

基于性能模拟技术的岭南地区中小学校园庭院改造热舒适性研究及优化——以深圳市为例

毛雨霁¹, 虞刚², 朱星洁³, 林晓钰⁴

摘要: 随着我国经济发展和政策推动, 近年来中小学教育标准不断提升, 深圳在 2000 年代初所建成的校园已然无法满足日益增长的教学需求。同时在存量更新、高质量发展的背景下, 深圳老旧校舍的改造刻不容缓。庭院作为岭南地区中小学校园建筑的典型形态, 以其优越的地理位置及丰富的环境布置承载着多种室外教学交流与课余活动, 是亚热带地区提升校园质量的关键之一。校园庭院改造的不同策略对室外热舒适有着不同程度的影响。

本研究选取典型的深圳老旧校舍进行类型学分析, 提取岭南中小学校园庭院原型作为研究对象。通过 ENVI-met 对典型庭院的室外热环境进行模拟, 定性定量结合研究基于架空空间、遮阳、内立面、下垫面的四类被动式改造方式对庭院室外热舒适的影响, 对比分析得出不同的优化改造策略, 为岭南地区校园庭院建筑改造和热环境优化提供参考。

关键词: 岭南地区; 中小学校园; 庭院改造; 性能模拟; 热舒适

Keywords: Lingnan area; Primary and secondary schools; Courtyard renovation; Performance simulation; Thermal comfort

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

在我国岭南地区, 夏季漫长且高温高湿, 庭院作为一种气候响应型设计, 被广泛应用于中小学校园建筑的布局中。校园庭院作为联系教学、拓展活动的室外公共空间, 其环境热舒适度显著影响着师生们在这些区域中停留并进行活动与交流的意愿。人体对热环境表示满意的意识状态即为热舒适度^[1]。从现有研究可知, 人体热舒适的影响因素主要包括物理因素(温度、相对湿度、风速、平均辐射温度)和个人因素(新陈代谢率、服装热阻)两大方面^[2]。

随着经济发展与教学标准的提升, 岭南地区大批以庭院形式建设的老旧校舍急需进行更新改造。庭院优化改造可有效改善热环境, 室外热环境主要受气温、相对湿度、太阳辐射和风速等物

¹ 毛雨霁, 哈尔滨工业大学(深圳), 建筑学院研究生

² 虞刚, 哈尔滨工业大学(深圳), 教授

³ 朱星洁, 哈尔滨工业大学(深圳), 建筑学院研究生

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

理要素的影响^[3]。建筑改造措施主要通过改变太阳辐射及风环境进而影响庭院热环境及热舒适程度^[4]，因此通过以被动式为主的改造策略改善校园庭院热环境可有效提升校园质量。庭院热环境受庭院的几何形状、朝向、墙体、下垫面材料和景观要素等特征的影响显著^[5]。庭院的几何形状及朝向对庭院内采光和风环境有重要影响^[6]；较高反照率的立面及铺地材料的使用可减少庭院太阳辐射吸收进而降温^[7]；植被等景观要素主要通过遮阴、防风及蒸腾作用实现庭院热环境改善^[8]。对于庭院式校园建筑改造，庭院的几何形状与朝向相对确定，在经济成本与施工时长等客观因素的限制下，开放架空空间、增设遮阳构件、更换立面材质、改变庭院铺地及植被布置等措施较为实用普遍。

目前对于学校庭院热环境的研究，主要集中于建筑设计前期的几何形态控制和改造前后庭院热舒适度比较，对庭院改造策略与其室外热舒适度的联系缺乏进一步讨论。故本研究建立岭南地区典型校园庭院模型，采用环境模拟及控制变量的方法，定性与定量相结合分析庭院四类改造措施（架空空间、遮阳、内立面、下垫面）的效果，对比分析改造策略与庭院热环境物理要素以及热舒适度的关联，并提出优化策略，为岭南校园建筑改造和热环境优化提供新思路。

1 研究对象

1.1 庭院原型

在教学需求、规范限制等因素的影响下，岭南地区中小学校的庭院建筑存在一些普遍建设规律。本研究以岭南地区典型城市深圳为例，选取市内不同区域的 30 所中小学样本（均建成于 2000 年前后），统计分析校园建筑的庭院形式、尺寸、朝向及层数等特征以总结其一般形式。根据表 1 所示，将岭南中小学校园庭院形式归纳为“回字型”“U 字型”“U 字+连廊型”三类，且后者应用最为广泛。庭院的平均长度约 58m，平均宽度约 45m，长宽比均值约为 0.8。校园建筑一般 4-5 层且多为南北朝向。根据上述结果，结合建筑结构设计及《中小学校设计规范》等标准，将中小学校庭院的基本原型设定为正南北朝向的“U 字+连廊型”形式，建筑高 20m，长 60m，宽 48m，中庭尺寸为 48m×28m，该范围即为后续热环境模拟的观测区域（图 1）。庭院原型建筑墙体材质设定为混凝土，庭院铺地材质为水泥。

