

基于 ENVI-met 热舒适度模拟的热带传统院落空间选型研究

Research on Spatial Configuration of Tropical Traditional Courtyards Using ENVI-met Thermal Comfort Simulation

符映韬 杨定海* 袁一哲

FU Yingtao, YANG Dinghai*, YUAN Yizhe

基金项目: 国家自然科学基金项目“三生空间视角下海南岛传统村落文化地理特征及形成机理研究”(编号: 52168002); 海南省自然科学基金项目“景观基因视角下海南岛传统村落活态保护及有机更新研究”(编号: 725MS067)

摘要

为探究湿热地区热带传统院落生态营造智慧的最优空间形态, 以热舒适度为微气候环境评价的关键性指标, 选取海口市具有火山石地域特色的国家级传统古村落三卿村的 2 种典型传统民居院落空间作为研究对象, 通过实地调研与 ENVI-met 数值模拟方法, 分析院落空间形态进深变化与微气候、热舒适的关系, 以确定高舒适度的院落形态。结果表明: 随着进深增加, 一字型与 L 型院落空间的热舒适度提升, 具体表现为空气温度降低, 相对湿度与风速提高; 进深减小则呈现相反的变化趋势。当进深为 8 m 时, 院落空间的热舒适度达到最佳水平, 且一字型院落热舒适度优于 L 型院落。基于此, 建议院落以微气候优化与空间舒适性能提升为设计基准, 并提出科学合理布置院落空间植物、设置镂空景墙通风等优化策略。

Abstract

To identify the optimal spatial form of tropical traditional courtyards in hot-humid regions, thermal comfort was employed as the key indicator for microclimate evaluation. Two typical courtyard types from Sanqing Village, a nationally recognized traditional ancient village in Haikou City, were selected for analysis. Using field surveys and ENVI-met numerical simulations, this study examined the relationship among courtyard depth, microclimate parameters, and thermal comfort to identify highly comfortable courtyard configurations. Results show that increasing courtyard depth significantly improves thermal comfort by lowering air temperature, increasing relative humidity, and enhancing wind speed, while decreasing depth produces opposite trends. Optimal thermal comfort was achieved at a courtyard depth of 8 meters, with linear courtyards outperforming L-shaped ones. Based on these findings, design strategies are recommended to optimize courtyard microclimates, including strategic vegetation placement and the use of perforated landscape walls to enhance ventilation and thermal performance.

文章亮点

1) 采用 ENVI-met 数值模拟与实测相结合的方法, 揭示了院落空间形态与热环境之间的内在作用机制; 2) 从类型学视角构建“院落空间形态-进深变化-微气候”的定量关系, 为院落空间形态微气候参数化分析提供参考。

关键词

传统院落; 空间形态; 微气候; 热舒适度; ENVI-met 模拟

Keywords

Traditional courtyard; Spatial configuration; Microclimate; Thermal comfort level; ENVI-met simulation

收稿日期: 2025-06-12

修回日期: 2025-07-06

近年来气候变化日益剧烈, 温室气体的增加导致地球平均气温不断上升, 全球变暖, 乡村热岛效应加剧。空气污染与温室气体排放密切相关, 两者共同加剧了公共健康问题, 越来越多的学者开始关注微气候环境对人居环境的影响。传统村落的保护和院落的利用正在迅速推进, 适宜舒适的村落庭院空间微气候对村民的生活质量至关重要^[1], 但目前针对广大乡村院落空间的气候环境区域研究较少。随着热岛效应的加剧, 乡村微气候成为热点话题。海南属于热带地区, 具有独特的地域特色。微气候影响着院落空间的热舒适度, 开展对海南传统院落空间微气候和热舒适度的影响研究, 有利于促进湿热地区传统院落的微气候改善和空间舒适性提升, 对海南乡镇国土空间总体规划的乡村建设发展具有重要的指导意义。

国内对于院落空间形态与热舒适度关系的研究丰富。学者孙倩倩^[2-3]等针对湿热地区长进深型民居和合院式民居的天井形态尺度与空间组织, 开展建筑用房的通风降温性能和隔热性能的影响作用机制研究; 王舜昌等^[4]研究庭院内遮荫树的绿化覆盖率和种植位置布局对庭院微气候及热舒适的影响; 周志强等^[5]在现场利用实测仪器进行感知控制, 获取相关数据, 并对参与研究的志愿者进行问卷调查, 探讨感知控制对湿热地区户外庭园空间热舒适性的影响。

研究空间热舒适度的方法多样。国内薛思寒^[6]在古典园林余荫山房中提取具有代表性的类型化庭园空间, 从植物的郁闭度、景观水面积的比例、景观建筑方位、乔木组织配置的方式、围合建筑开口位置、庭院空间比例等方面, 通过 ENVI-met 数值模拟较为全面地分析了传统岭南庭园空间的气候适应性特征; 郑立成等^[7]通过热舒适度时空分布来分析夏季和冬季庭院空间的热舒适度; 吴祎等^[8]通过实测和 ENVI-met 数值模拟, 研究传统村落庭院的乔木种植位置、绿化比例、庭院开敞位置和院墙高度对微气候的影响, 从而分析庭院优化策略。国外学者为降低庭院温度和提升舒适性, 同样利用 ENVI-met 模拟结果来评价地中海炎热地区不同地表反照率对院落内部热性能和舒适度的影响^[9]; 也有学者通过现场实测数据分析, 探索了适用于调节热交换和创造温和条件的被动式系统, 重点评估了平均辐射温度和相对湿度 2 个关键参数, 以及这些参数如何受到庭院中遮阳和除雾系统的影响^[10]; 还有学者采用仪器监测庭院的热功能, 分析庭院长宽比对室内和室外温度的影响作用。此外, 部分学者探究了在不同气候区庭院的几何形状和朝向对遮阳和通风的影响, 以及它们的组合对微气候改善的影响^[11-12]。

在户外院落空间的微气候和热舒适度的研究中, ENVI-met 数值模拟方法被广泛使用且技术成熟。针对炎热和湿热地区的研究多集中于庭院设计元素和地表反射率 2 个方面, 缺乏从空间形态学视角系统探究湿热地区乡村微气候与人居环境改善的现实需求。本研究以具有海南地域文化特色的火山石典型传统院落空间为研究对象, 采用现场监测数据收集和 ENVI-met 数值模拟方法, 聚焦于“空间形态-微气候-热舒适”的相互作用机制, 探究传统院落空间的不同形态特

