

张舟, 李通通, 蓝君, 等. 透水地砖的径流控制与保水降温特性[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 138–147.

ZHANG Z, LI T T, LAN J, et al. Runoff control and water retention capacity and cooling characteristics of permeable bricks [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 138–147.

透水地砖的径流控制与保水降温特性

张舟^{1,2}, 李通通^{3,4}, 蓝君⁴, 郑玉^{1,2}, 杨垒⁴, 任勇翔^{4,*}

(1. 西安水务<集团>有限责任公司, 陕西西安 710061; 2. 西安市城区市政养护管理公司, 陕西西安 710003; 3. 湖南省建筑设计院集团股份有限公司, 湖南长沙 410017; 4. 西安建筑科技大学陕西省环境工程重点实验室, 陕西西安 710055)

摘要 【目的】透水铺装作为“海绵城市”重要的组成部分, 具有良好的雨水径流控制效果, 可有效缓解内涝和控制面源污染。【方法】针对现有透水地砖(permeable brick, PB)温湿度调控效果差的问题, 对无保水砂浆填充进水地砖(PB1)和保水砂浆填充透水地砖(PB2)的雨水径流控制效果和保水降温效果进行研究。【结果】PB1和PB2对雨水径流控制方式为先透水再保水, 其渗透速率和保水量分别为1.33 mm/s、8.8 mm和1.25 mm/s、9.3 mm。随着暴雨重现期的增加, PB1和PB2铺装的洪峰削减率由重现期为1 a的64%和73%下降至重现期为20 a的31%和34%, 径流消纳率从暴雨重现期为1 a的76%和68%减至重现期为20 a的18%和20%。在降雨历时为60 min、重现期为20 a的暴雨强度内, 2种供试砖铺装均未产生表面径流, 满足国家透水砖铺装径流总量和峰值控制的要求。在夏季高温天气时, 相较于普通混凝土路面, 干燥状态下的透水保水路面铺装可能会加剧城市局部热岛效应; 满保水状态下, 有效路面降温时间为42 h内, PB1和PB2的路面和周边空气温度最大降温幅度分别为10.8、4.5℃和9.8、4.2℃。除此, PB1的抗压强度(43.7 MPa)显著高于PB2(41.6 MPa), 表明其具有更优的力学性能。【结论】PB1可更有效地冷却周边空气, 更利于改善局部热环境, 具有更广泛的工程适用前景。

关键词 透水地砖 雨水径流 保水降温 热岛效应 热环境

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)08-0138-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.018

Runoff Control and Water Retention Capacity and Cooling Characteristics of Permeable Bricks

ZHANG Zhou^{1,2}, LI Tongtong^{3,4}, LAN Jun⁴, ZHENG Yu^{1,2}, YANG Lei⁴, REN Yongxiang^{4,*}

(1. Xi'an Water Group Co., Ltd., Xi'an 710061, China;

2. Xi'an City Urban Facilities Maintenance Management Co., Ltd., Xi'an 710003, China;

3. Hunan Architectural Design Institute Group Co., Ltd., Changsha 410017, China;

4. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract [Objective] Permeable pavement, as a crucial component of the "Sponge City" initiative, demonstrates excellent stormwater runoff control effectiveness, effectively mitigating urban waterlogging and managing non-point source pollution. [Methods] Aiming at the problem of poor temperature and humidity control effect of existing permeable brick (PB), the control effect of rainwater runoff and the cooling effect of the permeable brick without water-retaining mortar filling (PB1) and water-retaining mortar filling (PB2) were studied. [Results] The control mode of PB1 and PB2 for rainwater runoff was first permeation and then retention, and the permeability rate and water retaining capacity were 1.33 mm/s, 8.8 mm and 1.25 mm/s, 9.3 mm, respectively. With the increase of the recurrence period of heavy rain, the flood peak reduction rates of PB1 and PB2 pavements decreased from 64% and 73% (1 a) to 31% and 34% (20 a), while their runoff absorption rates declined from 76% and 68% (1 a) to 18% and 20% (20 a),

[收稿日期] 2024-04-09

[基金项目] 陕西省重点研发计划项目(2018ZDCXL-SF-31-6)

[作者简介] 张舟(1969—), 男, 主要从事排水设施运维管理、海绵城市建设与研究等工作, E-mail: 380852111@qq.com。

[通信作者] 任勇翔(1968—), 男, 教授, 研究方向为污水处理理论与技术、水环境修复理论与技术, E-mail: ryx@xauat.edu.cn。

respectively. When the rainfall duration was 60 min and the recurrence period was 20 a, no surface runoff was produced in the two test brick, which all met the national standards of total amount and peak value of runoff on permeable pavement. Compared with ordinary concrete pavement, permeable water-retaining pavement under dry condition may aggravate local effect of tropical island in summer. Under the condition of full water retention, the maximum cooling range of the road surface and surrounding air temperature of PB1 and PB2 were 10.8, 4.5 °C and 9.8, 4.2 °C within the effective cooling time of 42 h, respectively. In addition, the compressive strength of PB1 (43.7 MPa) was significantly higher than that of PB2 (41.6 MPa), indicating its superior mechanical performance. [Conclusion] PB1 can effectively cool the surrounding air, which is more conducive to improving the local thermal environment, thus having a broader engineering application prospect.

