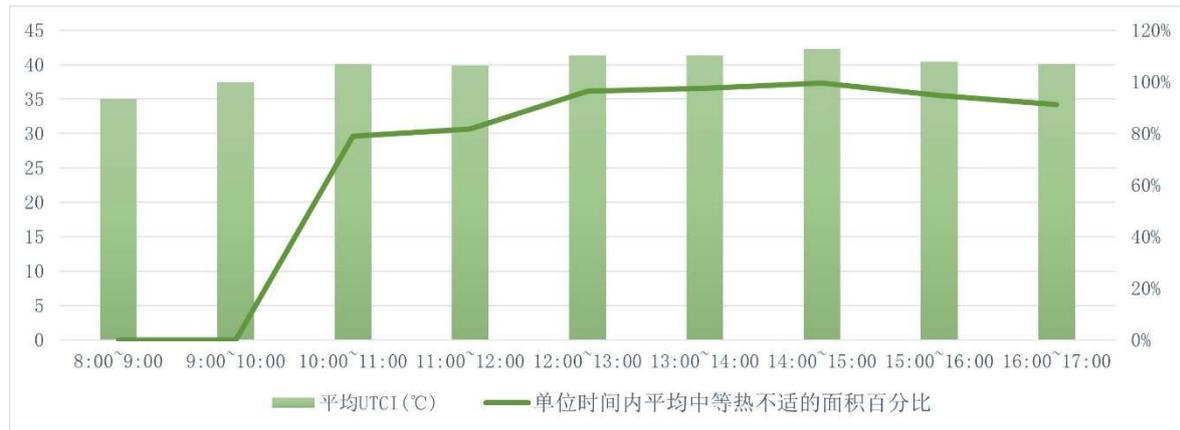


图 3 翰林学校合院空间热舒适度现状 (图片来源: 作者自绘)

## 2.4 翰林学校合院空间改造策略与热舒适度关联机制研究

已有研究证明，合院的热适应策略效率在很大程度上取决于合院环境的物理条件的优化与改善 [11]。通过调研目前合院改造现状，结合改造工期及改造预算考虑，目前中小校园合院空间改造主要方法包括 (1) 增加遮阳设施；(2) 更换围合界面的立面材质；(3) 地面植被及铺装更换等三类。本文将对以上三类策略选取适宜参数进行设计优化模拟。

### 2.4.1 遮阳设施面积

遮阳设施可以减少太阳辐射，其遮阳面积是影响室外热舒适度的重要因素。PC (聚碳酸酯) 材质因其耐用性、透光性和较轻的重量而被广泛用于遮阳设施。通过修改遮阳雨棚的宽度，探讨最高的性价比，模拟结果显示 (表 2) (表 3)，在 15 时，当遮阳设施面积达到 480 m<sup>2</sup> (占庭院面积的二分之一) 时，庭院的热环境条件最佳，平均 UTCI 为 39.58°C。然而，图 4 显示，当遮阳面积为 160 m<sup>2</sup> (占庭院面积的四分之一) 时，热舒适度提升最为显著，且综合造价最低，性价比最高。

表 2 15 时不同遮阳设施面积的合院空间 UTCI 色阶分布 (图片来源: 作者自绘)

