

# 渗透铺装蒸发强度的动态变化规律及影响因素分析

张静怡<sup>1</sup> 秦华鹏<sup>1,†</sup> 翟艳云<sup>2</sup>

1. 城市人居环境科学与技术重点实验室, 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 深圳市创环环保科技有限公司, 深圳 518055; †通信作者, E-mail: qinhp@pkusz.edu.cn

**摘要** 设计并搭建一种典型透水混凝土铺装蒸发模拟实验平台, 在深圳市的气象条件下, 连续观测铺装含水量、蒸发量、吸湿量和表面温度等的变化过程, 分析透水混凝土铺装蒸发强度的动态变化规律及影响因素。结果表明, 在雨季, 降雨可显著地增加透水混凝土铺装的蒸发强度, 但影响的持续时间有限, 8小时内这种增强效应会逐渐减弱至较低水平; 随着昼夜及降雨条件的变化, 各影响因素在不同时期影响程度不同。昼间, 透水混凝土铺装的蒸发强度与太阳辐射及铺装含水量正相关, 且当前期有降雨时, 相关性会明显提高。夜间, 前期无降雨时蒸发强度接近零, 仅随风速变化有较小的波动; 当前期有降雨时, 气温越高, 风速越大, 铺装含水量及表面温度越高, 蒸发强度也越大, 大气相对湿度增加会导致铺装蒸发强度减小。在旱季, 透水混凝土铺装作为一种多孔介质, 其表面在适当天气条件下发生的吸湿现象将持续补充铺装含水量, 促进蒸发, 是影响蒸发强度的重要因素。

**关键词** 渗透铺装; 蒸发强度; 降雨; 吸湿

## Dynamic Variation Characteristics and Influencing Factors of Evaporation Intensity of Permeable Pavement

ZHANG Jingyi<sup>1</sup>, QIN Huapeng<sup>1,†</sup>, ZHAI Yanyun<sup>2</sup>

1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; 2. Shenzhen Eco Vista Tech. Co. Ltd., Shenzhen 518055; †Corresponding author, E-mail: qinhp@pkusz.edu.cn

**Abstract** A typical evaporation simulation platform for permeable concrete pavement is designed and built. The variation process of moisture content, evaporation, moisture absorption, surface temperature and the weather conditions in Shenzhen city are continuously monitored and recorded under the natural environment conditions, which are carried out to analyze the variations in the evaporation intensity of the pavement, and to explore the main influencing factors. The results show that, in the rainy season, the rainfall can significantly increase the evaporation intensity of permeable concrete pavement, but its influence is limited, and this enhancement effect will gradually weaken to a lower level in eight hours. With the variation of time and rainfall conditions, the influence degree of many factors is different in different periods. During the daytime, the evaporation intensity of permeable concrete pavement is positively correlated with the solar radiation and moisture content. During the nighttime, the evaporation intensity is close to zero when there is no rain in the early stage, which is only correlated with the change of wind speed. While after the rainfall, the higher air temperature, greater wind speed, higher moisture content and surface temperature of the pavement will increase the evaporation intensity, however the increase of the relative humidity will lead to the decrease of the evaporation. In the dry season, permeable concrete pavement, as a porous medium, can increase moisture content and promote evaporation intensity by the moisture absorption on the surface of the pavement, which is an important factor affecting the dynamic variations of the evaporation intensity.

**Key words** permeable pavement; evaporation intensity; rainfall; moisture absorption

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07501005)和流域生态工程学科建设资金(深发改[2017]542号)资助

收稿日期: 2019-06-27; 修回日期: 2019-08-29

在快速城市化过程中,路面硬化对城市生态环境造成显著影响。不透水下垫面比例的增加造成雨水下渗量与蒸发量的减少,破坏了水文循环,加剧城市热岛效应<sup>[1-3]</sup>。渗透铺装是低影响开发(low impact development, LID)和海绵城市建设的重要设施之一,具有良好的生态效益,近年来得到广泛应用。渗透铺装可以促进雨水的滞留和下渗,增加蒸发量,缓解城市热岛效应<sup>[4-9]</sup>。Starke等<sup>[10]</sup>的研究表明,与普通混凝土铺装相比,透水混凝土铺装平均可增加16%的日蒸发量。Yamagata等<sup>[11]</sup>对东京地区的渗透铺装系统表面进行喷淋,结果显示喷淋后路面的显热通量显著减小,潜热通量增加,路面表面温度与植被覆盖区域近似,且降温效果可延续整夜。