征如何定量影响内部微气候关键参数 (包括空气温湿度及风速) 的分布与时空变化规律, 选出舒适度高的院落空间形态。本文旨在为院落空间气候适应性设计提供科学依据, 通过改善乡村人居环境与居民户外生活品质, 为乡村建设与更新提供实践指导。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象概况

三卿村是位于海南省海口市秀英区石山镇下辖的火山群地区的传统古村落, 属于夏热冬暖气候地区^[13]。三卿村始建于宋代, 至今约有 800 年历史, 村中古石巷和古石屋, 是琼北火山地区传统村落的人文与地理相结合的典型代表。三卿村的景观空间结构是在火山熔岩台地的特殊地质基础上, 经过数百年人工与自然相互作用演化形成的。村落整体布局顺应地形, 建筑群体密集排列, 形成了 5 条交错蜿蜒的古巷系统。这些巷道大多由熔岩石铺成, 狭窄幽深, 两侧是高大的火山石墙, 这种空间形态对村落微气候产生了决定性影响^[14]。从气候适应性角度看, 岭南传统村落中的巷道具有通风、遮阳、降温、控制热辐射等综合效益, 是天然的气候调节器。三卿村的熔岩石巷道在白天吸收热量较少, 升温较慢, 夜间则迅速散热, 这有助于降低村落温度。同时, 巷道走向与主导风向的结合, 促进了空气流动, 形成风道效应, 增强了村落通风。三卿村的传统院落多采用半围合布局, 既保证了私密性, 又创造了适宜的微气候。庭院内常见植被绿化 (如海芋 *Alocasia odora*、降香 *Dalbergia odorifera* 等) 和储水水缸等要素通过蒸腾作用和热容效应调节院落温湿度。

从国家层面看, 乡村振兴战略明确要求“产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕”, 这为三卿村的发展提供了方向性指导。此外, 生态文明建设和低碳发展的国家战略也强调传统村落保护与生态保护的协同, 要求最大限度利用自然能源, 减少常规能源消耗和温室气体排放。从海南省层面看, 自由贸易港建设为传统村落发展带来了新要求与新机遇。海南自由贸易港建设不仅关注经济发展, 也重视文化遗产与生态保护, 要求协调好资源、环境、生态和产业之间的关系。同时, 海南省针对传统村落保护出台了一系列政策, 如《海南省黎族传统聚落文化遗产保护管理办法》(琼府办〔2024〕34 号), 强调对传统村落整体风貌、空间格局和文化遗产的保护。

1.2 研究方法

1.2.1 测点的选择与分布

三卿村的传统民居院落空间所蕴含的高度适应特定地域气候的被动式降温智慧, 通过院落独特的空间形态、材料应用与生态景观协同系统得以具象化呈现。三卿村整体建筑布局呈现聚集特征 (图 1)。村内建筑以庭院建筑 (黑色部分) 为主, 在空间上形成较为密集的组团。村内交通流线以狭窄的巷道为主, 巷道蜿蜒曲折, 连接着各个庭院建筑与空间, 形成便捷的内部交通网络。研究选定三卿村内占地面积和建

筑长高宽比接近、路门和院落朝向一致的一字型和“L型”2种典型的院落空间，并在选定的典型院落中各选取1个传统民居院落中心区域进行微气候实地监测（图2），对实地现状进行记录（表1）。

调研发现，三卿村的新建建筑大部分保留了传统空间布

局，但为了满足多代同居的现代宜居需求，其建筑尺度较传统建筑扩大，面积普遍增加至120 m²，建筑长宽比例接近2：1。目前保留的院落长度多为12~18 m，进深为2~8 m；垒砌的围墙普遍高度为1.5~2 m，个别院落围墙达到2.5 m的高度；院落路门大部分位于建筑的西侧。

为研究微气候和热舒适度与院落空间进深变化的影响关系，考虑到村落未来更新设计的适用性和合理性，以及围墙设计规范标准，研究首先为模拟模型设定固定值：一字型和L型院落的正屋建筑尺度统一为15 m×8 m，围墙高度统一为2.2 m，路门均设置在西侧且靠近建筑。接着，根据现状调研数据，以院落的长宽比为变量设置6种类型的院落空间

表 1 研究对象现状情况

Tab.1 Spatial and environmental characteristics of the research subjects

院落名称	场地状况	绿化情况
一字型院落	西南朝向，路门位于西北侧，围墙高1.8 m，照壁高3 m，下垫面铺装为火山石	有1株落叶小乔木
L型院落	西南朝向，路门位于北侧，围墙高1.5 m，下垫面铺装为火山石	无

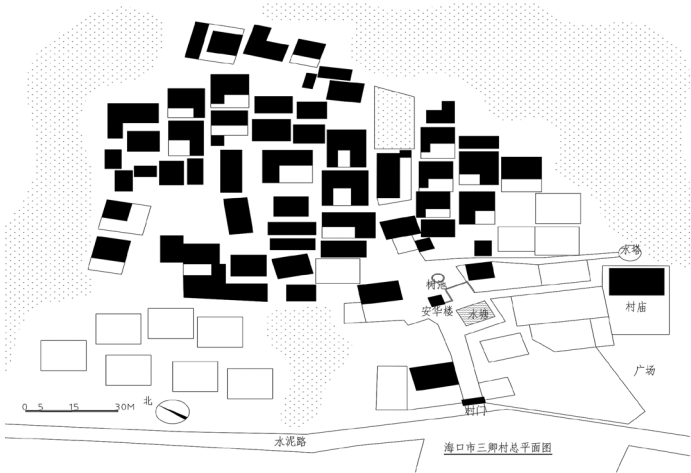


图 1 海口市三卿村总平面图
Fig.1 Spatial layout of Sanqing Village, Haikou City



图 2 院落实测点及实景图
Fig.2 Microclimate monitoring points and on-site photographs of the courtyard

(表2)。随后通过可视化图在院落内部设置相应的测量点(图3),输出相关数值进行对比分析。最终根据输出的微气候可视化模拟结果,分析海口市三卿村院落空间形态变化对微气候和热舒适度的影响。