表 1 深圳市中小学典型样本的庭院类型归纳（图片来源：作者自绘）

庭院类型	深圳市中小学典型样本									
回字型										
U 字型										
U 字+连廊型										

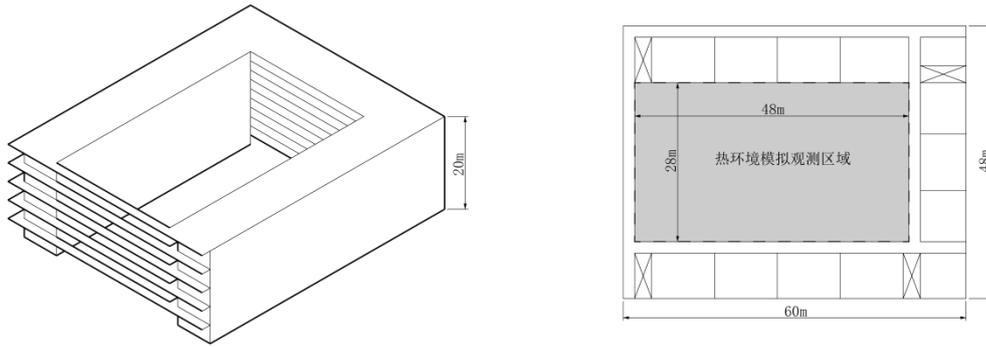


图1 岭南中小学典型庭院原型及热环境模拟观测区域示意图（图片来源：作者自绘）

1.2 改造策略

为节省经济成本、缩短施工周期，老旧校舍的更新改造侧重于在原有建筑的基础上进行尽可能小的操作。因此，结合庭院几何形态、立面材质、下垫面铺装和景观要素等特征，选取四类主要改造对象：架空空间、遮阳、庭院内立面及下垫面。

基于这四类对象，将改造措施根据设计要素进一步划分：架空空间包括架空朝向与架空长度（ d 为架空开口长度， L 为庭院东侧边长）；遮阳分为垂直遮阳（ ρ 为遮阳格栅密度）和水平遮阳（ s_1 为水平遮阳面积， S 为庭院面积）；立面主要指立面材质；下垫面则包含下垫面材质及植被覆盖（ s_2 为草地覆盖面积）。不同改造策略所对应的庭院原型变体如下表2所示：

表2 四类庭院被动式改造策略（图片来源：作者自绘）

改造对象	原型示意	设计要素	庭院原型变体示意图
架空空间		架空朝向(A)	
		架空长度(B)	
遮阳		垂直遮阳(C)	
		水平遮阳(D)	
内立面		立面材质(E)	
下垫面		下垫面材质(F)	
		植被覆盖(G)	

2 研究方法

基于性能模拟技术的岭南地区中小校园庭院改造热舒适性研究及优化的研究框架如图 2 所示。本研究通过建立岭南地区中小校园庭院原型，提出四种改造策略，采用性能模拟技术（ENVI-met）及控制变量的方法对特定时段内庭院原型及改造后模型的室外热环境进行模拟分析及评估，同时将庭院观测区域 PET 分布及 PET 均值（mPET）作为热舒适评价的综合指标，定性与定量相结合分析不同改造策略的效果及影响，并通过数理统计的方法对比得出改造策略与环境物理要素以及热舒适度的关联，最终得出基于热舒适提升的岭南校园庭院改造优化策略。

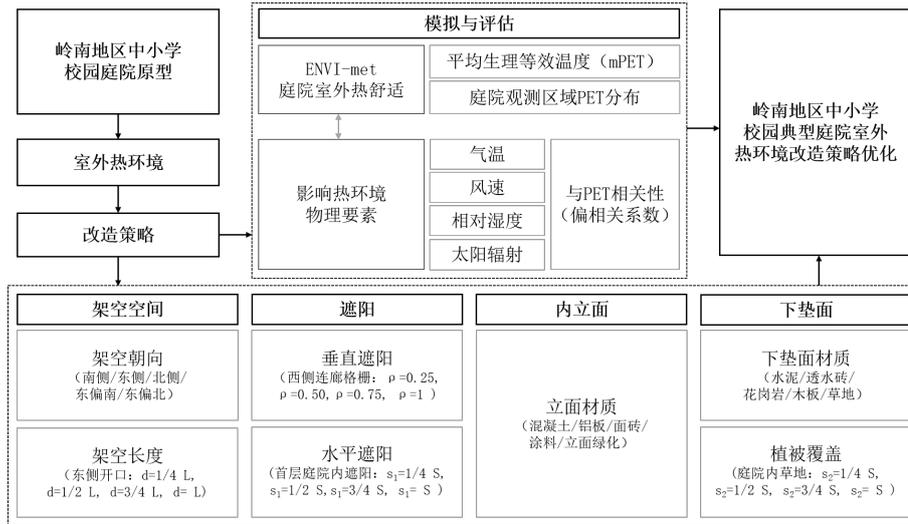


图 2 研究框架（图片来源：作者自绘）

2.1 热环境模拟

岭南地区夏季炎热高湿且普遍长达八个月之久，近年来随着全球变暖加剧，极端高温天气更是频发。因此，岭南地区室外热环境的改善以夏季最为严峻，故校园庭院改造时应首先考虑夏季的热舒适提升。同时，结合中小校园师生在校时间及主要活动发生时段安排，平均气温最高的 7-8 月为暑假，校园内师生人数较少，空间使用频率不高。因此，确定模拟时段为 6 月，选取典型模拟时间为夏至日（6 月 21 日）8-18 时。