Keywords permeable brick(PB) rainfall runoff water retention and cooling heat island effect thermal environment

随着城市规模的不断扩张,城市中原有的可渗透、可调蓄雨水径流的下垫面,如草地、林地等逐步被硬质、不透水的建筑物、公共基础设施和道路及其附属物所取代,使城市不透水地面增加,造成城市地表水文特征急剧改变甚至内涝频发^[1]。同时,以水泥、沥青等不透水材料为主的下垫面常会吸收更多的太阳辐射,导致更多热量以显热的形式进入空气,加剧城市热岛效应。降低道路表面温度对于改善城市局部高温状况,缓解城市热岛效应具有显著作用^[2]。当前,一种行之有效的方法为在轻载路面上使用透水铺装或保水路面代替密实路面。

透水铺装作为“海绵城市”重要的组成部分,具有良好的雨水径流控制效果,可有效缓解内涝和控制面源污染,是一种典型的源头控制措施^[3]。然而在实际应用中,透水铺装存在温、湿度调控效果差等问题。近年来,新出现的保水路面,其表层结构的内部孔隙可以保存一定水量,具有显著的温湿度调控

效果。但是,由于该种路面是通过向其母体结构的孔隙中填入保水材料进行吸水保水,会占据一定的贮水空间。因水的比热容几乎是自然界所有液体和固体物质中最大的,更利于温度控制。因此,如果保留透水砖的孔隙,以外围合不透水材料为持水结构,降雨时在雨水渗透的同时以雨水填充孔隙,可能会有更好的保温调湿效果,也可能会进一步降低透水保水砖的制造成本。所以,相较于普通透水铺装,本研究制备的透水地砖(permeable brick, PB)具备一定的滞水蓄水功能,更加突显其环境友好型特性。

1 试验装置与方法

1.1 PB 铺装

为使 PB 具有良好的雨水径流控制效果和保水降温特性,则该砖需要具备良好的渗透能力和一定的保水量。为便于试验测定,将供试砖体设计为上下分体式,上下结构之间通过卡扣相连。PB 的结构如图 1 所示。

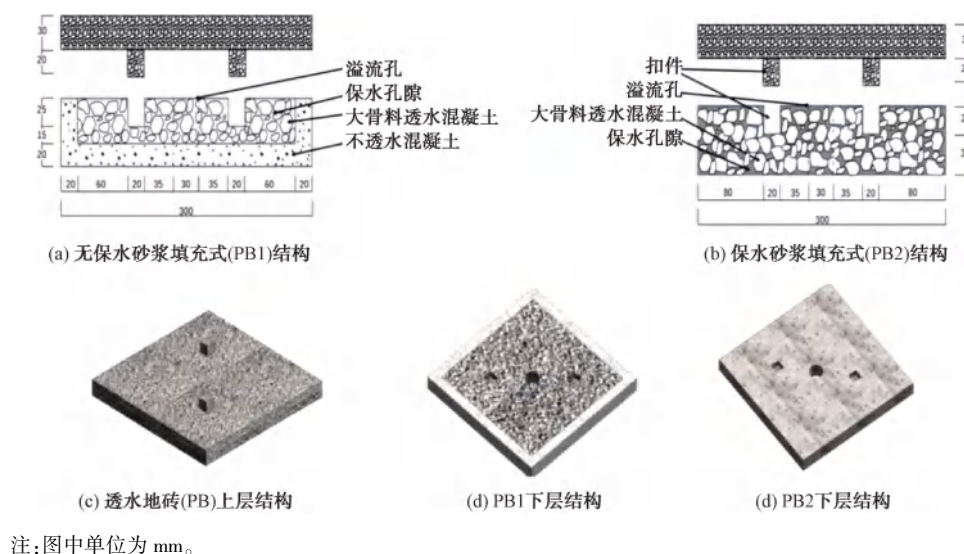


图 1 PB 结构

Fig. 1 PB Structure

由于透水铺装的堵塞绝大部分发生在距表层 25 mm 之内^[4],因此,上层结构的厚度设为 30 mm,功能为透水 and 截留悬浮固体;下层结构功能为保水、透水。在降雨过程中,雨水通过上层结构向下渗透,砖下层结构吸收、保存一定的水量,用于缓慢蒸发降低路面温度,进而缓解城市局部热岛效应,当下层结构吸水/贮水饱和后,多余的雨水可以直接通过中间直径为 30 mm 的溢流孔向下持续渗透。

2 种 PB 上层结构均采用某知名厂家,已在西安被广泛应用于供试透水混凝土面层(骨料粒径为 3~5 mm、孔隙率为 25%),由厂家进行现场制备,性能符合《透水路面砖和透水路面板》(GB/T 25993—

2023)中的耐磨和防滑标准。下层分别为 PB1 和 PB2 的透水混凝土。其中,PB1 利用下层结构的不透水混凝土外壁包裹内部孔隙进行保水,其 28 d 抗压强度为 43.7 MPa,满足《透水混凝土》(JC/T 2558—2020)要求(>40 MPa);而 PB2 下层结构设计为相对成熟的保水路面结构,即母体材料中灌入保水材料,利用保水材料进行吸水保水,其 28 d 抗压强度为 41.6 MPa。PB 的具体材料如表 1 所示,PB 铺装的结构如图 2 所示。供试砖体的长×宽为 0.3 m×0.3 m。为避免承口处进入细小砂石影响承插和安装,上下分体的卡扣结构中间预留 5 mm 空隙。

表 1 PB1 和 PB2 材料
Tab. 1 Materials of PB1 and PB2

砖的类型	上层材料	下层材料
PB1	透水混凝土,骨料粒径为 3~5 mm,孔隙率为 25%	四周及底部为密实混凝土;中间为透水混凝土,骨料粒径为 10~12 mm,中间透水混凝土孔隙率为 25%
PB2		母体材料为透水混凝土,骨料粒径为 10~12 mm;保水材料为吸水树脂保水砂浆 ^[5] ,孔隙率为 25%