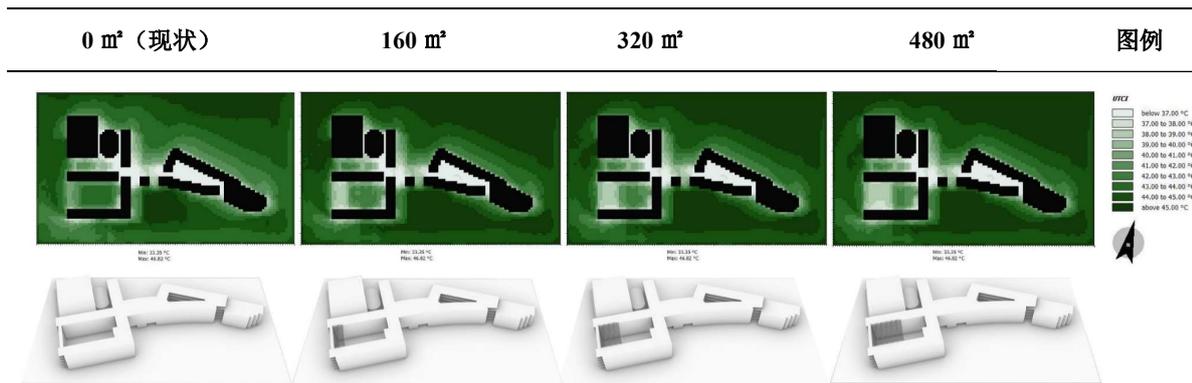


表 3 15 时遮阳设施面积的合院空间室外热舒适 (图片来源: 作者自绘)

遮阳雨棚面积 (m <sup>2</sup> )	平均 (UTCI) (°C)	单位时间平均中等热不适的面积百分比
0 (现状)	42.31	99.59%
160	41.19	77.69%
320	40.42	64.47%

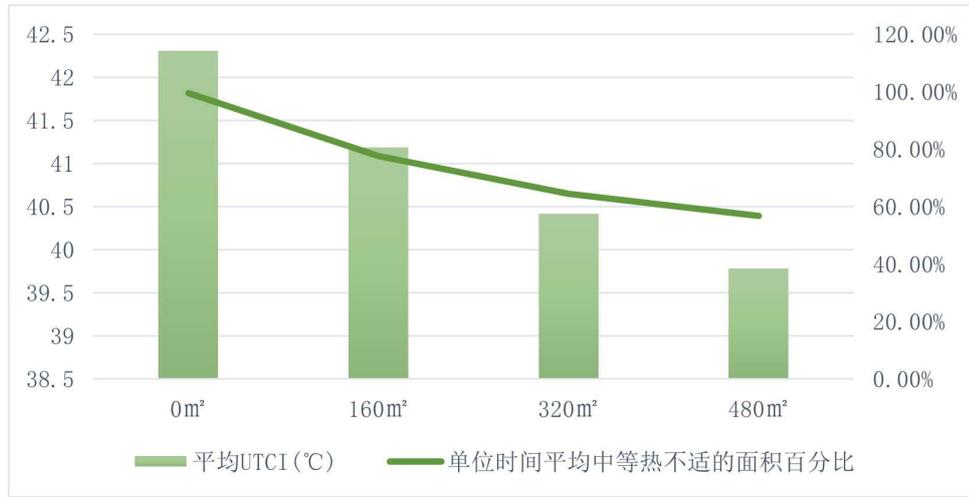


图 4 合院遮阳面积与热舒适变化表 (图片来源: 作者自绘)

#### 2.4.2 下垫面材质类型

由于下垫面材质的热属性对表面温度、空气温度和平均辐射温度产生显著影响, 合院下垫面的组成特征及其比例对合院空间的热环境具有重要作用。模拟结果显示 (表 4) (表 5), 在 15 时, 草地、透水砖与花岗岩均能提升合院的热舒适度。在选择合院下垫面材质时, 应综合考虑环境条件、使用需求、维护成本以及长期热舒适性。花岗岩以其耐用性、低维护成本和良好的热舒适性为优势, 但初期投资较高; 在预算有限的情况下, 透水砖铺设提供了更高的性价比。此外, 将透水砖或花岗岩与绿植和娱乐设施相结合, 可形成具有复合功能的主题合院, 满足学生的多样化需求 (图 5)。

表 4 15 时不同下垫面材质类型的合院空间 UTCI 色阶分别 (图片来源: 作者自绘)