研究选取 ENVI-met 软件进行庭院热环境模拟，其对于气象因素及其相互作用的考虑较为全面，且已经过实测与模拟值校验，可适用于小尺度庭院微气候的动态模拟。表 3 为庭院原型及改造方案的模拟条件（具体气象条件参照当地 EPW 文件）。由于中小校园庭院以服务学生活动为主，模拟对象设定为儿童（10 岁男性，夏季着装），热舒适指标 PET 计算高度设定为 1.4m。

表 3 ENVI-met 模拟条件

深圳	22.55N; 114.10E (UTC+8)
模拟日期及时段	夏至日（6 月 21 日）8-18 时
模型尺寸及单元网格	X-80 Y-75 Z-20 (dx=2m, dy=2m, dz=1m)
风速及风向	1-4m/s, 20° -160°
气温	28.5-31.4℃
湿度	19.9-24.8g/Kg

2.2 热舒适评价指标

庭院热环境直接影响室外人体的热舒适性，生理等效温度（PET）是较为常用的室外热环境评价指标。由于其受气候、环境及热适应等因素影响，需要根据具体气候条件对指标进行适当修正以确保评价准确性，表 4 即为现有研究中岭南夏季 PET 的热感觉区间^[9]。

表 4 岭南地区夏季 PET 热感觉温度区间

指标	冷	凉	舒适	暖	热	炎热	酷热
PET(°C)	<11.3	11.3-19.2	19.2-24.6	24.6-29.1	29.1-36.3	36.3-53.6	>53.6

但岭南地区夏季室外异常湿热，室外 PET 难以达到舒适区间且普遍集中于炎热范围，难以根据热感觉区间占比进而判断庭院热舒适性分布的异同。因此在本研究中选取庭院模拟观测区域的 PET 均值（mPET）作为评估热环境优化指标，同时综合 PET 的时空分布特点及数据的统计学特征对比分析庭院热舒适性。

3 研究结果及分析

夏至日庭院原型的平均热舒适度变化结果如下图 3 所示，全天庭院区域 PET 均值较高，总体呈现先上升后下降的变化趋势。结合中小学室外活动安排的一般特点，选取一天中庭院 PET 的最高值 15 时作为典型分析时段，横向比较分析不同改造策略对庭院热舒适的影响。

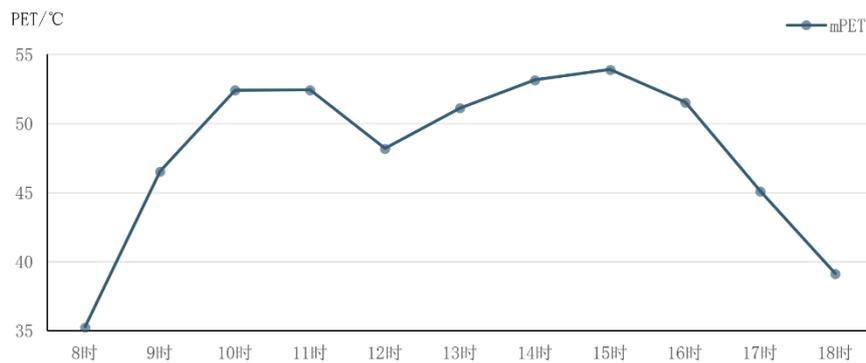


图 3 夏至日庭院原型平均热舒适变化特征

庭院区域 PET 受到气温、相对湿度、太阳辐射和风速等物理要素的影响，同时各要素之间相互影响，因此对不同改造策略的 PET 结果与各物理量进行偏相关分析，判断改造措施如何通过改变环境物理要素进而影响庭院热舒适度。由于温度与湿度呈强耦合关系（相关系数近似-1），故仅选择其一（相对湿度）参与偏相关分析。

3.1 架空空间

夏至日 15 时的庭院原型及两类架空开口策略（A、B 两组）的热舒适模拟结果如图 4 所示，能直观观察到架空空间开口附近的庭院区域 PET 明显下降，热舒适度得以提升。图 5 则展示了不同架空朝向（A 组）及开口长度（B 组）庭院模拟观测区域的 PET 的分布。A 组改造后的 mPET 均有下降，其中南侧架空开口（A-1）的 mPET 最小，但整体 PET 数值分布较分散，庭院区域 PET 分布不均，出现明显不适区，其可能原因是在东南向的主导风向下，庭院首层南侧开口会加剧内部风环境的不稳定性；相比之下东侧开口（A-2）的 mPET 较小的同时 PET 总体分布紧凑，庭院整体热舒适度相较原型更均匀地提高。而对比在同侧不同位置架空开口的三组（A-2、A-4、A-5），

在庭院一侧中部开口（A-2）的PET分布整体偏低，mPET也更小，中部开口对于庭院风环境的影响更为直接，因此其对庭院热舒适的改善也优于在庭院一侧偏角部开口的情况。

图5的B组中各方案的mPET下降幅度大于A组，且数据分布更离散，低值量增多，说明改造后庭院有效降温区域面积增大，但加重了庭院内PET分布不均的现象；随着架空层开口长度的增加，mPET逐渐降低，而在达到庭院东侧边长的3/4（B-3）后又有所增长，说明架空层开口长度适中即可达到较好的热环境改善目的，同时也有利于学校节约空间成本。