1.2.2 气候测定与模拟方法

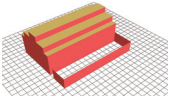
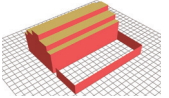
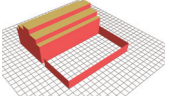
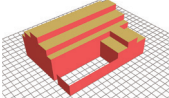
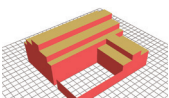
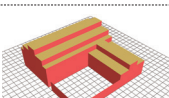
本研究结合实地监测和 ENVI-met 数值模拟方法分析微气候。ENVI-met 动态模拟研究软件由德国的 Michael Bruse 和 Heribert Fleer 等人于 1998 年开发并不断改进,主要用于模拟小尺度范围内地表、建筑、植被与大气之间的相互作用,广泛应用于全球跨地域的微气候模拟研究^[15-17]。该软件可模拟城市室外热环境、热岛效应和风环境等,适用于院落这类户外小空间的微气候分析。首先在 ENVI-met 软件的“Manage Projects”模块创建工作环境(即设定模拟数据存储路径),接着利用 CAD 描绘卫星底图,并通过 Photoshop 处理导出为 BMP 格式,最后将底图文件导入到“Edit Area”模块进行建模。在 Edit Area 建模中,实测校验模型院落设定单元网格为 2 m×2 m×2 m,三维模型网格为 50×50×25;模型方案院落设定单元网格单元尺寸为 1 m×1 m×1 m,三维模型网格为 30×30×25,模型朝向调整为与现

状一致的北偏东 60°。研究选用与实际调研数据较吻合的下垫面材质和植物类型,形成模拟区域平面图进行检验(图4)。

7 月是海南高温和闷热天气最集中

的月份。为确保校验的准确性,研究将实测及模拟时间选定于气候较为典型的 7 月。实测于 2024 年 7 月 24 日(当天晴朗无云)的 8:00—17:00 进行,总共 9 小时,覆盖了居民日常户外活

表 2 院落空间模型
Tab.2 Spatial configuration model of the courtyard

院落名称	形态类型	院落空间形态尺度	建筑和围墙尺度	建模 3D 图
一字型	A1	长度 15 m, 进深 4 m		
	A2	长度 15 m, 进深 6 m	正屋尺寸 15 m×8 m, 围墙高度 2.2m, 路门位于西侧	
	A3	长度 15 m, 进深 8 m		
L 型	B1	长度 10 m, 进深 4 m	正屋尺寸 15 m×8 m, 横屋尺寸 4 m×5 m, 围墙高度 2.2 m, 路门位于西侧	
	B2	长度 10 m, 进深 6 m	正屋尺寸 15 m×8 m, 横屋尺寸 6 m×5 m, 围墙高度 2.2 m, 路门位于西侧	
	B3	长度 10 m, 进深 8 m	正屋尺寸 15 m×8 m, 横屋尺寸 8 m×5 m, 围墙高度 2.2 m, 路门位于西侧	

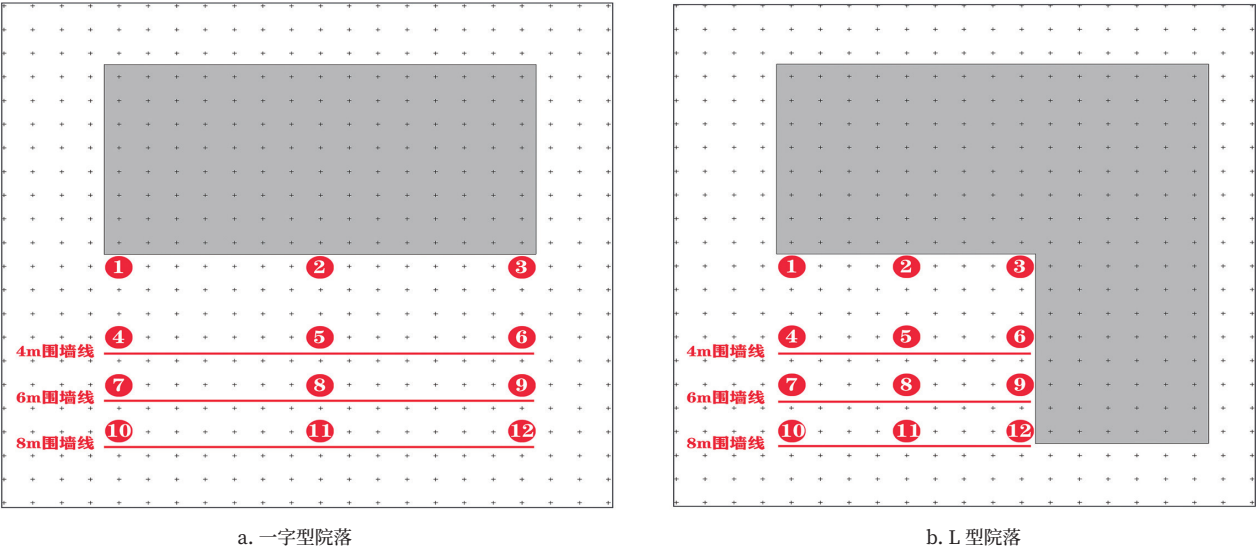


图 3 院落测点位置
Fig.3 Distribution of courtyard microclimate monitoring points

动的主要时间。研究采用小型 4G 超声波一体式气象站 KE-FSXCS-4G-3 进行监测（表 3），监测点设置在选定的典型院落内部中心点，并依据《地面气象观测规范 空气温度和湿度》（GB/T 35226—2017），将传感器置于距离水平地面 1.5 m 的高度，测定该高度的空气温度、相对湿度、风速等微气候因子，以接近人类活动的主要范围并更好地反映人类感知的温度环境。由于太阳辐射数据无变化，本研究未对其进行详细分析。研究使用实测数据验证 ENVI-met 模型的模拟结果，评估其精度，并通过 ENVI-met 模拟输出可靠的可视化结果展开分析。鉴于现存保存完好的传统建筑及院落空间数量有限，实测数据的获取虽存在一定局限性，但典型院落空间的形态特征可通过航拍影像分析明确识别。

表 3 气象站 KE-FSXCS-4G-3 的技术参数

Tab.3 Technical parameters of meteorological station KE-FSXCS-4G-3

测量参数	精度	量程	分辨率
温度	±0.5℃（在 25℃条件下）	-40℃ ~+80℃	0.1℃
湿度	±3%RH（在 60%RH，25℃条件下）	0%RH~99%RH	0.1%RH
风速	±0.5+2%FS（在 60%RH，25℃条件下）	0~40 m/s（启动风速为 0.5 m/s）	0.1 m/s

本研究选取 2 处典型院落的实测数据开展对比分析，尽管样本组数选择可能存在偶然因素，但 ENVI-met 软件对实测数据的样本组数未作强制性规定。从技术可行性来看，单组实测数据经精度验证后，可满足海口市三卿村传统院落夏季微气候模拟的研究需求，为相关模拟分析提供数据支撑。

