

路面反射率对室外热舒适度的提升效应研究

林宇凡¹, 田宇航¹, 李安琪², 杨秋侠¹, 李 宁³, 李 婷¹

(1. 西安建筑科技大学 城市发展与现代交通学院, 陕西 西安 710055; 2. 浙江天正设计工程有限公司, 浙江 杭州 310012;

3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 针对路面反射率对室外热舒适度的提升效应, 其量化分析还不够清晰, 采用透水/非透水下垫面的现场实测和ENVI-met数值模拟对比分析, 研究发现: 反射率与孔隙率存在一定相关性, 反射率随孔隙率增大而减小; 反射率在潮湿状态低于干燥状态, 随着下垫面由潮湿变为干燥, 其反射率也逐渐变大; 透水混凝土下垫面因具有较低的反射率, 可以有效改善室外热环境; 多个优化因素组合, 如低反射率+潮湿状态+树荫配置, 使PMV值大致降低0.3, PET值大致降低2℃。研究成果对改善城市室外活动空间的环境质量, 实现绿色低碳出行环境具有重要的现实意义。

关键词: 反射率; 现场实测; 数值模拟; 透水/非透水下垫面; 室外热舒适度

中图分类号: TU11; U41

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0243-06

Study on Enhancement Effect of Pavement Reflectivity on Outdoor Thermal Comfort

LIN Yufan¹, TIAN Yuhang¹, LI Anqi², YANG Qiuxia¹, LI Ning³, LI Ting¹

(1. School of Urban Development and Modern Transportation, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Zhejiang Tianzheng Design Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310012, China; 3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Aiming at the enhancement effect of pavement reflectivity on the outdoor thermal comfort, its quantitative analysis is not clear. The field measurement and ENVI-met numerical simulation of permeable / non-permeable underlying surface are used for comparative analysis. The research finds that there is a certain correlation between reflectivity and porosity, and the reflectivity decreases with the increase of porosity. The reflectivity in the wet state is lower than that in the dry state, and the reflectivity gradually increases as the underlying surface changes from wet to dry. The underlying surface of permeable concrete can effectively improve the outdoor thermal environment because of its low reflectivity. The combination of multiple optimization factors, such as low reflectivity + damp conditions + tree shade configuration, will make the PMV value reduce by approximately 0.3 and the PET value reduce by approximately 2℃. The research result has the important practical significance for improving the environmental quality of urban outdoor activity space, and realizing the green and low-carbon travel environment.

Keywords: reflectivity; field measurement; numerical simulation; permeable / non-permeable underlying surface; outdoor thermal comfort

0 引言

根据国家统计局公布的数据,截至2023年底,我国城镇化率为66.1%,城镇人口达到9.3亿左右。不断扩大的城市规模,引发了城市下垫面的显著变化,

这是热岛效应产生的主要原因之一。

随着人们对于生活品质需求的提高,绿色交通出行理念的普及,大众希望获得健康、舒适、低碳、较高满意度的室外环境品质,特别是良好的室外活动空间,能促进居民的户外活动热情,加强居民之间的和谐互动^[1]。相关文献发现,城市室外热环境质量影响人们热舒适度评价,其中,空气温度、湿度、风速、太阳辐射等要素是重要因素,而植物遮蔽则通过减少太阳辐射量,对热舒适也起到了重要作用^[2-3]。

改善室外热环境的方法多种多样,其中绿化、水体、天井因子和遮阳设施对人体热舒适度的影响尤

收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(52308465);陕西省住房和城乡建设厅科研开发项目(Z20210451);校级前沿交叉领域培育专项(X20240125)