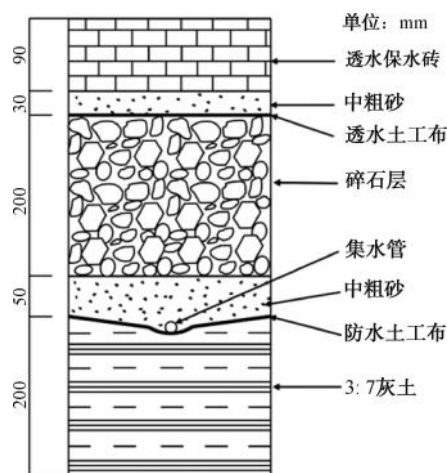


图 2 PB 路面结构

Fig. 2 Structure of PB Pavement

1.2 理论计算

1.2.1 渗透速率

渗透系数是衡量透水铺装渗透能力的重要指标,该指标遵循达西定律,试验采用常水头进行测定^[5],计算如式(1)~式(2)。

$$k = \frac{QL}{AHt} \quad (1)$$

$$K_{15} = K_T \frac{\eta_T}{\eta_{15}} \quad (2)$$

其中: k ——透水系数,mm/s;

Q —— t 秒内渗透的水量,mL;

L ——渗流路径长度,m;

H ——常水头高度,m;

A ——试块渗透上表面的面积,cm²;

t ——时间,s;

K_{15} ——15℃材料透水系数,cm/s;

K_T —— T ℃材料透水系数,cm/s;

η_T ——水温为 T ℃时的动力黏滞系数,kPa·s;

η_{15} ——水温为15℃时的动力黏滞系数,kPa·s。

1.2.2 保水量

保水量直接影响到了PB的蒸发强度和蒸发降温持续时间。测定方法使用质量法,计算如式(3)^[6]。

$$m = \frac{m_1 - m_0}{10 \times A\rho} \quad (3)$$

其中: m ——试块的保水量,mm;

m_0 ——试块烘干质量,kg;

m_1 ——试块吸水24 h时的质量,kg;

ρ ——水的密度,取值为1 g/mL,g/mL。

1.3 雨水径流控制效果

试验采用人工模拟降雨装置(YNJY-18,禹诺电子科技有限公司,中国),其降雨有效规格为1 m×3 m。降雨过程选择芝加哥雨型,降雨历时为60 min,西安地区雨强计算如式(4)。不同重现期下的降雨强度过程线如图3所示。

$$q = \frac{13.265 \ 22 \times (1 + 2.915 \times \lg P)}{(t' + 21.933)^{0.974}} \quad (4)$$

其中: q ——设计降雨强度,mm/min;
 P ——设计降雨重现期,a;
 t' ——设计降雨历时,min。

根据西安市的降雨特点,选取试验降雨频率为3 d/场,降雨过程中每5 min 收集一次铺装的表面产流和底部出流。

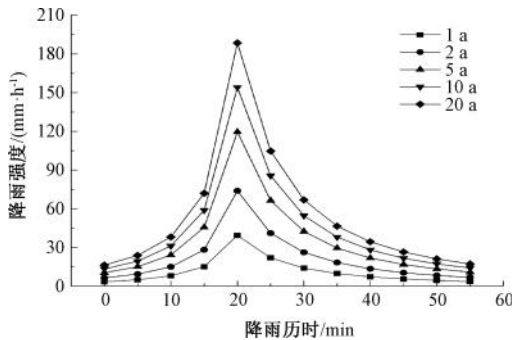


图3 不同重现期下的降雨强度

Fig. 3 Rainfall Intensity under Different Recurrence Periods

1.4 路面保水降温效果

试验采用红外测温仪(FLUKE F62MAX,福禄克,中国)和四通道温度计(CENTER 309,特群,台湾)对透水铺装路表温度进行监测,每5 min 记录一次温度数据。

1.4.1 路面降温与周边空气冷却效果的数学模拟

保水路面可以有效地降低路面温度,从而减少路面与空气的显热。因此,相对于干燥的供试透水混凝土路面,保水路面减少的显热量可以认为是保水路面的水分蒸发从空气中吸收的潜热。

根据水分蒸发吸收的热量与降低温度之间的关系,即取下垫面面积为1 m²,厚度为100 m 的空气柱作为计算单元^[7],空气密度取值为1.249 kg/m³,比热容取气温为298.15 K 和一个大气压下测定值为1 013 J/(kg·K)。水分蒸发消耗温差 ΔT 的计算如式(5)^[8]。

$$\Delta T = \frac{\Delta Q'}{c_{\text{air}} m_{\text{air}}} \quad (5)$$

其中: $\Delta Q'$ ——干燥路面与洒水路面上方空气的能量差,J/(m²·h);

ΔT ——干燥路面与洒水路面上方空气温度差,℃;

c_{air} ——单位质量空气比热容,J/(kg·K);

m_{air} ——单位体积的空气质量,kg/m³。

下垫面与周边空气的显热通量计算如式(6)^[9]。

$$H_R = h_c \times (T_s - T_a) \quad (6)$$

其中: h_c ——表面换热系数,本文取 $h_c = 5.6 + 4.96 \times v$,W/(m²·℃);

v ——2.0 m 处的风速,m/s;

T_a ——空气干球温度,℃;

H_R ——显热通量,W/m²;

T_s ——道路表面温度,℃。

干燥路面与保水路面的显热通量差值 ΔQ_1 的计算如式(7)^[10]。

$$\Delta Q_1 = (5.6 + 4.96 \times v) \times \Delta t_1 \times 3600 \quad (7)$$

其中: Δt_1 ——干燥路面温度与保水路面温度差值,℃;

ΔQ_1 ——显热通量差值,J/(m²·h)。

1.4.2 热环境的安全和舒适性的评价指标

湿球黑球温度(wet-bulb globe temperature, WBGT)可以反映人员在该环境中活动的安全性和环境的舒适水平。表2为体育锻炼指数给出的WBGT中暑风险阈值,WBGT 计算如式(8)^[11]。

$$W_{\text{WBGT}} = 1.157 \times T_a + 17.425 \times R_{\text{RH}} + 2.407 \times 10^{-3} \times S_{\text{SR}} - 20.550 \quad (8)$$