研究依据 2024 年夏季月份数据，选择晴朗、无云、微风的 2024 年 7 月 10 日作为典型气象模拟日^①，模拟时间设定为 6:00—18:00，共 12 个小时。考虑到模拟日期内的最高气温 38℃ 于 14:00 出现，该时刻作为气温峰值时段，最能反映院落微气候在极端热环境下的特征，因此选定 14:00 作为模拟数据可视化对比分析的核心时间节点。

1.2.3 热舒适评价指标选择

生理等效温度 *PET*（Physiological

Equivalent Temperature）是在慕尼黑人体热量平衡模型（Munich Energy Balance Model for Individuals, MEMI）的基础上推导出的热指标，指在某一室内或户外环境中，人体皮肤温度和体内温度达到与典型室内环境同等的热状态所对应的气温^[18]。该指标综合考虑了主要气象参数、活动、衣着以及个体参数对舒适度的影响^[19]。国际广泛将德国 Andreas Matzarakis 以其导师 Helmut Mayer 创立的热舒适评价标准^[20]作为公认的室外热舒适评价核心指数之一（表 4）。

1.2.4 精度验证

在统计分析的背景下，室外空气

表 4 热舒适评价指标标准

Tab.4 Thermal comfort evaluation indices and their standards

<i>PET</i> /℃	热感觉	热舒适度状态
< 4	极冷	极不舒适
[4,8)	很冷	很不舒适
[8,13)	较冷	不舒适
[13,18)	微凉	较舒适
[18,23)	中性	最舒适
[23,29)	微暖	较舒适
[29,35)	较暖	不舒适
[35,41]	很热	很不舒适
> 41	极热	极不舒适

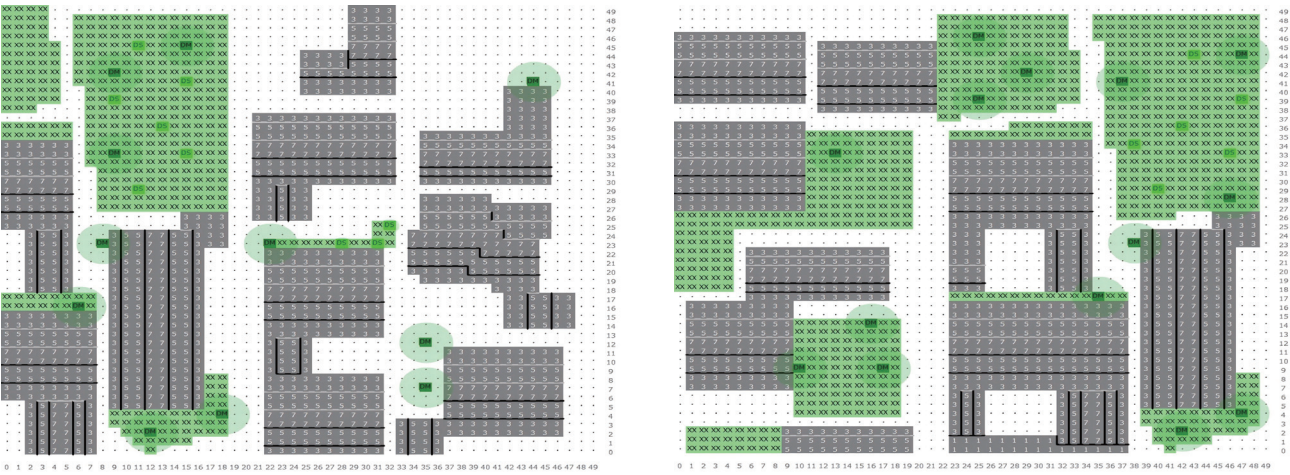


图 4 不同院落空间中心模拟区域平面图

Fig.4 Plan of microclimate simulation areas in different courtyard spatial layouts

① 数据来源海口美兰（机场） <https://rp5.ru/METAR>。

温度和相对湿度是校准计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模型的主要指标。这不仅是因为它们的测量过程简便, 还因为利用其日变化周期来驱动模型能显著提高模拟结果的准确性^[21]。

研究采用统计学双重校验机制, 分别使用均方根误差 *RMSE* 和平均绝对百分比误差 *MAPE* 评估 ENVI-met 模型的精度。*RMSE* 作为小样本场景下的模型评估参数, 反映了模拟值与实测值的系统偏差程度。目前公认空气温度的 *RMSE* 值为 0.52℃~4.30℃, 而相对湿度的 *RMSE* 值小于 10% 通常被认为是可接受的^[22~23]; *MAPE* 采用百分比衡量模型误差, 适用于多类不同数据间的比较, 若 *MAPE* 值小于 10%^[24~25], 则模拟精度较高。计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2} \quad (1)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y'_i - y_i|}{y'_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中 y'_i 为模拟值, y_i 为实测值, n 为小时数。

院落温湿度精度检验结果可知(表 5), 空气温度的 *RMSE* 值小于 1.2℃, 相对湿度的 *RMSE* 值控制在 5% 以内, 空气温度和相对湿度的 *MAPE* 值均维持在 10% 以下。模拟值和实测值误差较小说明模型适用于模拟海口市三卿村传统院落夏季微气候变化情况。

2 结果与分析

2.1 院落空间结构对空气温度的影响

根据输出的可视化模拟结果对比分析院落空气温度分布及数值(图 5), 其中冷色区域代表温度低, 暖色区域代表温度高。

一字型院落的东侧和北侧区域温度较高, 中心区域的温度最低。从空间分布特征来看, 院落温度呈现从东侧、北侧角区域向西侧中心区域逐步降低的规律, 形成了明显的温度分区

格局。对比 A1、A2、A3 三类空间的温度值可知, 随院落空间进深的增加, 空气温度的最高值与最低值存在较明显的差异性, 但院落整体温差的分布趋势具有一致性。这说明一字型院落空间进深的变化不会改变温度的分布格局, 但对温度数值存在一定影响。