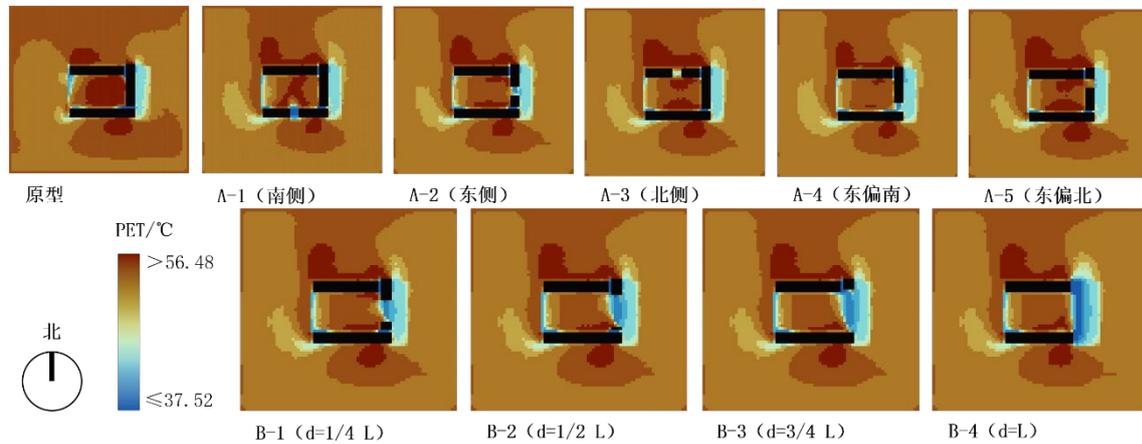


图4 架空空间改造庭院热舒适模拟结果（图片来源：作者自绘）

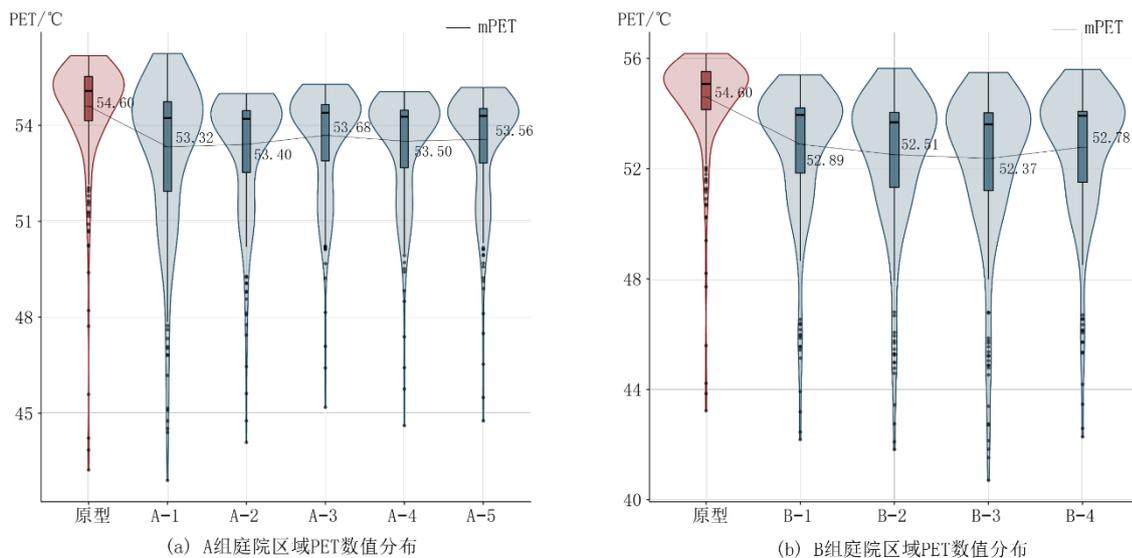


图5 架空空间改造庭院区域PET小提琴图（图片来源：作者自绘）

比较表5中两组的偏相关结果，风速与太阳辐射对庭院PET的影响极为显著 ($p < 0.01$)，其中风速与PET呈负相关关系，风速越高，PET越低，庭院热舒适性越强。太阳辐射则相反，对PET起促进作用。其中太阳辐射对PET的影响普遍大于风速因素，而风速的相关系数整体波动高于太阳辐射的数值，证明改变架空层朝向的策略更多地是通过改变庭院内部的风环境进而影响PET。而相对湿度对PET的影响不显著且系数偏小，可能是由于夏季岭南室外空气湿度整体偏高且较为平均，故后续将集中讨论风速与太阳辐射两个最主要影响PET变化的物理因素。

表 5 架空空间改造庭院区域 PET 与物理因素的偏相关系数（注：*表示 $p < 0.01$ ）

分析变量	控制变量	原型	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
相对湿度	风速&太阳辐射	-0.167	-0.202	-0.249	-0.327	-0.001	-0.165
风速	相对湿度&太阳辐射	-0.774*	-0.786*	-0.612*	-0.391*	-0.808*	-0.789*
太阳辐射	相对湿度&风速	0.892*	0.888*	0.606*	0.463*	0.892*	0.885*