其中: W_{WBGT} ——WBGT,℃;

R_{RH} ——相对湿度;

S_{SR} ——太阳辐照度,W/m²。

表2 预防中暑体育锻炼指标

Tab. 2 Physical Exercise Index for Heatstroke Prevention

WBGT 值	预防中暑体育锻炼指标
≥31 ℃	原则上不建议运动
28~31 ℃	紧急警告(停止剧烈运动)
25~28 ℃	警告(鼓励休息)
21~25 ℃	小心(鼓励喝水)
< 1 ℃	几乎安全(喝适量的水)

温湿度指数 (temperature humidity index, THI), 描述人体对环境温度和湿度的综合感受指标。THI 的环境气候舒适性等级划分如表 3 所示, 计算如式 (9) [12]。

$$T_{\text{THI}} = T_a - 0.55 \times (1 - R_{\text{RH}}) \times (T_a - 14.5) \quad (9)$$

其中: T_{THI} ——THI。

表 3 人居环境气候舒适等级划分

Tab. 3 Classification of Climatic Comfort Levels in Human Settlement Environment

等级	感觉程度	THI	健康人群感觉的描述
1	寒冷	<14.0	感觉很冷, 不舒服
2	冷	14.0~16.9	变冷, 较不舒服
3	湿度	17.9~25.4	感觉舒适
4	热	25.5~27.5	有热感, 较不舒服
5	闷热	>27.5	闷热难受, 不舒服

2 结果与讨论

2.1 渗透速率与保水量

现场测定 PB1 和 PB2 的渗透速率分别为 1.33 mm/s 和 1.25 mm/s, 远高于《透水路面砖和透水路面板》(GB/T 25993—2023) 中规定的透水砖渗透速率 (≥ 0.1 mm/s), 表明 PB 具有良好的渗透性能 [13]。PB1 和 PB2 的保水量分别是 8.8 mm 和 9.3 mm, 其中上层结构的保水量均为 1.4 mm, 下层结构的保水量分别是 7.4 mm 和 7.9 mm, 表明 PB 保水性能良好。

2.2 雨水径流控制效果

在降雨频率为 3 d/场, 20 a 的暴雨重现期内, 2 种 PB 铺装均没有产生表面径流, 满足《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》中透水砖铺装径流总量和峰值的控制要求。由图 4 可知, 2 种 PB 铺装的雨水径流控制效果相当, 且底部集水管出流时间和峰现时间相同, 都随重现期的增加而减小, 当重现期从 1 a 增至 20 a, 出流延迟时间由 30 min 缩短至 25 min, 峰现延迟时间由 30 min 缩短至 10 min; 雨水径流的削减率随着重现期的增加而减少, 由重现期 1 a 的 68%~76% 降至 20 a 的 18%~20%。但消纳量不随着暴雨重现期的变化而变化, 始终维持在 7~11 mm。这是由于铺装对每场降雨的消纳量为降雨间歇期通过蒸发而减少的水量, 它的大小与降雨间歇期、天气情况和铺装内部保水量的竖向分布有关, 同时表明, 2 种砖在降雨间歇

期内, 能够有效利用砖内保存的水分进行蒸发降温。2 种砖的洪峰削减率随着重现期的增加而减少, PB1、PB2 铺装洪峰削减率从 1 a 的 73% 和 64% 降至 20 a 的 34% 和 31%。由图 4 还可知, 在不同的暴雨重现期下, 2 种 PB 的底部集水管出流过程线基本相同, 表明 2 种透水保水砖铺装的雨水径流控制效果相当。当 2 种 PB 的保水量达到饱和后雨水通过中间的溢流孔下渗, 其雨水径流控制方式为先保水后透水。同时, 在降雨历时为 90 min, 重现期 1、2、5、10、20 a 条件下, 两砖的产流时间和峰现时间均晚于普通混凝土路面产流时间和峰现时间 [图 4(f)], 说明 PB 具有良好的雨水径流控制效果。一般情况下, 透水路面制品的透水性与保水性相互矛盾。在一定的孔径范围内, 孔隙率越大, 保水性越好; 当超过一定的孔径时, 孔隙率越大, 保水性反而降低。从透水性角度出发, 限制孔径范围则难以获得很高的透水系数。相对于普通的透水砖, 本研究制备的 PB (PB1 和 PB2) 由于其特殊的结构构造, 可有效地削减了雨水径流的总量。此外, 当上层结构堵塞后, 固定下层结构, 只需更换堵塞的上层结构, 就可快速恢复其透水功能。该 PB 铺装路面能够在减少更换材料发生量, 降低道路维护成本和交通干扰时长的同时, 保证其对雨水径流的良好控制效果。

2.3 路面保水降温效果

2.3.1 透水铺装的路面温度变化特征

在夏季炎热的天气下, 对供试透水混凝土路面和普通混凝土路面的温度变化进行了监测, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 2 种铺装的路面在夜间没有明显差异, 但是在白天, 尤其在路面温度最高时段 (13:00—15:00), 路面温度存在显著性差异 ($p < 0.01$), 其中透水铺装的平均路面温度为 56.0 °C, 比普通混凝土路面的平均路面温度 (52.3 °C) 高出 3.7 °C。其主要原因可能: (1) 透水混凝土路面存在较多孔隙结构导致其铺装表面对太阳辐射反射率降低, 倾向于吸收更多的太阳辐射 [14]; (2) 由于透水铺装孔隙率较大, 单位体积的热容小、铺装内部热传导速率低, 使得吸收的太阳辐射垂直向下传递的热量少, 在吸收相同太阳辐射时, 温度变化幅度更大 [15]。对路面温度监测的结果表明, 相较于普通混凝土路面, 白天干燥状态下的透水路面对热岛效应的加剧效果更加显著, 这与文献 [16] 报道的现象一致。