L 型院落临近正屋的北侧区域温度较高, 临近横屋的南侧区域的温度最低。随横屋与院落进深的增加, 黄色低温区域向西侧扩张显著, 形成了

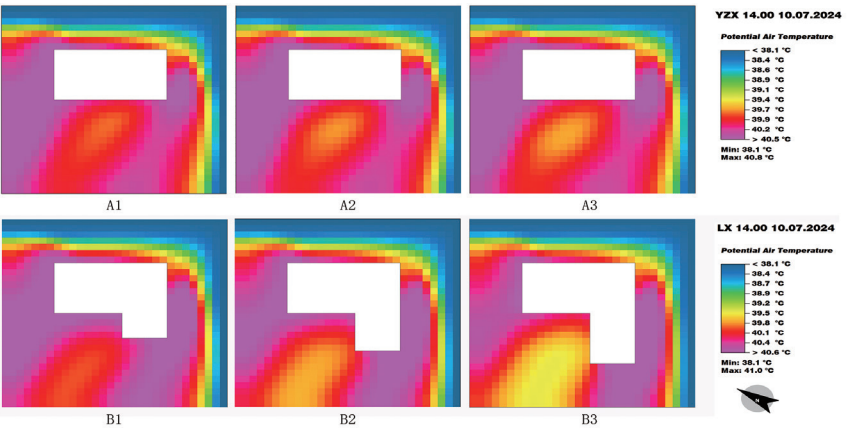
明显的温度分区格局, 且温度值差异较明显。对比 B1、B2、B3 三类空间的温度值可知, 与一字型院落相似, 虽然 L 型院落整体温差的分布趋势也具有一致性, 但是温度逐步降低的波动较为均衡。这说明 L 型院落空间进深的变化同样不会改变温度的分布格局, 但对温度数值存在显著的影响。

2.2 院落空间结构对相对湿度的影响

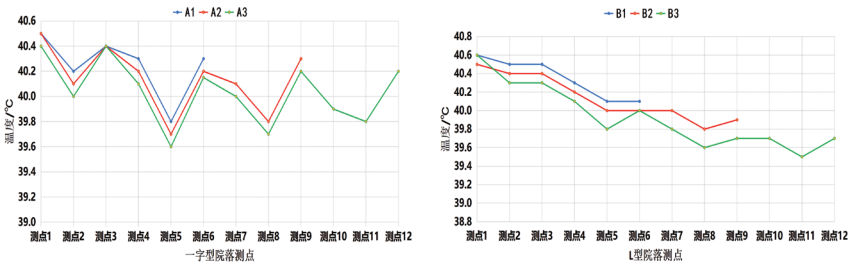
院落相对湿度分布模拟结果图(图

表 5 院落温湿度精度检验结果
Tab.5 Results of temperature and humidity accuracy inspection in the courtyard

评价指标	院落名称	空气温度 /℃	相对湿度 /%RH	检验结果
RMSE	一字型	1.04	4.18	空气温度< 1.2℃, 相对湿度< 5%
	L 型	1.19	4.08	
MAPE	一字型	3.28	4.85	< 10%
	L 型	3.54	4.51	



a. 空气温度分布图



b. 空气温度值对比图

图 5 院落空气温度分布及数值对比
Fig.5 Spatial distribution and numerical comparison of air temperature in the courtyard

6) 中的冷色区域表示湿度低, 暖色区域表示湿度高。

一字型院落空间的北侧区域湿度较低, 院落中心区域湿度较高。相对湿度呈现显著的空间梯度分布特征, 北侧蓝色区域经中间绿色过渡带向南侧延伸, 形成相对湿度由低至高的变化格局。对比分析 A1、A2、A3 相对湿度可知: A1 中蓝色区域与绿色区域的分布大致均等; A2 与 A3 的相对湿度分布特征高度趋同, 其中绿色区域的面积显著大于 A1, 且院落中心区域的湿度数值呈明显提升趋势。这说明一字型院落空间进深的变化, 对院落内部相对湿度的整体数值变化及空间分布变化具有轻微的影响。

L 型院落 B1、B2 的相对湿度表现出显著的局部空间分异特征, 院落东北侧区域相对湿度低, 西南侧区域相对湿度略高于东侧, 其中 B2 西南侧高湿区域的分布面积略大于 B1。B3 东北侧区域仍为低湿区, 自中心向西南侧呈递增趋势, 且高湿区域的面积大于 B1 和 B2。这说明整体空间的相对湿度沿东北往西南方向逐步递增; 随着院落空间进深的增加, 西南侧相对湿度值呈递增趋势, 湿度较高空间的覆盖范围也同步扩大。综上, L 型院落空间进深的形态变化对其内部相对湿度的数值大小及空间分布格局均具有显著调控效应。

2.3 院落空间结构对风速的影响

院落风速分布模拟图 (图 7) 中的冷色区域表示风速小, 暖色区域表示风速大。一字型和 L 型院落风向均为东风, 风速整体保持一致。

一字型院落风速呈现从北往西递增的空间分布特征, 其成因主要为东侧建筑界面形成挡风效应, 促使气流以环抱式路径沿建筑南北侧向西偏转流动。研究表明, 一字型院落 A1、A2、A3 三类空间进深的变化并没有对风速产生明显影响。

L 型院落 B1、B2、B3 空间内部的气流形成双向流动路径: 一侧沿院落从东向西流向, 另一侧沿院落从南向北偏转流动。由于正屋与横屋东侧建筑界面的气流阻挡效应, B1、

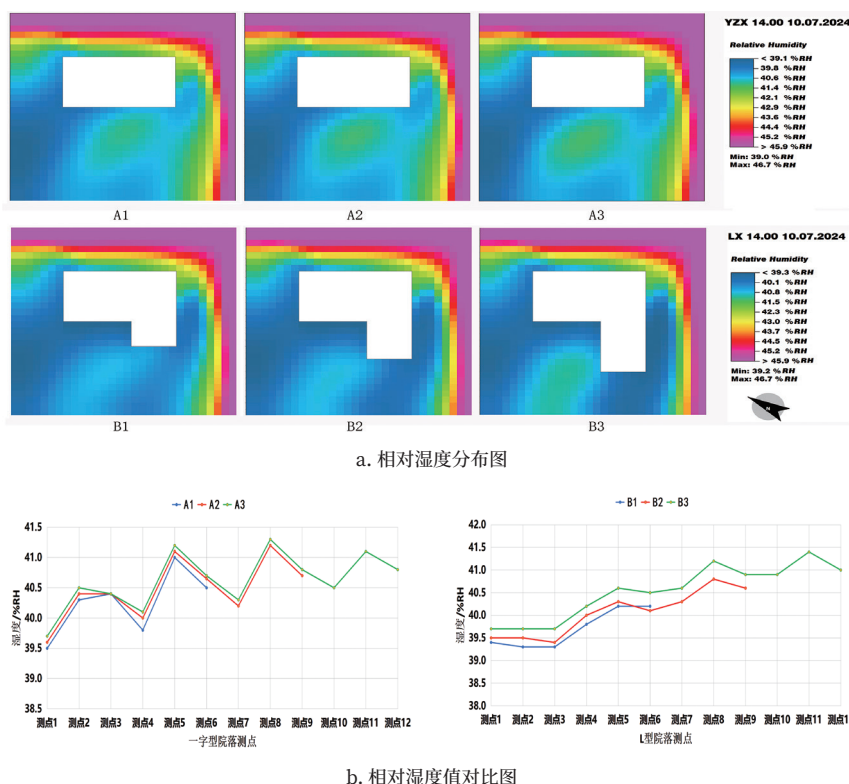


图 6 院落相对湿度分布及数值对比

Fig.6 Spatial distribution and numerical comparison of relative humidity in courtyards