作者简介: 林宇凡(1974—),女,博士,副教授,从事交通运输规划与管理的教学与科研工作。

为显著。这些要素在降温、增湿等方面具有显著的积极效果,已被国内外学者广泛认可,证实为改善热环境的关键途径^[4-7]。

城市中的某些场地,如小型活动场地、步行街、人行道、广场等,其首要的功能是通行和休憩,我国《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2016)中有具体的设计通行能力和净空要求,而水体、绿化、占用有限的使用面积,影响了人们的活动和通行^[8]。遮阳设施可能无法满足净空要求,在较大空间尺度的实施会有可行性问题,因此多数时候这些场地采用不透水的混凝土或沥青等硬质下垫面,在夏季,这些材料的蒸腾作用微弱,通常还具有较高的热容量和显著的热惰性,在吸收并储存热量后,通过长波辐射与对流换热等方式释放,这一过程会导致近地面空气温度升高,从而加剧城市热岛效应,进而恶化场地的热环境质量^[9]。近些年,海绵城市在我国得到了广泛推广,而透水下垫面作为主要载体,成为改善热环境质量的重要手段之一。研究表明,下垫面的热湿物理特性(如含水率、蒸发率和反射率)是影响热环境质量的关键因素,尤其是反射率,被定义为入射光与反射光的比例,能够通过反射太阳辐射减少路面对太阳能的吸收^[10]。Wu通过实验室模拟测试,分析了几种常见铺装材料的热行为,结果显示,在白天太阳辐射下,沥青和开级配铺装材料通常吸收更多的热量且温度较高,但反射的辐射较少,降低了周围的空气温度,在一定程度上缓解了附近人体和建筑的热不适感^[11]。郭建国等人通过现场测量,获取了不同混凝土材料的反射率值,并分析了地表温度随反射率变化的规律,从而得出其对室外热环境的不同影响^[12-13]。杨燕等研究发现,不同下垫面的反射率对城市小气候有重要影响。较低的地表温度会降低辐射温度,从而提升户外活动者的热舒适度^[14-15]。李朝昌等人测试了干燥和潮湿条件下的密级配沥青混合料、多孔沥青混合料、水泥混凝土和多孔水泥混凝土的反射率及内部温度,并分析了材料种类、孔隙率和潮湿状态对这些参数的影响,在潮湿状态下,沥青混合料的反射率呈现先下降后上升,而水泥混凝土的反射率则随水膜增厚而逐渐降低^[16]。

已有文献研究证明,下垫面反射率是影响室外热环境质量的重要原因之一,目前对于不同材质下垫面的反射率,以及不同下垫面状态的反射率和不同配置下垫面的反射率,其量化分析还不够清晰,此外,反射率对室外热舒适度的提升效应,目前的研究

也不够清晰,因此,本文基于透水/非透水下垫面的对比研究,采用现场实测与 Envi-met 数值模拟的研究方法,分析潮湿与干燥状态下的反射率差异和变化特性,以及对室外热舒适度分布特征的影响,研究成果对改善城市室外活动空间的环境质量,提升室外热舒适度,实现绿色低碳出行环境具有重要的现实意义。

1 研究方法

1.1 现场实测概述

1.1.1 场地概况

实测地点选在西安建筑科技大学校园内的田径场外一片小型活动区域,测量时间为暑假期间,场地上几乎无人,确保了数据不受人群干扰。实测时间设定在上午 10:00 至下午 4:00,天气晴朗,场地周围无树荫、墙体遮挡,且无水体设施。

1.1.2 实测下垫面材料

透水混凝土是一种由水泥、水和胶结材料与高质量的单一粒径或间断级配的骨料混合而成的材料,具有一定的孔隙率。试件制备首先确定试件设计孔隙率以便后续计算材料用量,其次计算骨料体积和水泥浆体积,通过设计的水灰比和水泥用量确定水泥浆体积,将其混合并使之成型,脱模后进行湿养护以确保水泥充分水化。体积法计算公式如下:

$$\frac{M_a}{\rho_a} + \frac{M_c}{\rho_c} + \frac{M_w}{\rho_w} + \frac{M_{ma}}{\rho_{ma}} + \frac{M_{ca}}{\rho_{ca}} + V_i = 1 \quad (1)$$

式中: M_a 、 M_c 、 M_w 、 M_{ma} 、 M_{ca} 为每 m^3 中粗骨料、水泥、水、掺合料、外加剂质量, kg/m^3 ; ρ_a 、 ρ_c 、 ρ_w 、 ρ_{ma} 、 ρ_{ca} 分别为粗骨料、水泥、水、掺合料、外加剂的表现密度, kg/m^3 ; V_i 为空隙率, %。