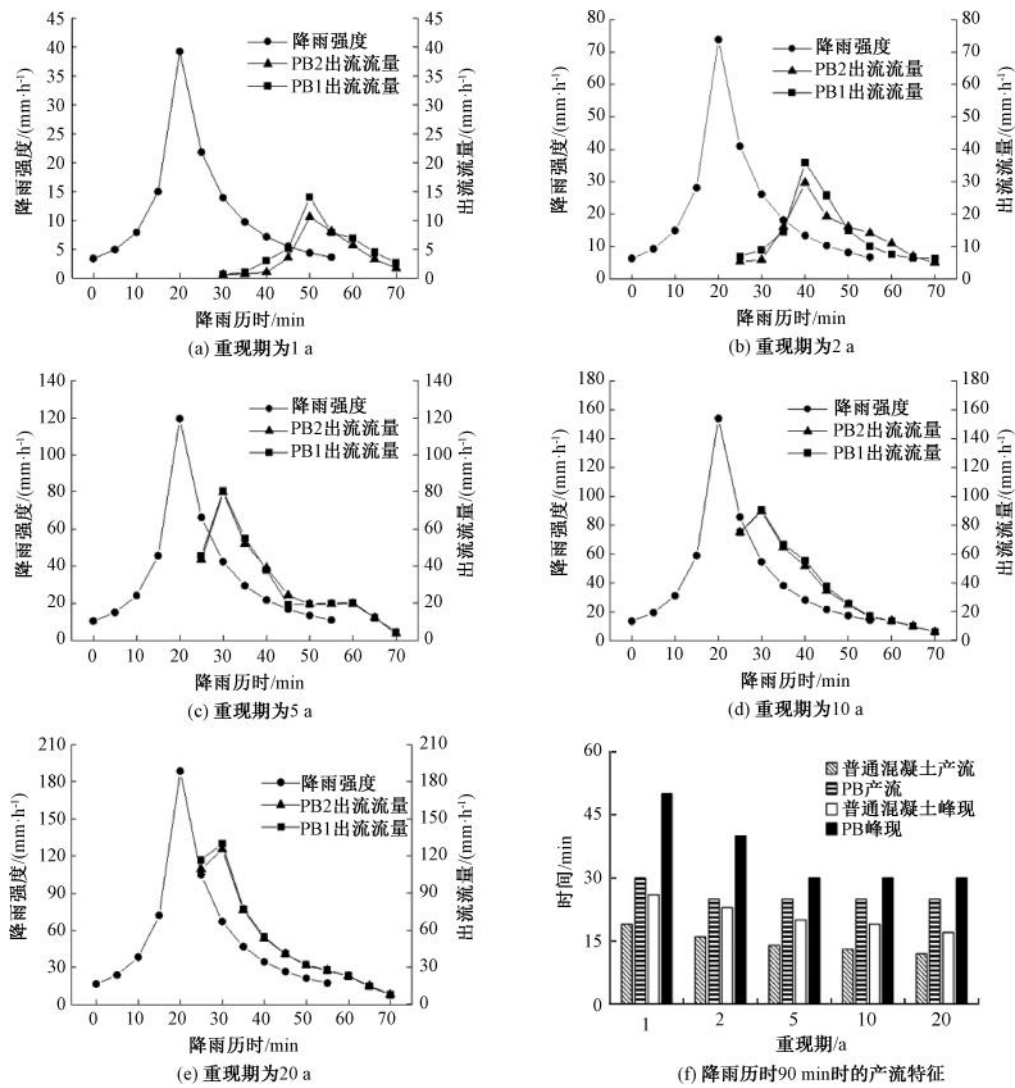


图4 PBs在不同重现期的径流控制效果

Fig. 4 Effect of Water Retention and PBs Pavement on Runoff Control under Different Recurrence Periods

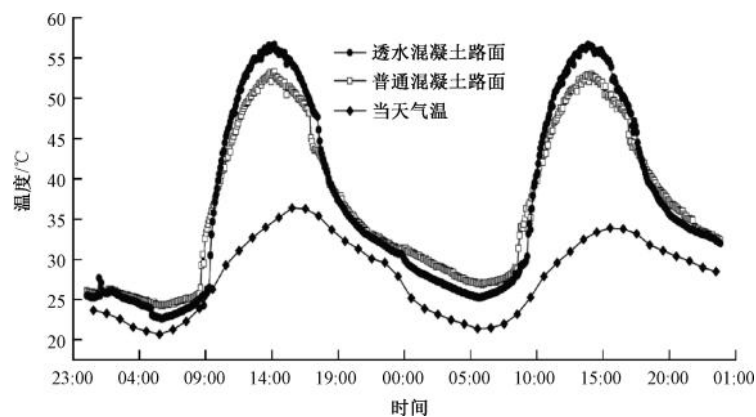


图5 不同时间下透水混凝土和普通混凝土路面的表面温度变化

Fig. 5 Road Surface Temperature Changes of Permeable and Ordinary Concrete under Different Time

2.3.2 小水量保水状态下的路面降温效果

普通的保水路面结构由保水性铺装表层+基层+底基层+路基组成,当降雨或人工洒水时,保水性铺装表层吸收并保持水分,基层不透水更不保水,水的蒸发散热只在表层进行^[17]。已有研究表明,路面的水分蒸发降温效果与水分到道路表面的垂向距离有关。当透水铺装中自由水面在路面表面或近表面,蒸发强度大,能够有效地降低路面温度;当水分在路面较深处,蒸发强度小,对抑制路面温度上升效果不明显。因此,增强铺装的保水降温能力,主要应增加路面表层的保水能力,即通过表层保存的水分蒸发吸热更利于实现路面降温效果。