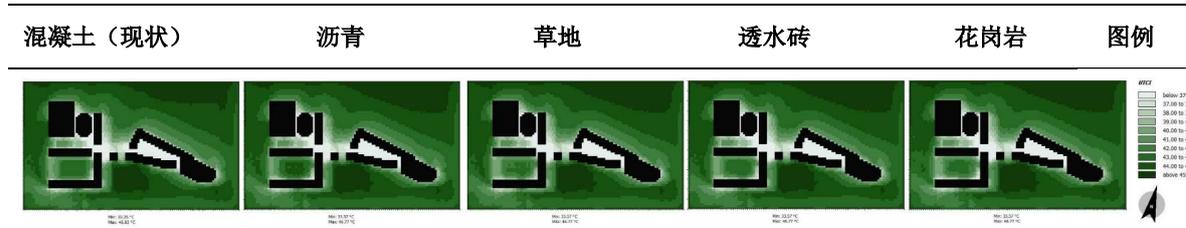


表 5 15 时不同下垫面材质类型的合院空间室外热舒适 (图片来源: 作者自绘)

下垫面材质类型	平均 (UTCI) (°C)	单位时间平均中等热不适的面积百分比
混凝土(现状)	42.31	99.59%
沥青	42.66	99.18%
草地	41.89	97.33%
透水砖	41.35	97.98%
花岗岩	41.35	97.91%

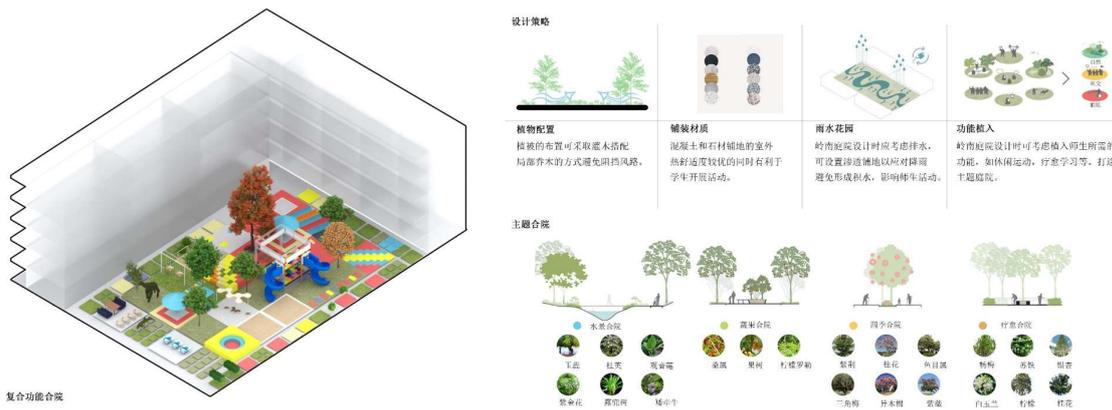


图 5 复合功能合院（图片来源：作者自绘）

### 2.4.3 围护界面材质类型

合院围合界面的立面材质的热属性（如反射率、热辐射率和热容率）对合院空间的热环境也有一定影响。模拟显示，现状使用黄色釉面瓷砖使得合院中心区域出现明显的深色高温区域，热舒适性较差（表 6）。相较之下，其他材质类型的合院在热舒适性上均有所改善（表 7）：立面清水混凝土与立面绿化对于合院热舒适性提升性能最佳，铝板及浅色涂料也对于热环境有一定改善。与遮阳面积相比，围合界面立面材质的变化对于合院空间的热舒适性改善效果较小，因此结合学校改造的施工周期及造价考虑，立面绿化为较适宜的改造策略，并通过多种形式综合设计实现功能与美观的融合（图 6）。

表 6 15 时不同围护界面材质类型的合院空间室外热舒适（图片来源：作者自绘）



表 7 15 时不同围护界面材质类型的合院空间室外热舒适（图片来源：作者自绘）

围护界面材质类型	平均 (UTCI) (°C)	单位时间平均中等热不适的面积百分比
黄色釉面瓷砖(现状)	42.31	99.59%
浅色涂料	42.08	98.06%
铝板	41.50	98.27%
立面绿化	40.94	95.05%
清水混凝土	40.80	94.22%