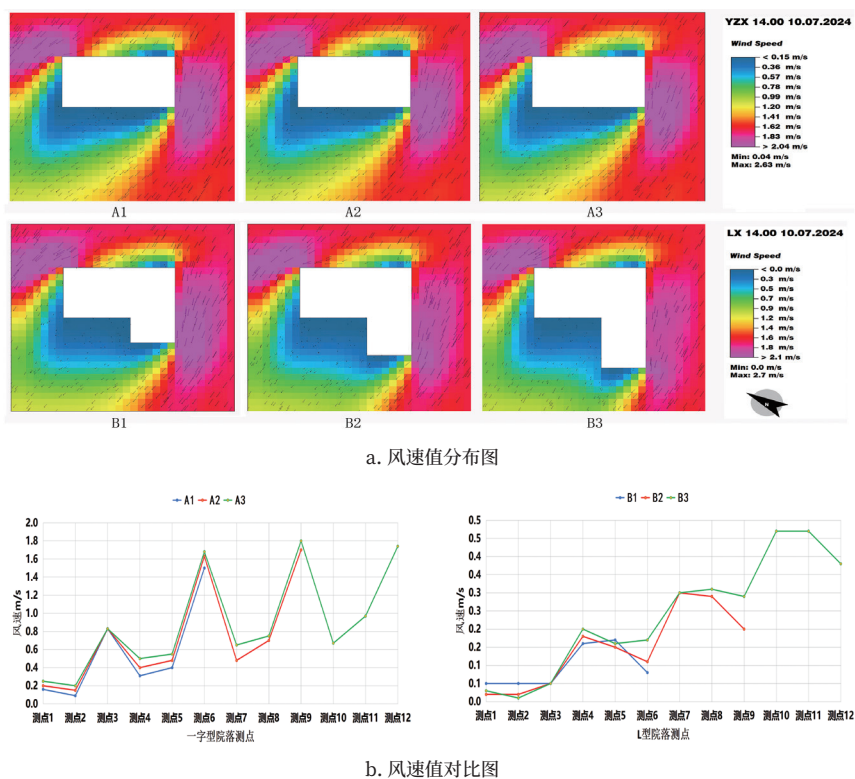


图 7 院落风速分布及数值对比

Fig.7 Spatial distribution and numerical comparison of wind speed in the courtyard

B2、B3 的风速呈现从东北往西南梯度递增的空间分布格局，其中 B1、B2、B3 东北区域风速最小，西南区域风速最大，按风速值排序从小到大依次为 B1、B2、B3。结合院落风速量化数据对比分析可知，L 型院落横屋及院落形态的进深变化，并未改变院落空间内部风向的一致性，但使风速值呈现显著差异性。

2.4 院落空间热舒适度的差异

海口市 7—8 月份属于炎热季节，常常伴有高温。根据模拟输出的院落热舒适分布可知（图 8），两类型院落的生理等效温度 PET 最低数值均大于 41°C ，使人感到极不舒适。本研究模型只考虑了建筑单体、围墙、路门开口位置、立面及下垫面材料等单一的构成要素，在模拟过程中人体生理机能产生极端热应激，导致模拟输出的 PET 值偏大。为更好、更精准地对比不同进深的院落空间对微气候的影响，研究并未把院落植物、水系、廊架等能提高热舒适度的多重构成要素附加进模型，而只从单一的空间框架构成要素进行构建。

院落生理等效温度分布显示（图 8），冷色区域 PET 值低，热舒适度高，暖色区域 PET 值高，热舒适度低。

一字型院落 A1、A2、A3 三类空间的内部生理等效温度均沿东北往西南方向递减。空间进深的形态变化未对 PET 值产生显著调控效应，对应的热舒适度未发生实质性改变。

L 型院落 B1、B2、B3 三类空间的内部生理等效温度沿东北往西南方向呈梯度递减，其中 B3 的递减梯度最为显著。三类院落均为东北区域 PET 值高，舒适度低；西南区域 PET 值低，舒适度高，空间分异特征一致。综上，L 型院落横屋及整体进深的形态变化，对内部热舒适度具有显著的调控效应。

2.5 院落空间选型

通过对比一字型和 L 型院落所有形态类型的空气温度、相对湿度、风速和 PET 的平均值（表 6）可知：一字型院落和 L 型院落三类空间的空气温度平均值按从大到小排序，依次为 B1、A1、A2 和 B2、A3、B3；相对