在干燥情况下,供试 2 种 PB 上层结构的路表温度相同。依据《室外给水设计标准》(GB 50013—2018),从正午 12:00 对 2 种 PB 铺装开始进行洒水量为 2 mm 单次或多次洒水。由图 6(a)可知,12:00 单次洒水 2 mm 后,路面温度快速下降,PB1 和 PB2 的降温幅度分别为 8.8 °C 和 8.1 °C,温度重新恢复到 12:00 时的路面温度所需的时间(降温持续时

间)分别为 70 min 和 130 min。PB2 的持续时间大于 PB1 的原因快速集中的洒水方式,使表层保水量小,部分水量快速下渗到 PB1 底部(70 mm),蒸发降温强度较小;而 PB2 在洒水时,水虽然快速下渗,但到砖下层被保水材料吸水保存,在蒸发降温过程中,保水材料所保存的水分可以不断地从内部迁移到表层(距离路面表面 30 mm)。因此,可以延长降温持续时间,保持较强的蒸发降温效果。

由图 6(b)可知,在 12:00 开始洒水,单次洒水量为 2 mm,洒水间隔为 120 min 的多次洒水情况下,PB2 的路面降温效果明显好于 PB1,其中在 2 次洒水的情况下,PB2 可以将路面温度控制到当天 12:00 时路面温度以下,而 PB1 若要达到同样的降温效果则需要缩短洒水间隔。洒水后的白天段,PB2 的路面降温效果显著优于 PB1,但夜间 PB1 的路面降温效果略优于 PB2,原因应为洒水时快速下渗的部分水量在白天未完全蒸发,夜间持续蒸发所致。总体看,在 2 mm 单次或多次洒水状态下,PB2 的路面保水降温效果优于 PB1。

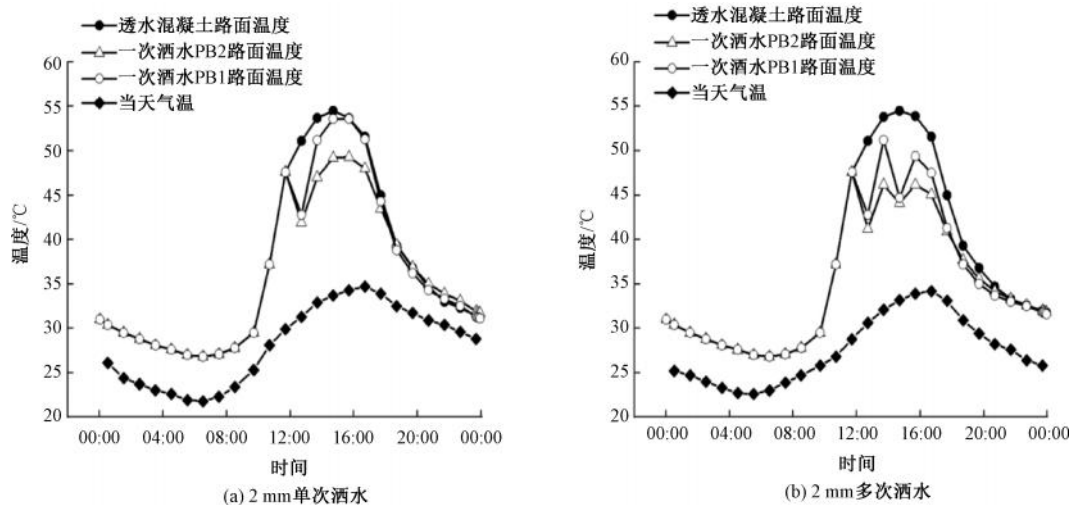


图 6 不同洒水条件下 PBs 的降温特性

Fig. 6 Cooling Characteristics of PBs under Different Watering Conditions

2.3.3 满保水状态下的路面降温效果

当 2 种铺装夜间 24:00 处于满保水状态停止人工降雨作业。由图 7 可知,在满保水的状态下,2 种铺装 42 h 内能有效通过水分蒸发降低路面温度,且 2 种铺装的降温效果相近,路面最大降温幅度都发生在第 1 d 的 12:00 前后,分别为 10.8 °C (PB1) 和 9.8 °C (PB2)。降低路面温度是降低大气温度、缓解城市热岛效应的有效的方法^[18]。在 42 h

内,路面平均降温幅度为 4.2 °C, PB1 和 PB2 的日间平均降温幅度分别为 5.1 °C 和 5.0 °C,夜间平均降温幅度分别为 3.0 °C 和 3.1 °C。但是,随着时间的延长,降温效果逐渐减弱,42 h 后水分完全蒸发降温效果基本消失。满保水第 1 d PB1 的降温效果优于 PB2,表明 PB1 的蒸发降温强度高于保水砂浆填充的 PB2。随着水分蒸发的持续,PB1 内的自由水位不断降低,至第 2 d PB2 的降温效果要好于 PB1,

应是保水砂浆可以提高透水混凝土的吸水和储水能力所致。在炎热的夏季,更大的储水量意味着可以有效延长蒸发降温时间。在相同热传导条件下,PB2中的保水砂浆利于水分从砂浆底部迁移至表层,且保水砂浆热阻率高,热传导效率低,一定程度减少了砖体持水的蒸发^[19]。