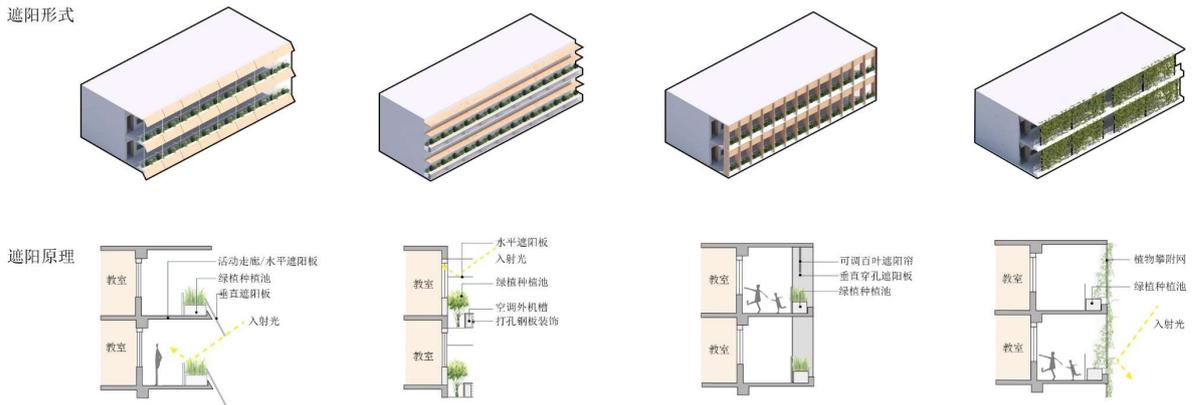


图6 立面绿化形式（图片来源：作者自绘）

### 3 翰林学校合院热舒适度优化设计与优化结果

中小校园合院空间是学生进行课间活动的主要户外场地，其热舒适性对于学生的活动意愿和活动过程的健康影响较大。因此，热环境性能的提升是湿热地区校园合院改造的首要考虑问题。同时，改造成本及改造周期也是需要同时纳入考虑。因此，本研究结合热环境优化策略、改造成本等因素，设计了不同造价的合院改造优化方案，均可提升合院热舒适性能，但最终效果不同，可供校方进行综合比较选择（表8）。优化方案一选取了较低造价方案，在适当增加遮阳面积的基础上，选择透水砖铺地及浅色涂料立面；而优化方案二选取了较高造价方案，在合院中进行大面积遮阳，同时选取改善校园空间氛围的立面绿化及花岗岩铺地。通过模拟比较优化方案与原方案，结果显示（表9）（表10），与现状对比，优化设计后的 UTCI 色阶分布图中两个方案的合院区域深色面积明显减少，UTCI 整体呈降低趋势，并最终通过多种策略综合使用，使得合院中人体热舒适趋近于夏季的热中性范围。表12显示，方案二的平均 UTCI 最低，为 38.69℃，并且有 57.74% 的区域未达到中等热不适。而方案一的平均 UTCI 为 40.41℃，未达到中等热不适的区域为 26.86%，比方案二低 30.88%。然而，方案一相比优化前，平均 UTCI 降低了 1.9℃，未达到中等热不适的区域提高了 26.41%。综上所述，方案二极大地改善了合院的热舒适度，同时其预算仅为方案 A 的 1/3，具有较高的性价比。这为校方在不同预算条件下提供了有效的选择，确保了改造的经济性与热舒适度的提升。

表8 优化方案基本信息（图片来源：作者自绘）

	现状	优化方案一（较低预算）	优化方案二（较高预算）
遮阳设施面积	0 m <sup>2</sup>	160 m <sup>2</sup>	480 m <sup>2</sup>
下垫面材质类型	混凝土	透水砖	花岗岩
围界面立面的材质	黄色釉面瓷砖	浅色涂料	立面绿化
合院整体效果			

表 9 15 时不同优化方案的合院空间 UTCI 色阶分布图 (图片来源: 作者自绘)