分析变量	控制变量	原型	B-1	B-2	B-3	B-4
相对湿度	风速&太阳辐射	-0.167	0.219	0.228	0.092	0.127
风速	相对湿度&太阳辐射	-0.774*	-0.861*	-0.862*	-0.842*	-0.816*
太阳辐射	相对湿度&风速	0.892*	0.889*	0.903*	0.897*	0.905*

3.2 遮阳

图 6 展现了两种遮阳策略（C、D 两组）在典型夏季高温时段的热舒适模拟结果，庭院整体 PET 有所下降，且在遮阳附近位置 PET 降低显著。通过比较图 7 中两组模拟观测区域的 mPET 数值，水平遮阳（D 组）的 mPET 普遍更小，说明其对庭院 PET 的降低作用比垂直遮阳策略（C 组）更有效。C 组中随着庭院西侧遮阳格栅密度的增加，mPET 几乎不变，PET 数值的分布更加稳定集中，表明较高密度的西侧垂直遮阳能使庭院热舒适趋于稳定，但由于其在夏季下午时段产生的遮阴区域有限，难以更高效地降低 PET。而 D 组中庭院的 mPET 随着首层水平遮阳面积的增加先下降后回升，当遮阳面积为庭院面积的 1/2（D-2）时 mPET 最小；同时 PET 数值的离散程度逐渐降低，在遮阳全覆盖庭院的极端情况（D-4）下，庭院整体热环境较为稳定，此时庭院各处 PET 的值差别不大。