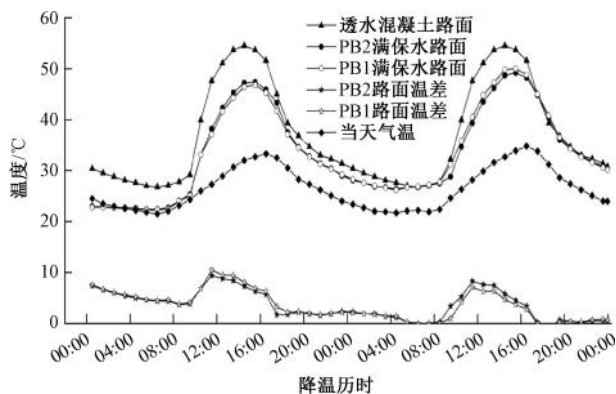


图7 满保水状态下PBs铺装的降温曲线

Fig. 7 Cooling Curves of Saturated PBs Pavement

2.3.4 满保水状态下路面对周边热环境的改善效果

根据图7中铺装的满保水降温效果与干燥供试透水混凝土路面的温度变化,风速取试验当天的平均风速,第1d和第2d分别为2.0 m/s和2.3 m/s,计算得到不同铺装上方空气温度的变化,计算结果如图8所示。由图8可知,在满保水状态下,2种PB铺装最大能够降低周边空气温度分别为4.5℃(PB1)和4.2℃(PB2);在有效的路面降温时间段内,铺装对周边空气的平均降温幅度均为1.9℃。

根据试验过程中的气象数据(图9)计算WBGT和THI指数,结果如图10所示。在城市气温下,WBGT指数,干燥路面上方热环境有11h处于运动警告状态,其中2h为紧急警告状态;而保水路面下周边热环境,PB1、PB2铺装分别降至只有3h处于运动警告状态,均无紧急警告状态。对于THI指数,干燥透水混凝土路面上方热环境有13h处于有热感状态,其中5h处于闷热难受状态,而保水路面周边的热环境,2种PB铺装均降至有6h处于有热感状态,其中只有1h处于闷热难受状态,表明对保水透水路面多次小水量洒水能有效降低路面上方空气温度,进而改善环境的热舒适性。

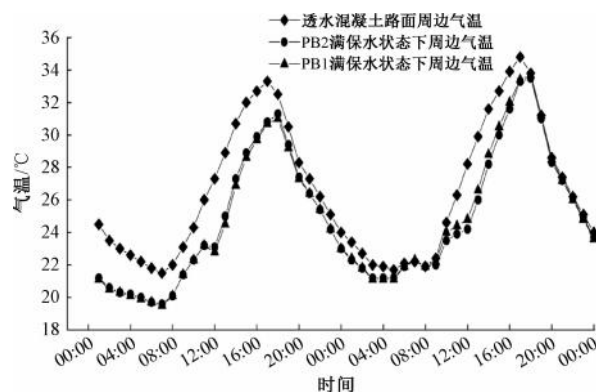


图8 满保水状态下PBs铺装对周边空气的降温效果

Fig. 8 Cooling Effect of Saturated Water Retention and PBs Pavement on Surrounding Atmosphere

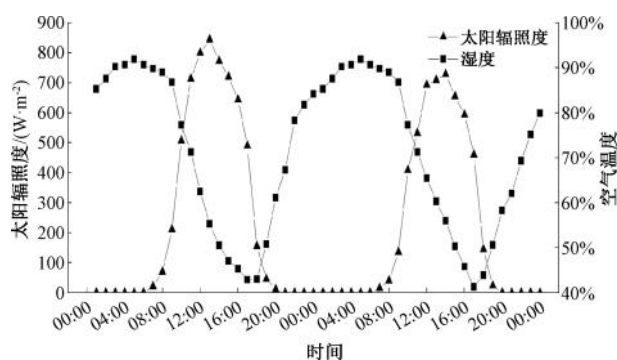


图9 满保水状态下PBs铺装的气象特征

Fig. 9 Meteorological Characteristics of Saturated Water Retention and PBs Pavement

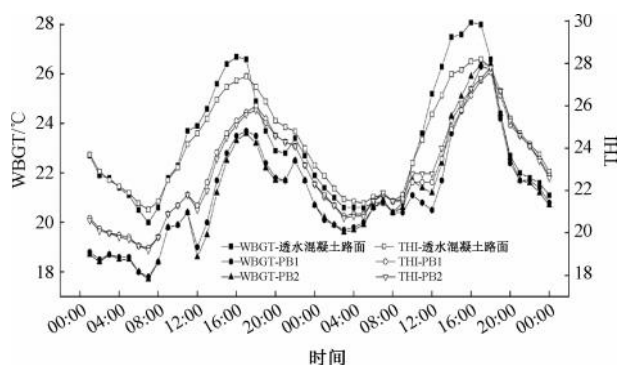


图10 满保水状态下PBs铺装对周边热环境的改善效果

Fig. 10 Improvement Effect of Saturated Water Retention and PBs Pavement on Surrounding Thermal Environment

3 结论

(1)2种PB都具有良好的渗透性和一定的保水量。PB1、PB2的渗透速率和保水量分别为1.33 mm/s、8.8 mm和1.25 mm/s、9.3 mm。

(2) 2 种 PB 都具有良好的雨水径流控制效果,其雨水径流的控制方式为先透水后保水。随着暴雨重现期的增加,PB1 和 PB2 铺装的洪峰削减率由重现期为 1 a 的 64% 和 73% 下降至重现期为 20 a 的 31% 和 34%,径流消纳率从暴雨重现期为 1 a 的 76% 和 68% 减至重现期为 20 a 的 18% 和 20%。

(3) 在干燥状态下,相较于普通混凝土路面,供试透水混凝土铺装可能加剧局部区域的热岛效应。可通过对保水透水路面多次小水量洒水有效地降低路面上方空气温度。

(4) 在满保水状态下,2 种 PB 都具有良好的路面降温效果。在 42 h 内,PB1 和 PB2 的路面最大降温幅度为 10.8℃ 和 9.8℃;最大降低周边空气温度分别为 4.5℃ 和 4.2℃。PB1 可更有效地冷却周边空气,更利于改善局部热环境。