表 10 15 时不同方案的合院空间室外热舒适 (图片来源: 作者自绘)

围护界面材质类型	平均 (UTCI) (°C)	单位时间平均中等热不适的面积百分比
合院现状	42.31	99.59%
优化方案一	40.41	73.14%
优化方案二	38.69	42.26%

## 结语

本文以翰林学校合院改造设计为例, 采用地域化修正过后的 UTCI 压力类别, 基于 ENVI-met 数字模拟平台对湿热气候下的深圳福田区翰林学校合院模型进行了模拟分析, 探究湿热气候条件下中小学合院空间改造策略与室外热舒适度之间的关系。同时, 结合改造成本及改造周期, 提出为湿热气候下的中小学合院空间室外热舒适优化设计的综合策略。在对翰林学校合院空间进行优化改造时, 我们结合前文提出的热舒适优化策略, 主要从增加遮阳设施、更换围合界面的立面材质、地面植被及铺装更换三个层面对现状进行分析与设计, 对基于不同的材料预算, 所得主要结论如下:

(1) 中小学合院空间的主要改造策略包括增加遮阳设施、更换围合界面的立面材质、地面植被及铺装更换三类。三者综合使用可以最终达到合院空间热中性状态。

(2) 在热舒适性能提上, 遮阳设施的遮阳面积对于热环境影响最为显著, 并且遮阳面积与合院舒适度之间呈现正相关关系。

(3) 围合界面的立面材质选择及下垫面材质选择对合院空间环境性能均有一定影响。其中在立面材质选择上, 浅色粉刷、铝板、立面绿化和清水混凝土均可一定程度上改善环境性能, 其中清水混凝土及立面绿化相对较好。下垫面材质选择上, 花岗岩及透水砖是适宜的室外活动地面材料。在实际改造中, 可结合改造成本综合考虑。

图表来源:

表 1: 引自参考文献 [6] Guo T, Lin Z, Zhao Y, et al. Investigation and optimization of outdoor thermal comfort in elementary school campuses: Example from a humid-hot area in China[J]. Building and Environment, 2024, 248: 111055.

其余图表均为作者自绘

## 参考文献

[1] Li L, Zha Y. Population exposure to extreme heat in China: Frequency, intensity, duration and temporal trends[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 60: 102282.

- [2] Zhao Y, Yang J, Fang Z, et al. Passive design strategies to improve student thermal comfort: A field study in semi-outdoor spaces of academic buildings in hot-humid areas[J]. *Urban Climate*, 2024, 53: 101807.
- [3] Abdallah A S H. Passive design strategies to improve student thermal comfort in Assiut University: A field study in the Faculty of Physical Education in hot season[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 86: 104110.
- [4] Niu J, Liu J, Lee T, et al. A new method to assess spatial variations of outdoor thermal comfort: Onsite monitoring results and implications for precinct planning[J]. *Building and Environment*, 2015, 91: 263-270.
- [5] Błażejczyk K, Broede P, Fiala D, et al. Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale[J]. *Miscellanea Geographica*, 2010, 14(1): 91-102.
- [6] Guo T, Lin Z, Zhao Y, et al. Investigation and optimization of outdoor thermal comfort in elementary school campuses: Example from a humid-hot area in China[J]. *Building and Environment*, 2024, 248: 111055.
- [7] 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.
- [8] Ketterer C, Matzarakis A. Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 78-88.
- [9] Hien W N, Ignatius M, Eliza A, et al. Comparison of STEVE and ENVI-met as temperature prediction models for Singapore context[J]. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2012, 3(3): 197-209.
- [10] Ye J, Lai W, Wu Z. Study on Xiamen’s Spring and Winter Thermal Comfort of Outdoor Sports Space in the Residential Community[J]. *Buildings*, 2023, 13(9): 2369.
- [11] Soflaei F, Shokouhian M, Tabadkani A, et al. A simulation-based model for courtyard housing design based on adaptive thermal comfort[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 31: 101335.