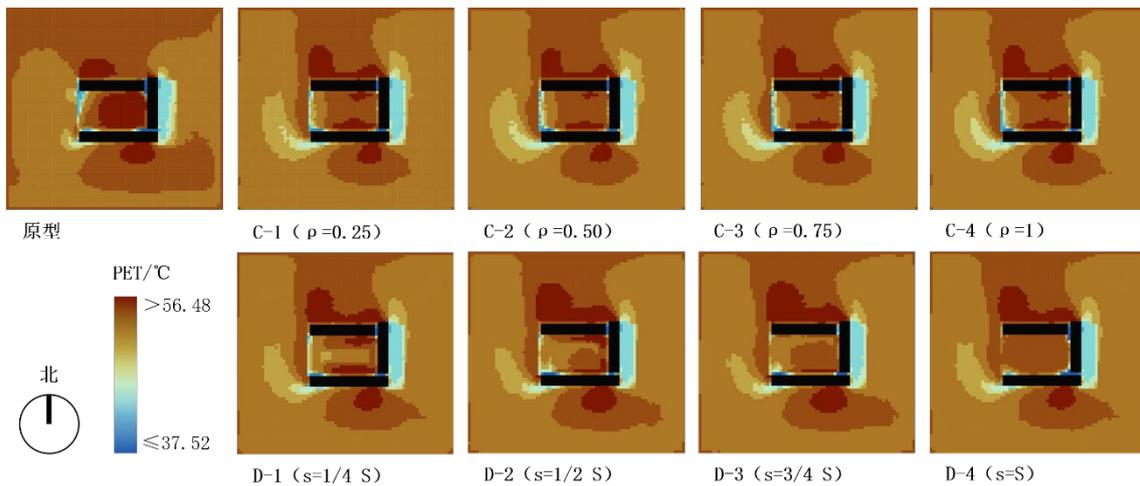


图 6 遮阳改造庭院热舒适模拟结果（图片来源：作者自绘）

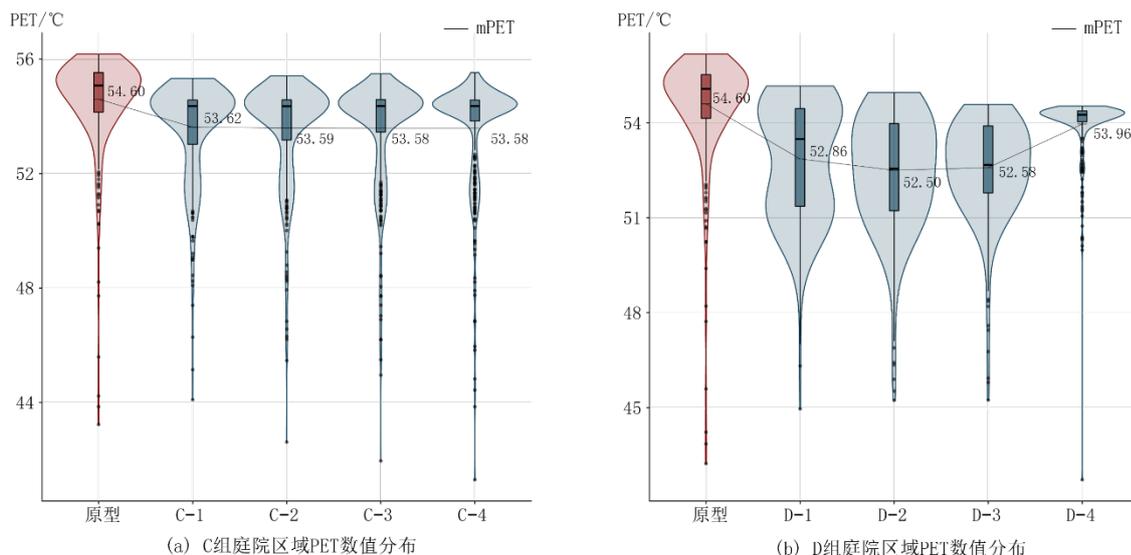


图 7 架空空间改造庭院区域 PET 小提琴图（图片来源：作者自绘）

在表 6 的偏相关分析中，C 组太阳辐射因素的偏相关系数对比原型的波动大于风速的变化，且该系数随着西侧连廊的遮阳密度的增加而减小，表明垂直遮阳提高庭院热舒适性的关键是减少庭院的太阳辐射量。而水平遮阳（D 组）由于集中于庭院首层，对于庭院的风、热环境均有明显改变，其风速与太阳辐射的偏相关系数均有明显浮动。随着水平遮阳面积的增加，风速的偏相关系数由小于太阳辐射逐渐增大反超，说明在首层水平遮阳面积扩大到一定程度时，风环境的改变更显著地影响着庭院热舒适度，当遮阳面积超过 3/4 庭院面积（D-3）后，庭院内风速降低，mPET 则呈现出回升的趋势，整体 PET 分布也偏高，庭院总体热舒适度反而有所降低。

表 6 遮阳改造庭院区域 PET 与物理因素的偏相关系数（注：*表示 $p < 0.01$ ）

分析变量	控制变量	原型	C-1	C-2	C-3	C-5
风速	相对湿度&太阳辐射	-0.774*	-0.725*	-0.720*	-0.719*	-0.735*
太阳辐射	相对湿度&风速	0.892*	0.720*	0.760*	0.797*	0.845*

分析变量	控制变量	原型	D-1	D-2	D-3	D-4
风速	相对湿度&太阳辐射	-0.774*	-0.798*	-0.839*	-0.895*	-0.798*
太阳辐射	相对湿度&风速	0.892*	0.909*	0.763*	0.726*	0.635*

3.3 内立面

模拟时段下不同内立面材质（E 组）对应的 PET 结果如图 8 所示，庭院内建筑附近的 PET 数值有所下降。根据图 8 庭院区域 PET 数值分布图可以得到：mPET 从小到大依次为立面绿化 < 面砖 < 涂料 < 铝板 < 混凝土，且立面绿化（E-4）的效果最为明显，说明具有较高的反照率与较大的比热容等特性的墙体立面材料能减少太阳辐射的吸收，降低建筑温度，进而减少建筑与庭院的热交换，优化庭院热舒适；同时植物的蒸腾作用也具有降低空气温度，改善庭院热环境的作用。而改造后 PET 数值离散程度加剧，说明立面材质对于庭院热环境作用范围有局限，对于距离较远的区域改善作用较小。

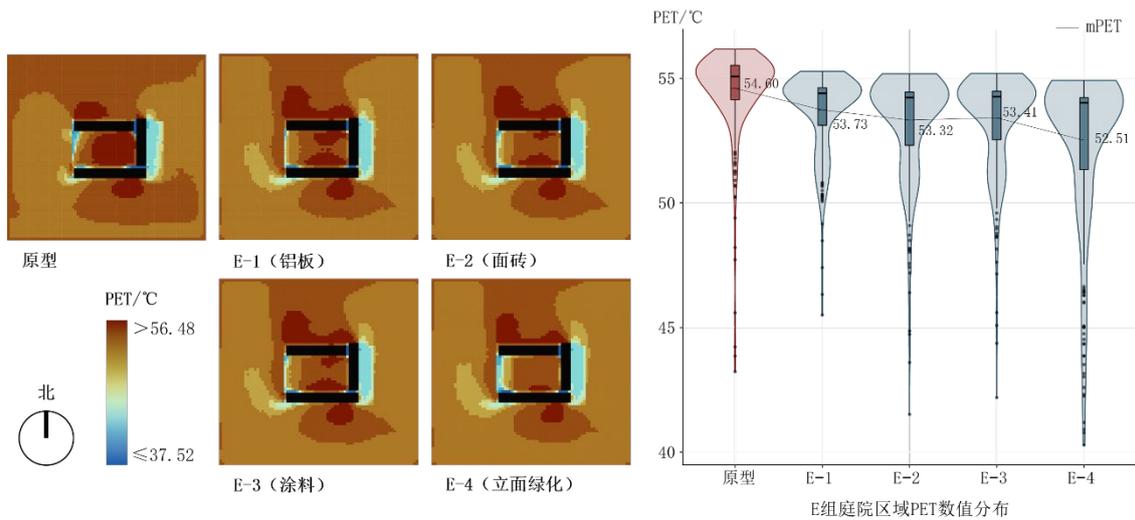


图 8 内立面改造庭院热舒适模拟结果及庭院区域 PET 小提琴图 (图片来源: 作者自绘)

表 7 内立面改造庭院区域 PET 与物理因素的偏相关系数 (注: *表示 $p < 0.01$)

分析变量	控制变量	原型	E-1	E-2	E-3	E-4
风速	相对湿度&太阳辐射	-0.758*	-0.733*	-0.868*	-0.739*	-0.733*
太阳辐射	相对湿度&风速	0.860*	0.828*	0.907*	0.849*	0.828*

此外根据表 7, 相比原型, E 组太阳辐射的偏相关系数大于风速, 且波动更强, 说明此时太阳辐射是主要响应立面材质变化的物理要素, 同样印证了不同特性的立面材质影响着建筑维护结构对于太阳辐射的吸收与传递, 进而影响了建筑围合庭院的热环境与舒适度。