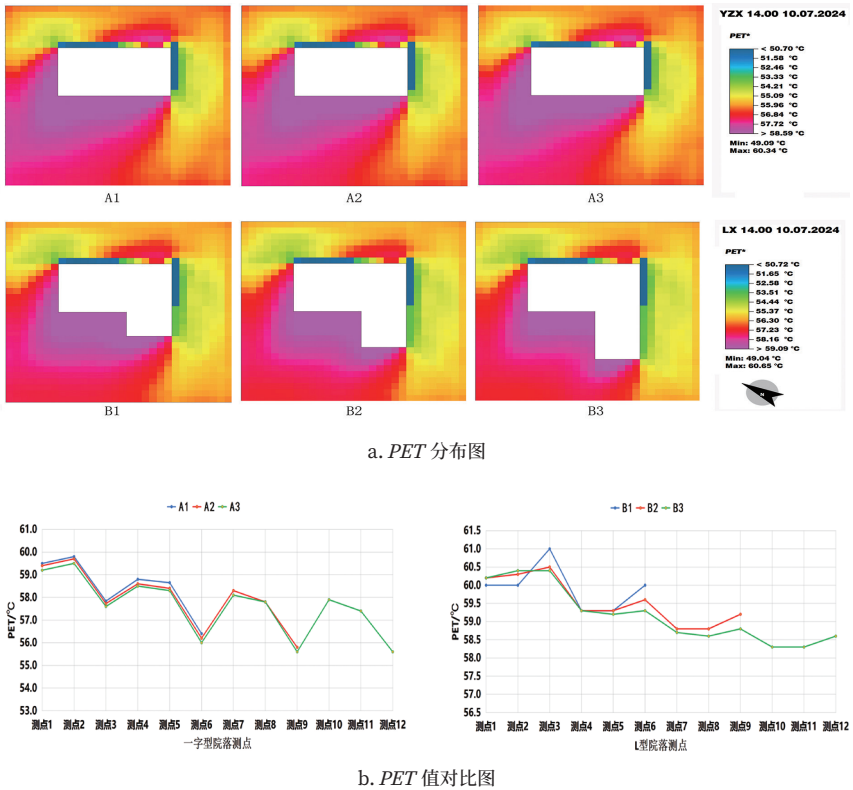


图 8 PET 分布及数值对比
Fig.8 Spatial distribution and comparative analysis of PET

表 6 院落微气候和 PET 平均值对比

Tab.6 Comparison of courtyard microclimate parameters and PET averages					
院落名称	形态类型	空气温度 / $^{\circ}\text{C}$	相对湿度 /%	风速 / (m/s)	$PET/^{\circ}\text{C}$
一字型	A1	40.2	40.3	0.56	58.4
	A2	40.1	40.5	0.70	58.0
	A3	40.0	40.6	0.80	57.7
L 型	B1	40.4	39.7	0.10	60.0
	B2	40.1	40.1	0.14	59.6
	B3	39.9	40.5	0.23	59.2

湿度平均值按从大到小排序，依次为 A3、A2 和 B3、A1、B2、B1；风速平均值按从大到小排序，依次为 A3、A2、A1、B3、B2、B1； PET 平均值按从大到小排序，依次为 B1、B2、B3、A1、A2、A3。综合来看，一字型院落的热舒适度优于 L 型院落。

3 院落空间热舒适度提升策略探索

3.1 基于温度提升院落空间热舒适度

模拟结果显示，一字型院落最高

温区出现在东侧与北侧，最低温位于中心区域，整体温差在 1°C 以内；L 型院落高温区集中于临近正屋的北侧，低温区位于南侧，且随着进深加大，低温区向西南方向扩大，表明进深变化对 L 型院落温度影响更为显著。院落空间应根据温度分布特性进行功能布局。将对热舒适度要求较高的日常起居与休闲活动空间（如休憩、交谈）布置在院落的低温中心区（一字型）或南侧和西南侧区域（L 型），以利用自然形成的“冷岛”效应。而对温度

变化不敏感的辅助性功能空间（如储物、通道）可布置在东侧与北侧等高温区域。

为增强院落遮阳与隔热的功能，应在高温的院落东侧与北侧区域增加垂直绿化与遮阳构筑物，并种植高大乔木，利用其夏季茂密树冠遮蔽强烈日照。同时，北侧墙体可采用垂直绿墙或增设遮阳格栅，减少太阳辐射热吸收。根据材料热工性能，在高温区域的地面与墙面优先采用浅色、高反射率的材料（如浅色火山石铺装或抹面），降低表面温度；在低温的休闲区则使用木材等保温性较好的材料铺设地面，避免夜间过快地散热，维持日间的热舒适度。

3.2 基于湿度提升院落空间热舒适度

一字型院落的相对湿度呈现北低南高的分布特征，且进深加大（A2，A3）时中心湿度提高。L型院落低湿度区集中于东北角（临近建筑），高湿度区向西南方向延伸，且随着进深加大，西南高湿度范围显著扩大。

精准化配置植物并利用其蒸腾作用是调节湿度的关键。在低湿度的北侧与东北侧区域（L型院落），可种植蒸腾作用较强的植被，如海芋、蕨类等耐阴湿植物，以增加空气湿度。在高湿度的西南区域，则应种植蒸腾作用较弱的植物，或保证该区域通风良好，避免过度种植导致湿度过高。局部设置水体能有效增加空气湿度，如在较为干燥的院落北侧或东北角设置小型水景、水缸或陶罐水池，既可作为文化元素（延续“水缸文化”），又可调节局部湿度。避免在高湿度区域设置大面积静态水体，应增强空气流动，促进水汽扩散，这需要与风速优化策略相结合，通过引导风路径过高温区，达到自然除湿的效果。

3.3 基于风速提升院落空间热舒适度

两类院落中风速均呈现自东向西递增的趋势，但成因不同。一字型因东墙阻挡形成环抱式风流。L型院落则因正屋与横屋东墙共同作用，气流方向更为复杂，且其风速值随进深加大产生明显差异（B3）。优化建筑界面可引导风流，维护和利用东侧墙体可阻挡主导东风，这是创造院落内部风压差、促进空气流动的关键，不应为了扩大建筑面积而轻易拆除或封闭这些界面。

L型院落可利用其内部风场的复杂性进行精细化导风设计。在东北角低风速区，可通过设置导风板或镂空景墙，将部分气流引入该区域，改善通风。对于风速最大的西南角区域，应保持其开阔通透，避免设置实体遮挡物，将其作为主要的“出风口”，从而拉动整个院落内部的空气流动。植被的导风与防风应用种植设计应服务于风流引导。在需要提高风速的区域，种植低矮灌木和草地，减少对地面风的阻力；在需要降低风速、创造静风区的休憩点，则可布置密度较高的灌木丛，起到防风作用。

3.4 优化院落空间结构提升热舒适度

一字型院落布局遵循“北动南静”原则，将休憩区置于温度、湿度适宜的院落中南部，北部宜布置路径或动态功能区。院落应保持东西向通透，确保东风可顺畅穿越。北侧可种植高大乔木遮阳，南部以低矮植被为主，避免阻挡风道。

还可在北侧设小型水景调节微气候。

L型院落布局应将核心活动区布置在受建筑遮挡较少、温度与风速均较为适宜的南侧或西南侧区域，东北角可作为过渡或服务空间。重点疏通从东北角向西南角的风道，移除不必要的障碍物；并在正屋与横屋的转角处（弱风区）设置导风构件，增强通风。东北角适宜种植耐阴湿植物群，可搭配小型水景；西南角应保持开阔，采用透水铺装，并设置低矮遮阳伞棚与座椅，创造通风良好的休憩点。