依据《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)(下文简称规程),实测透水水泥混凝土下垫面选用 C25 强度等级,水泥的抗压强度为 45.2 MPa,硬度等级至少为 42.5R,为确保透水水泥混凝土试件的透水性能,选用粒径在 4.75~9.50 mm 的单一粒径粗集料,并以水泥浆包裹其表面,不掺入细砂,以改善混凝土的和易性并简化成型过程^[17]。试件的表现密度为 3 050 kg/m^3 ,尺寸为 300 mm × 300 mm × 100 mm,厚度不小于 80 mm。表现密度 2 700 kg/m^3 ,堆积密度 1 550 kg/m^3 。根据规程要求,当连续孔隙率超过 10% 且水胶比在 0.25~0.35 的范围内时,可满足透水性要求。因此,本试验选取了空隙率为 15%、20% 和 25% 的参数组合,并将水胶比设定为 0.25。表 1 为配合比

计算参数,通过计算得到对应配合比,结果见表2。

表 1 配合比计算参数	
内容	参数
孔隙率/%	15/20/25
水胶比	0.25
表观密度/(kg·m ⁻³)	2 700
堆积密度/(kg·m ⁻³)	1 550
粒径/mm	4.75~9.50
水泥表观密度/(kg·m ⁻³)	3 050
水密度/(kg·m ⁻³)	1 000

表 2 各透水混凝土试件配合比	
孔隙率%	配合比(粗骨料:水泥:水)
15	12.26:4:1
20	14.82:4:1
25	18.72:4:1

非透水水泥混凝土依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011),采用C25普通非透水混凝土作为面层材料,使用42.5R硅酸盐水泥,碎石最大粒径为40 mm,砂率为29%^[18]。试件厚度不少于80 mm,尺寸300 mm×300 mm×100 mm,设计配合比为水泥:水:砂:石=1:0.54:1.94:3.45,满足强度、工作性和耐久性要求。配制出的试件见图1。

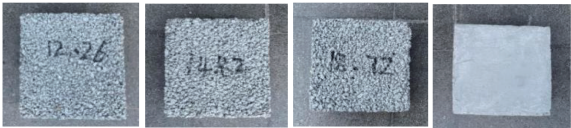


图1 现场实测对象

1.1.3 实测仪器和步骤

太阳总辐射传感器(型号为JXBS-3001-ZFS,产地为中国山东,测量范围为0~1 500 W/m²,适用环境温度为一45~85 ℃)测定太阳辐射量与太阳辐射反射量,每分钟记录一次数据,每小时汇总采集一次(见图2)。采用电子秤(型号为30 kg计价秤,产地为中国浙江,称量范围在0~30 kg,测量精度为0.005 kg)记录试件质量变化,其他装置有浸泡试件的塑料盆、支架、锡纸盒等。



图2 反射率实测

为降低单次测量的偶然性影响,本实验采用重复测量,每类试件均测量三组,包含15%、20%、25%

孔隙率的透水混凝土试件和一块非透水混凝土试件。测量时间为上午10:00至下午16:00,每隔1 h记录一次,结果取多次测量的平均值。

不同孔隙率试件的反射率测量步骤如下:先确定试件孔隙率,之后采用反射率测定方法(见图2)将太阳辐射测量仪放置在试件上方,仪器朝上测量太阳总辐射量,朝下测量反射辐射量。反射率为反射辐射量与太阳总辐射量之比。

潮湿状态下反射率的测定步骤:先将试件放入水中直到制成饱水状态。之后明确各类试件的孔隙率。最后测定各试件反射率(方法同上)。

1.2 ENVI-met数值模拟

ENVI-met由德国的迈因茨大学气候研究专家Michael Bruse博士及其团队开发,经过多年的优化和更新,已成为研究城市微气候和热环境影响的重要工具^[19]。主要用于模拟和分析城市环境中的热环境、空气流动、湿度、污染物扩散等微气候现象。该软件能够模拟不同地表材料、建筑物布局、绿化和水体等配置对城市微气候的影响。