3.4 下垫面

下垫面材质选择 (F 组) 和植被覆盖 (G 组) 的典型时段热舒适模拟结果如下图 9 所示, 对比原型结果, 庭院中央的 PET 均有下降, 与图 10 中所显示的两组改造后的 PET 数值分布向下偏移、低值占比增多且 mPET 明显降低相呼应, 均表明下垫面相关改造策略可有效改善庭院热环境。此外, 图 10 中 F 组的 mPET 以草地 < 花岗岩 < 透水砖 < 木板 < 水泥的顺序由小至大依次排列, 说明下垫面的性质不同会对庭院热环境产生不同的影响: 草地在夏季下午时段除受太阳辐射的影响, 还存在蒸腾作用和下层土壤热交换等因素的影响, 所以降低 PET 的幅度更大; 其他铺地材质则主要受反照率等材料性质的影响, 反照率高, 太阳辐射吸收率低, 庭院 PET 也随之减小。而 G 组中随着庭院植被覆盖面积的增加, mPET 几乎不变, 植被面积增大到庭院面积的 1/4 (G-1) 以上之后, 对 PET 的调节显示出明显的边际效应。

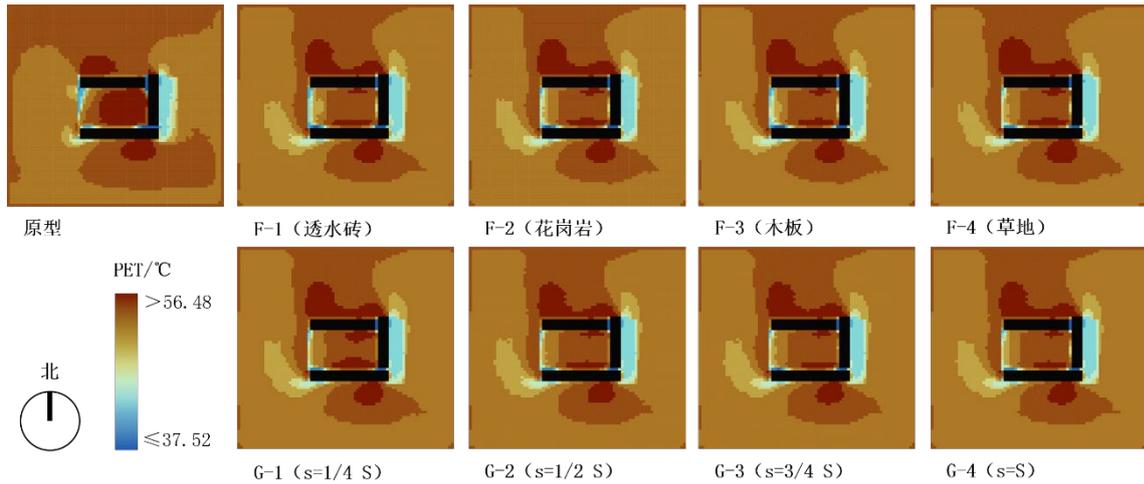


图9 下垫面改造庭院热舒适模拟结果（图片来源：作者自绘）

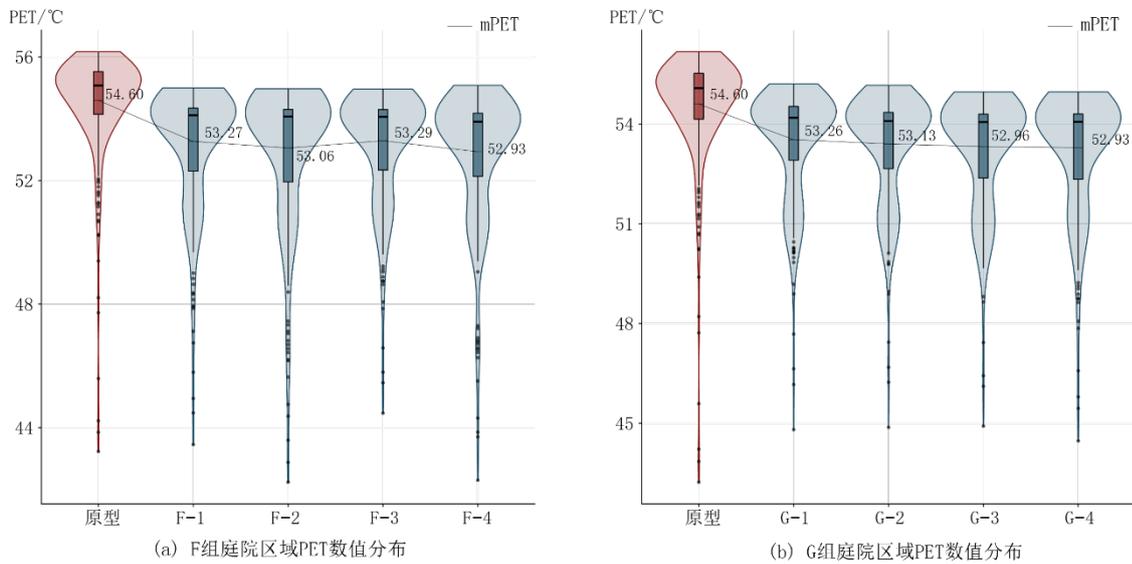


图10 下垫面改造庭院区域 PET 小提琴图（图片来源：作者自绘）

表8 下垫面改造庭院区域 PET 与物理因素的偏相关系数（注：*表示 $p < 0.01$ ）

分析变量	控制变量	原型	F-1	F-2	F-3	F-5
风速	相对湿度&太阳辐射	-0.774*	-0.755*	-0.875*	-0.743*	-0.736*
太阳辐射	相对湿度&风速	0.892*	0.804*	0.759*	0.855*	0.855*