4 结语

本文从类型学视角构建了“院落空间形态-进深变化-微气候响应”的定量关系，聚焦于传统院落空间形态的微气候效应，以海南热带传统村落为例，采用 ENVI-met 数值模拟与现场实测相结合的方法，对比分析一字型与 L 型 2 类典型院落不同进深条件下对微气候与热舒适性的影响，系统揭示了空间形态与热环境之间的内在作用机制。结果表明：一字型院落空间进深的变化对空气温度具有一定的影响，对相对湿度、风速和生理等效温度影响不明显；L型院落空间进深的变化对空气温度、相对湿度、风速和生理等效温度 *PET* 都具有显著的影响；一字型院落的热舒适度优于 L 型院落；在条件允许的情况下，优先设计或改造为一字型院落布局可提升整体热舒适度。研究在理论层面拓展了乡土建筑生态智慧在微气候调节领域的认知；在方法层面建立了适用于湿热地区传统院落的空间形态与气候性能评价框架，弥补了当前热带乡村地区院落尺度气候适应性研究中对空间形态参数化分析的不足；在实践层面为海南传统村落更新与现代乡村建设提供了形态选型与设计优化依据。

研究仍存在局限性，可为后续研究提供方向。首先，由于研究区域内保留较完整的传统院落多为私人领域，样本选取和气候数据实测点组数存在局限性，实测数据和 ENVI-met 模拟数据的对比验证存在偶然性。后续研究可扩大样本范围，采集新建院落和传统院落中不同类型院落空间的气候实测数据进行对比分析。其次，本文仅探讨与研究场地朝向一致的微气候影响关系，未来可进一步研究不同朝向对微气候和热舒适度的具体影响。第三，本文在统一正屋长宽比的条件下，通过调整横屋与院落进深进行对比研究。后续研究可在符合传统村落宅基地面积规定的前提下，探讨民居院落形态变化对微气候和热舒适度的影响，以寻求最优的面积比例。此外，在实践层面可结合传统智慧与现代技术，利用火山石等本地材料建造院落，发挥其良好的透气性和热稳定性以改善微气候；在设计阶段可利用 ENVI-met 等现代微气候模拟软件，对院落布局、植被配置等要素进行优化设计，提升设计方案的科学性与合理性。

注：图片均由作者自摄自绘。

参考文献:

- [1] 孟宝, 彭立, 张少尧, 等. 川南山地丘陵区乡村院落空间演变及优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (17): 274-284.
- [2] 孙倩倩, 罗智星, 白鲁建. 长进深型民居天井空间通风降温性能与形态尺度研究[J]. 建筑科学, 2024, 40 (2): 150-159.
- [3] 孙倩倩, 范征宇, 白鲁建, 等. 合院式民居天井空间防热性能优化研究[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43 (2): 362-372.
- [4] 王舜昌. 庭荫树布局对庭院微气候及热舒适的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [5] 周志强, 董靛. 感知控制对湿热地区户外庭园空间热舒适性的影响——以华侨大学“世外·花缘”生活实验室为例[J]. 中国园林, 2022, 38 (11): 100-105.
- [6] 薛思寒, 冯嘉成, 肖毅强. 岭南名园余荫山房庭园空间的热环境模拟分析[J]. 中国园林, 2016, 32 (1): 23-27.
- [7] 郑立成. 传统村落室外空间微气候和热舒适度研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023.
- [8] 吴祎. 太湖东西山传统村落庭院微气候适应性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2024.
- [9] LOPEZ-CABEZA V P, ALZATE-GAVIRIA S, DIZ-MELLADO E, et al. Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards under Mediterranean hot summer climate conditions[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 81: 103872.
- [10] DIZ-MELLADO E, LÓPEZ-CABEZA V P, RIVERA-GÓMEZ C, et al. Optimizing a courtyard microclimate with adaptable shading and evaporative cooling in a hot mediterranean climate[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 88: 109167.
- [11] RIVERA-GÓMEZ C, DIZ-MELLADO E, GALÁN-MARÍN C, et al. Tempering potential-based evaluation of the courtyard microclimate as a combined function of aspect ratio and outdoor temperature[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51: 101740.
- [12] ZHU J, FENG J, LU J, et al. A review of the influence of courtyard geometry and orientation on microclimate[J]. Building and Environment, 2023, 236: 110269.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑设计热工规范: GB50176-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [14] 杨定海. 海南岛传统聚落与建筑空间形态研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [15] 祝善友, 高牧原, 陈亭, 等. 基于 ENVI-met 模式的城市近地表气温模拟与分析——以南京市部分区域为例[J]. 气候与环境研究, 2017, 22 (4): 499-507.
- [16] 卢薪升, 杨鑫. 基于 ENVI-met 软件小气候模拟与热舒适度体验的城市更新研究——以北京石景山北辛安地区为例[J]. 城市发展研究, 2018, 25 (4): 147-152.
- [17] 岳小智. 南京市居住小区绿地布局模式对夏季微气候的影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [18] HPPE P. Die Energiebilanz des Menschen[D]. München: University of München, 1984.
- [19] 闫业超, 岳书平, 刘学华, 等. 国内外气候舒适度评价研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28 (10): 1119-1125.
- [20] MATZARAKIS A, MAYER H, IZIONOM M. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature[J]. International journal of biometeorology, 1999, 43 (2): 76-84.
- [21] DETOMMASO M, COSTA NZO V, NOCERA F. Application of weather data morphing for calibration of urban ENVI-met microclimate models. Results and critical issues[J]. Urban Climate, 2021, 38: 100895.
- [22] 王婷, 陈小芮, 章家恩, 等. 不同绿化改造方案对小区微气候环境影响的 ENVI-met 模拟研究[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40 (4): 61-68.
- [23] 杨娜, 闫增峰, 郎嘉琛, 等. 奥体中心公园典型布局模式微气候特征测试与模拟分析[J]. 城市建筑, 2020, 17 (25): 32-35, 59.
- [24] 李金刚, 许佳聪, 朴璿娥, 等. 寒地温带季风气候区高校校园室外环境热舒适改善研究——以延边大学为例[J]. 园林, 2025, 42 (2): 52-60.
- [25] 董楠楠, 吴静. 基于 ENVI-met 模拟的屋顶绿化热环境影响[J]. 中国城市林业, 2020, 18 (4): 61-66.

作者简介:

符映韬/1986年生/男/海南儋州人/海南大学热带农林学院(海口 570228)/在读硕士研究生/专业方向为风景园林规划与设计

杨定海(*通信作者)/1975年生/男/陕西宝鸡人/博士/海南大学热带农林学院(海口 570228)/教授, 博士生导师/主要从事岭南地域城乡空间结构、岭南传统聚落人居环境研究/E-mail: dinghaiy2008@foxmail.com

袁一哲/1997年生/男/海南海口人/海南大学热带农林学院(海口 570228)/在读硕士研究生/专业方向为风景园林规划与设计