1.2.1 模拟场地确定

数值模拟场地位于西安建筑科技大学田径场西侧的室外空旷活动场地,该场地长40 m,宽12 m,场地西侧种植有行道树绿化,东侧有些许建筑矮墙体,下垫面材质为混凝土,场地面积为480 m²,属于典型的小型城市开放空间,与城市中常见的小型广场、步行街或活动区域相符,该场地功能以户外休憩与活动为主。场地两侧的绿化建筑矮墙体模拟了城市中常见的绿化与建筑遮蔽,其环境特征能够模拟典型的城市微气候条件。混凝土下垫面属于城市中使用广泛的铺装材料之一。符合针对室外活动空间热舒适度的研究,具有一定的代表性(见图3)。



图3 模拟场地

1.2.2 模型建立

建立场地模型前,依据现场实测的下垫面反射率参数,分别设置下垫面为潮湿/非潮湿两种状态和有白杨树/无白杨树两种绿化配置,在建模软件的

Space 板块中,设定区域面积为 40 m×12 m×30 m,以界定活动场地的模拟范围。网格分辨率设为 dx=2 m、dy=2 m、dz=2 m,模拟日期为西安随机典型炎热夏季天气,晴朗,气温变化较大(21~38 ℃),风速为 1 m/s。模拟从上午 6:00 开始,持续 12 h。

1.2.3 热舒适度评价指标

室外热舒适度的评价指标多采用预测平均投票数 PMV(predicted mean vote, PMV)、生理等效温度 PET(physiological equivalent temperature, PET)、湿球黑球温度 WBGT(wet-bulb globe temperature, WBGT)、通用热气候指数 UTCL(universal thermal climate index, UTCL)等。本文评价指标采用 PMV,它是考虑了多种因素,包括环境参数和人体参数(即模拟的人群为身高 1.75 m,体重 75 kg 的 35 岁男性,夏季衣着系数为 0.077 5 m²·K/W,代谢率为 66.93 W/m。)以预测群体对特定热环境的平均热感觉的综合指标。另一个评价指标为生理等效温度 PET,综合考虑了环境参数和人体参数等因素,用 RayMan 软件输出。

2 结果与分析

2.1 反射率

图 4 为各类试件反射率。发现非透水混凝土试件的反射率平均值为 0.329 8,大于透水混凝土试件,而透水混凝土试件反射率平均值分别为 0.203 9、0.187 0、0.185 0,表明孔隙率越大,反射率越小相关性分析结果表明,孔隙率与反射率之间的皮尔逊相关系数为-0.903,显示出高度负相关关系,且这种相关性具有显著性。依据 Anova 方差分析得回归方程 Y(反射率)=-0.617X(孔隙率)+31.792,相关系数 R²=0.815,分析结果揭示了孔隙率与反射率之间的负相关关系。非透水混凝土的反射率为 31.79%,而对于孔隙率为 15%、20% 和 25% 的透水混凝土,其反射率分别为 22.53%、19.45% 和 16.37%。数据表明,随着孔隙率的增加,反射率逐步下降,每增加 1 个单位的孔隙率,反射率大约减少 0.617%。

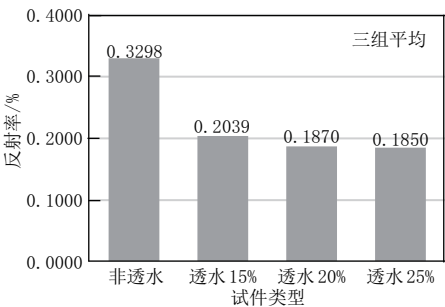
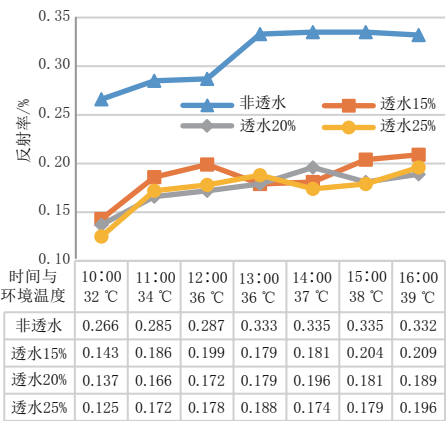