分析变量	控制变量	原型	G-1	G-2	G-3	G-4
风速	相对湿度&太阳辐射	-0.774*	-0.736*	-0.770*	-0.839*	-0.808*
太阳辐射	相对湿度&风速	0.892*	0.855*	0.866*	0.889*	0.882*

对比原型的偏相关系数，从表8可以看出改变庭院下垫面材质的策略（F组）中太阳辐射的系数变化量普遍大于风速，这可能是由于材质以硬质铺地为主，对风速的影响较小，因此主要通过影响太阳辐射进而影响庭院PET的结果。而G组中随着庭院植被面积的增加，风速对PET的偏相关系数波动增大，说明在一定范围内，庭院绿化主要影响太阳辐射；而在更大面积的植被布置

时，植被对于庭院风环境的改变成为影响 PET 的更主要因素。这也进一步说明当植被面积增大到一定程度时，尽管可以有效减少太阳辐射量，但同时也会降低近地风速，两者相互作用使得 PET 趋于稳定。

4 结论

本文通过 ENVI-met 室外热环境模拟，研究了岭南地区中小校园庭院的改造策略及优化方案。以 PET 分布特性及 mPET 为评价指标，定性定量结合地分析四种被动式改造策略的庭院热舒适效果。梳理改造策略与环境物理要素的影响机制，建立庭院改造策略与热舒适度的关联，决策同种改造对象下较优的设计方案，总结出基于热舒适提升的校园庭院改造优化策略。主要结论如下：

(1) 架空空间朝向及长度、遮阳位置及面积、内立面材质、铺地及绿化覆盖率均对庭院热环境存在显著影响，且主要通过影响风速和太阳辐射两类环境物理因素影响庭院热舒适性，其中风速与 PET 呈负相关，太阳辐射与 PET 呈正相关关系；

(2) 在夏季主导东南风向下，在首层南侧或东侧打开架空层可以更有效地改善庭院风环境，提升庭院热舒适度，且以在东侧中部开口约 $1/4-3/4$ 的庭院边长为宜；

(3) 夏季下午时段水平遮阳比垂直遮阳更高效，0.25-0.5 密度的西侧垂直遮阳和 $1/4-1/2$ 庭院面积的首层遮阳就能显著减少庭院太阳辐射，提高热舒适度，超出该范围后边际效益明显；

(4) 较高反照率的内立面与下垫面材质均会减少太阳辐射吸收进而提升庭院热舒适性，其中立面绿化与草地覆盖均为更高效改造策略，考虑到庭院活动需求与植被对庭院风环境的影响，建议草地覆盖面积在庭院面积的 $1/4-1/2$ 左右。

结语

研究基于性能模拟技术，对所提取原型及不同改造策略下的岭南校园庭院热环境进行模拟，通过定性定量结合分析模拟结果，对比筛选针对架空空间、遮阳构件、庭院内立面及下垫面四类改造对象的设计优化方案，挖掘改造策略与环境物理因素及热舒适的关联机制，提炼适用于现有校舍改造的设计手段，实现通过合理被动式改造策略有效提升庭院室外热舒适的目标。本研究为岭南地区校园庭院建筑的改造与热环境优化提供了科学的依据和实用的参考，为未来校园建筑的可持续发展奠定了基础。

图表来源：

表 4：引自参考文献 [9] Fang Z, Feng X, Xu X. et al. Investigation into outdoor thermal comfort conditions by different seasonal field surveys in China, Guangzhou [J]. Int J Biometeorol, 2019, 63(10):1357 - 1368.

其余图表均为作者自绘

参考文献

- [1] Höppe, P. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment[J]. *Int J Biometeorol*, 1999, 43(2), 71 – 75.
- [2] Jamei E, Rajagopalan P, Seyedmahmoudian M. et al. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54:1002 – 1017.
- [3] Lai D, Liu W, Gan T. et al. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 337 – 353.
- [4] Nasrollahi N, Hatami M, Khastar S. et al. Numerical evaluation of thermal comfort in traditional courtyards to develop new microclimate design in a hot and dry climate[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 35: 449 – 467.
- [5] 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.
- [6] Aldawoud A. Thermal performance of courtyard buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40 (5): 906 – 910.
- [7] Chatzidimitriou A., Yannas S. Microclimate development in open urban spaces: The influence of form and materials[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 108: 156 - 174.
- [8] Zhao Y, Chen Y, Li K. A simulation study on the effects of tree height variations on the façade temperature of enclosed courtyard in North China[J]. *Building and Environment*, 2022, 27(B):108566
- [9] Fang Z, Feng X, Xu X. et al. Investigation into outdoor thermal comfort conditions by different seasonal field surveys in China, Guangzhou [J]. *Int J Biometeorol*, 2019, 63(10):1357 – 1368.