(5) PB1 的抗压强度(43.7 MPa) 高于 PB2 的抗压强度(41.6 MPa)。PB1 利用底部和四周的不透水密实混凝土,将水保存在内部的透水混凝土孔隙中,便可 100% 利用内部孔隙结构进行水量的保存,从而提高透水保水砖的保水能力。PB2 采用的是母体材料孔隙中灌入保水材料,利用保水材料的保水能力进行水量的保存,但是不管使用何种保水材料,都会占据母体材料的孔隙,从而限制了孔隙的利用度。此外,在实际工程应用中向母体材料灌入保水砂浆时难以保证有效的灌入深度和均匀性。因此,PB1 的适用场景更为广泛。

参考文献

- [1] 赵丰昌,章林伟,高伟. 海绵城市理念下城市内涝防治体系构建的探讨[J]. 给水排水, 2021, 47(8): 37-44.
ZHAO F C, ZHANG L W, GAO W. Discussion on the construction of urban flooding control system under the concept of sponge city[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 37-44.
- [2] 朱玲,由阳,程鹏飞,等. 海绵建设模式对城市热岛缓解效果研究[J]. 给水排水, 2018, 44(1): 65-69.
ZHU L, YOU Y, CHENG P F, et al. Study on the effect of sponge construction mode on the alleviation of urban heat island[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(1): 65-69.
- [3] WANG J S, MENG Q L, ZOU Y, et al. Performance synergism of pervious pavement on stormwater management and urban heat island mitigation: A review of its benefits, key parameters, and co-benefits approach[J]. Water Research, 2022, 221: 118755. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118755.
- [4] WINSTON R J, AL-RUBAEI A, BLECKEN G T, et al. Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate—The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 169: 132-144. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.12.026.
- [5] 明瑞平,谢艾利,张亚杰,等. 透水混凝土强度及渗透性能研究[J]. 混凝土, 2022(4): 147-149, 153.
MING R P, XIE A L, ZHANG Y J, et al. Study on strength and permeability of pervious concrete[J]. Concrete, 2022(4): 147-149, 153.
- [6] 宋剑英,王建龙,任希岩,等. 透水铺装渗透性能计算方法探讨[J]. 中国给水排水, 2022, 38(2): 35-40.
SONG J Y, WANG J L, REN X Y, et al. Discussion on the permeability calculation method of permeable pavement[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 35-40.
- [7] 唐江昱,李振,岳燕飞,等. 水泥基透水路面制品的透水与保水性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(1): 31-35.
TANG J Y, LI Z, YUE Y F, et al. Research on permeability and water retention of cement-based permeable pavement products[J]. China Concrete and Cement Products, 2019(1): 31-35.
- [8] 郭鑫,付阳子,段佳豪,等. 天津市中心城区草地降温功能及其经济价值评估[J]. 环境与发展, 2017, 29(9): 7-8.
GUO X, FU Y Z, DUAN J H, et al. Grassland cooling function and economic value assessment in downtown area of Tianjin[J]. Environmental and Development, 2017, 29(9): 7-8.
- [9] 殷亦佳,陈启航,赵芮,等. 北京市常见绿化树种蒸腾特性与温湿效益研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 31-36, 76.
YIN Y J, CHEN Q H, ZHAO R, et al. Transpiration characteristics and temperature and humidity benefits of common green tree species in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(1): 31-36, 76.
- [10] QIN Y H, HILLER J E. Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 77-84. DOI: 10.1016/j.conbuildwat.2016.02.063.
- [11] 徐卫星,王成,陈思,等. WBGT 指标在开平旅游舒适度评价的应用初探[J]. 黑龙江气象, 2022, 39(4): 37-40.
XU W X, WANG C, CHEN S, et al. Application of WBGT index in tourism comfort evaluation in Kaiping[J]. Heilongjiang Meteorology, 2022, 39(4): 37-40.
- [12] 朱元璞,马倩,王佩,等. 基于 FAHP 模型的伊宁市气候舒

- 适度变化分析[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(6): 167-172.
- ZHU Y P, MA Q, WANG P, et al. Analysis of the climatic comfortable index in Yining from based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(6): 167-172.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 透水路面砖和透水路面板: GB/T 25993—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Permeable paving bricks and permeable paving flags: GB/T 25993—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [14] 余太平, 何延召, 蔡洪, 等. 透水铺装合理搭配在海绵建设中的综合效益[J]. 净水技术, 2020, 39(7): 46-51.
- YU T P, HE Y Z, CAI H, et al. Comprehensive benefits of permeable pavement in sponge construction [J]. Water Purification Technology, 2019, 39(7): 46-51.
- [15] 余太平, 何延召, 蔡洪, 等. 基于海绵城市建设的新型陶瓷透水砖材料测试与分析[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 168-172.
- YU T P, HE Y Z, CAI H, et al. Test and analysis of new ceramic permeable brick materials based on sponge city construction [J]. Water Purification Technology, 2019, 39(10): 168-172.
- [16] 汪俊松, 张玉, 孟庆林, 等. 透水路面蒸发降温效应研究综述[J]. 建筑科学, 2017, 33(4): 142-149.
- WANG J S, ZHANG Y, MENG Q L, et al. Review on the evaporative cooling effect of permeable pavements[J]. Building Science, 2017, 33(4): 142-149.
- [17] 李洋洋. 保水路面结构组合分析与思考[J]. 绿色环保建材, 2019(7): 94-94, 96.
- LI Y Y. Structural combination analysis and thinking of water-retaining pavement [J]. Green Building Materials, 2019, (7): 94-94, 96.
- [18] 杨文娟, 顾海荣, 单永体. 路面温度对城市热岛的影响[J]. 公路交通科技, 2008(3): 147-152, 158.
- YANG W J, GU H R, SHAN Y T. Influence of pavement temperature on urban heat island [J]. Journal of Highway and Transportation Science and Technology, 2008(3): 147-152, 158.
- [19] 李洋洋, 谢立炳, 胡力群. 保水路面研究综述[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 53-57.
- LI Y Y, XIE L B, HU L Q. Review of research on water-retaining pavement [J]. China and Foreign Highway, 2017, 37(1): 53-57.