图 4 各类试件反射率

现场实测发现,试件的面层材料会影响反射率。透水试件表面粗糙,太阳光照射时,由于表面不平整,会产生漫反射,将辐射分散到各个方向,从而减弱了特定方向的反射。相较之下,非透水试件的表面较为平滑,使得反射的太阳辐射集中在特定方向上。有文献发现,通过对灰色陶瓷透水砖、普通混凝土透水砖、再生混凝土透水砖和透水混凝土等不同透水材料的反射率进行测量,发现这几种灰色透水材料的反射率相差不大。相较之下,密实混凝土的反射率更高,是因为其不仅为浅色,且具有光滑的表面结构。这一结果表明,透水材料的反射性能与表面特征密切相关,特别是颜色和粗糙度^[9]。

2.2 潮湿状态下的反射率

图 5 显示了潮湿状态下各试件反射率随时间的变化趋势。结果表明,非透水混凝土试件的初始反射率介于 0.21~0.26 之间,最终升高至 0.30~0.33。透水混凝土试件的初始反射率则为 0.12~0.15。最后可至 0.17~0.21。结果表明:一是试件在潮湿状态下的反射率低于干燥状态;二是随着试件从潮湿逐渐变为干燥,反射率逐步增加;三是试件完全干燥需超过 6 h,但反射率在约 3 h 后基本稳定。李朝昌等测试了不同洒水量的路面反射率,结果显示反射率与洒水量呈负相关,可能的原因是,试件吸水后表面颜色加深,从而导致反射率的下降^[16]。



(10:00为浸水取出后潮湿状态,随时间变化逐渐干燥)

图 5 潮湿状态各试件反射率随时间变化图

2.3 不同反射率对应的热舒适度分布特征

依据现场实测结果,确定反射率为 0.2(透水混凝土下垫面)和 0.35(非透水混凝土下垫面)。图 6 是数值模拟两种下垫面场地在典型时刻 12:00 的 PMV 分布特征图。发现 PMV 值在反射率为 0.2 的模拟场地比反射率为 0.35 的场地低。如表 3 所列,PMV 值逐渐变大,但在 15:00 后随着太阳辐射强度逐渐减

弱,PMV 值也开始降低。对比反射率为 0.35 下垫面,反射率为 0.2 下垫面的 PMV 值整体偏低约 0.10~0.22,对应的生理等效温度 PET 降低约 0.5~1.0℃,表明低反射率下垫面可改善人体热感觉和热舒适度评价。类似的,Salata 等发现,炎热夏季中,院子地面使用高反射率材料会使 PMV 增加约 1 个单位,若墙壁也采用高反射率材料,则 PMV 将增加约 2 个单位^[20-21]。

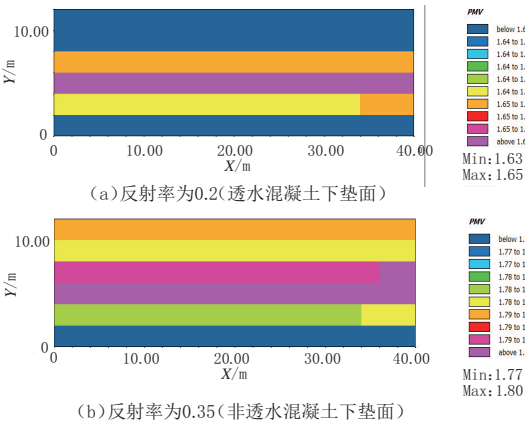


图 6 不同反射率下垫面的 PMV 分布图

表 3 不同反射率下垫面在各时段的 PMV 和 PET 值

时间类型	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
PMV	反射率 0.20	0.86	1.16	1.63	2.16	2.74	2.48
	反射率 0.35	0.87	1.26	1.77	2.34	2.95	2.70
PET/ ℃	反射率 0.20	26.18	27.53	29.64	32.03	34.64	31.90
	反射率 0.35	26.22	27.98	30.28	32.84	35.59	34.46

2.4 不同状态的反射率对应的热舒适度分布特征

图 7 是数值模拟潮湿/干燥两种状态下,透水混凝土下垫面场地在典型时刻 12:00 的 PMV 分布特征图,潮湿场地的 PMV 值低于干燥场地,表明潮湿环境可能更有利于改善热舒适性。表 4 表明,PMV 值逐渐变大,但在 15:00 后逐步降低。对比干燥状态下垫面,潮湿状态下垫面的 PMV 值整体偏低,为 0.04~0.08,PET 降低,为 0.1~0.4℃,表明潮湿的透水混凝土下垫面可以改善人体热舒适度评价。应注意的是数值模拟的条件始终是潮湿状态,而现实则是一个动态干燥的过程。因此,夏季应尽量保持地面湿润,因为透水混凝土路面能够储存更多水分。透水孔隙率越高,路面的储水量也越多,从而延长其潮湿状态,进而提升人体在室外的热舒适度。

2.5 不同配置的反射率对应的热舒适度分布特征

图 8 是数值模拟有白杨树/无白杨树两种两种绿化配置下,潮湿的透水混凝土下垫面场地在典型时刻 12:00 的 PMV 分布特征图,发现 PMV 值在有树荫配置场地比无树场地低。表 5 表明,对比无绿化配置,有绿化配置和潮湿状态的透水混凝土下垫面的

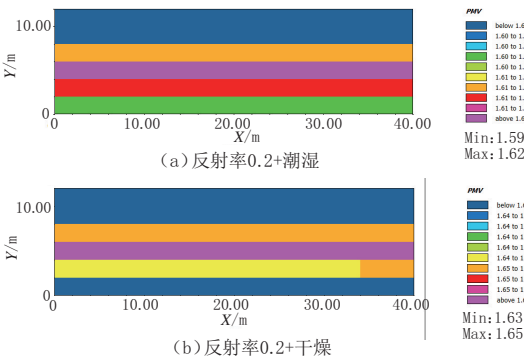


图 7 不同状态的反射率下垫面 PMV 分布图

表 4 各时段不同状态的反射率下垫面的 PMV 和 PET 值

时间类型	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
PMV	反射率 0.2+潮湿	0.9	1.16	1.59	2.11	2.66	2.42
	反射率 0.2+干燥	0.86	1.16	1.63	2.16	2.74	2.48
PET/ ℃	反射率 0.2+潮湿	26.36	27.53	29.46	31.81	34.28	33.20
	反射率 0.2+干燥	26.18	27.53	29.64	32.03	34.64	31.90

PMV 值整体偏低为 0.01~0.09,对应生理等效温度 PET 降低,为 0.1~0.5℃,因此,如果满足净空等规范要求时,可提高绿化配置率。类似的,Feng 等对室外热条件的影响调查中,发现地面反射率水平的增加会降低白天的热舒适性,PET 值有明显的改变,可通过增加绿色植被,特别是树木覆盖,改善热舒适性^[22]。

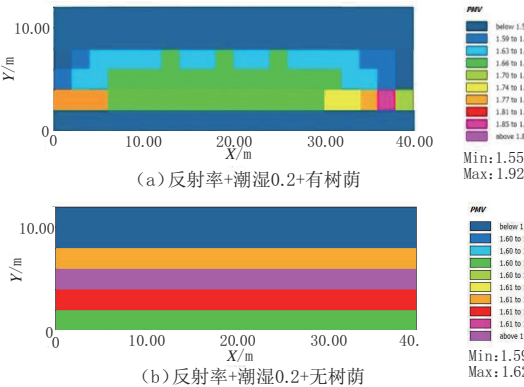


图 8 不同配置的反射率下垫面 PMV 分布图

3 结 语

- (1)反射率与孔隙率存在一定相关性,反射率随孔隙率增大而减小。
- (2)在潮湿状态下,反射率较小,随着下垫面由潮湿变为干燥,其反射率也逐渐变大。
- (3)低反射率(即对应的是透水混凝土下垫面)可改善人体热感觉和热舒适度评价。
- (4)通过组合多种优化因素,如低反射率、潮湿状态以及树荫配置,可以显著改善热环境。例如,25%孔隙率的透水混凝土下垫面配合定时定量洒水

表5 各时段不同配置的反射率下垫面的PMV与PET值

时间类型		10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
PMV	反射率0.2+潮湿+有树荫	0.81	1.10	1.55	2.06	2.60	2.41	2.11
	反射率0.2+潮湿+无树荫	0.90	1.16	1.59	2.11	2.66	2.42	2.09
PET/℃	反射率0.2+潮湿+有树荫	25.95	27.26	29.28	31.58	34.01	33.16	31.81
	反射率0.2+潮湿+无树荫	26.36	27.53	29.46	31.81	34.28	33.20	31.72

保持其湿润,再加上场地周边的绿化布局,PMV值可降低约0.3,PET值则减少约2℃,这是一种有效提升户外活动场地热舒适度的方法。

后续研究需进一步探索以下几个方面:一是透水材料的热湿物理性能对热环境改善的细化分析;二是场地多要素配置的优化,如喷雾和通风等措施;三是对多要素配置方案进行量化研究,例如透水材料的配比设计、洒水与喷雾的水量、速度和时间间隔等。

参考文献:

[1] Thorsson S, Lindqvist M, Lindqvist S. Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden[J]. International journal of biometeorology, 2004(48): 149-156.

[2] 吴祎,孙梅霞,郭苏明.中国城市户外微气候研究进展与展望[J].园林,2023,40(8): 92-98.

[3] Chen L, Wen Y, Zhang L, et al. Studies of thermal comfort and space use in an urban park square in cool and cold seasons in Shanghai[J]. Building and Environment, 2015(94): 644-653.

[4] Li K, Zhang Y, Zhao L. Outdoor thermal comfort and activities in the urban residential community in a humid subtropical area of China[J]. Energy and Buildings, 2016(133): 498-511.

[5] Shoosharian S, Ridley I. The effect of physical and psychological environments on the users thermal perceptions of educational urban precincts [J]. Building and Environment, 2017(115):182-198.

[6] Xu M, Hong B, Mi J, et al. Outdoor thermal comfort in an urban park during winter in cold regions of China[J]. Sustainable cities and society, 2018(43): 208-220.

[7] 熊珂,张雅茹,何宝杰.湿热地区遮阳形式对校园热环境的影响研究[J].西部人居环境学刊,2024,39(1): 149-156.

[8] CJJ 37—2016,城市道路工程设计规范[S].

[9] 汪俊松.湿热地区透水铺装蒸发降温特性研究[D].广州:华南理工大学,2019.

[10] 卜政滔.海绵城市理念下透水铺装生态功能浅析[J].城市道桥与防洪,2024,302(6): 74-78.

[11] Wu H, Sun B B, Li Z, et al. Characterizing thermal behaviors of various pavement materials and their thermal impacts on ambient environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2018(172):1358-1367.

[12] 郭建国.透水性路面材料对路面温度影响的研究[J].中外公路,2014,34(6): 226-228.

[13] 潘述平,孙斌祥,詹培敏,等.基于反射率的路面降温机理及其影响因素研究综述[J].公路交通科技,2019,36(9): 14-23.

[14] 杨燕.建筑周边下垫面反射率对室外热环境的影响机制研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2021.

[15] 郭志升.广州地区不同下垫面室外热辐射对热环境与热舒适影响研究[D].广州:广州大学,2023.

[16] 李朝昌,黄省伟,丁锐,等.太阳辐射下路面材料反射率及潮湿状态下降温效应分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(11): 22-25.

[17] CJJ/T 135—2009,透水水泥混凝土路面技术规范[S].

[18] JGJ 55—2011,普通混凝土配合比设计规程[S].

[19] Bruse M, Fleer H. Simulating surface plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model[J]. Environmental Modelling and Software, 1998, 13(3): 373-384.

[20] Salata F, Golasi I, Petitti D, et al. Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment[J]. Sustainable cities and society, 2017(30): 79-96.

[21] Salata F, Golasi I, Lieto V E, et al. Evaluation of different urban microclimate mitigation strategies through a PMV analysis[J]. Sustainability, 2015, 7(7): 9012-9030.

[22] Yang F, Lau S, Qian F. Thermal comfort effects of urban design strategies in high-rise urban environments in a sub-tropical climate [J]. Architectural Science Review, 2011, 54(4): 285-304.