渗透铺装的蒸发强度主要受到路面结构、材料、含水量以及气象条件等因素的影响,其中铺装含水量是影响蒸发效应的重要因素。Li等<sup>[12]</sup>在晴热天气条件下,使相同体积不同孔隙度的透水性铺装材料饱和蓄水后,连续监测其蒸发强度及表面温度的变化,结果表明,孔隙度大的材料蒸发较快,表面温度较低。在较长的干旱条件下,渗透铺装的蒸发强度会随着铺装层含水量的减少不断降低至趋于相对稳定的状态<sup>[13]</sup>。Nemirovsky等<sup>[14]</sup>在实验室内模拟太阳辐射,测试铺装层水位对蒸发降温的影响,发现较深铺装层内的水分对维持蒸发降温效果的贡献十分微弱,维持一定的蒸发强度需依靠近表面的水分或进行地上补水。Qin等<sup>[15]</sup>的研究发现渗透铺装的蒸发阻力随面层含水量的减少呈指数性地增加。

尽管针对渗透铺装的蒸发效应已经开展了一些研究,但缺乏对连续天气变化条件下渗透铺装蒸发强度的动态变化规律以及不同时期关键影响因素的深入分析。本文设计并搭建一种典型透水混凝土铺

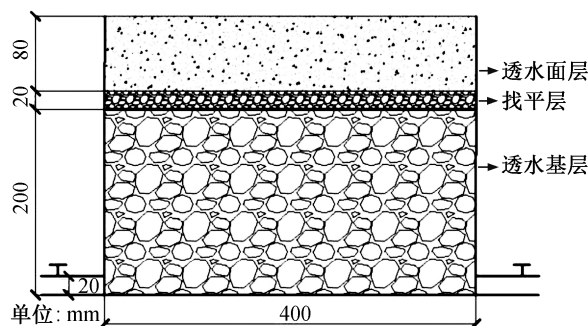
装的蒸发模拟实验平台,分别在深圳市的旱季和雨季进行为期3个月的连续监测。根据实验监测数据,分析透水混凝土铺装蒸发强度的动态变化规律以及降雨条件和吸湿现象对蒸发的影响,为渗透铺装蒸发效应的评估提供科学依据。

## 1 实验与方法

### 1.1 实验场地与装置

实验场地位于北京大学深圳研究生院E栋楼顶。深圳市地处广东省中南沿海区域,属亚热带海洋性气候。深受季风的影响,夏季盛行偏东南风,高温多雨;其余季节盛行东北季风,天气较干燥,气候温和。深圳市雨量较充足,每年4—9月为雨季,降雨在时空上分布不均匀。夏季是深圳降水最丰沛的季节,各地区差异较大,容易出现局地性洪涝灾害和短时雷雨大风。秋季是深圳的少雨干旱时期,多晴好天气,由于雨水少,蒸发大,因而容易发生秋旱且发展迅速,几乎每年都有不同程度的秋旱发生。冬季是深圳最冷的季节,经常处于干冷气流的控制之下,气温为全年最低,降水稀少。

实验装置为PVC材质,外加隔热材料保护,尺寸为400 mm×300 mm×300 mm。铺装层在垂直结构上分3层,由上至下分别为透水面层(8 cm)、找平层(2 cm)和透水基层(20 cm)。面层材料为透水混凝土,找平层材料为瓜米石,基层材料为13 mm级配碎石。装置使用铁架抬高调平,找平层与基层中间铺设土工布。基层底部设置排水管用于排出雨水,排水管选用DN20 PVC穿孔管,长度为70 cm,两端加阀门,实验槽内的管道在横向长度上每隔1 cm沿管周4个象限点打4个孔,孔直径为3 mm。具体结构设计及实验平台实景如图1所示。



(a) 结构设计图



(b) 实验平台实景图

图1 透水混凝土铺装结构设计及实验平台实景

Fig. 1 Structure design of permeable concrete pavement and picture of the experimental platform

### 1.2 监测方案

在自然环境条件下,连续监测透水混凝土铺装体系的含水量( $M$ )、蒸发量( $E$ )、吸湿量( $A$ )和表面温度等的变化以及深圳市的气象条件。其中,含水量、蒸发量和吸湿量的计算公式如下。

$$M_i = W_i - W_0, \quad (1)$$

$$E_i = \frac{W_{i-1} - W_i}{\rho_w S} (W_{i-1} - W_i > 0), \quad (2)$$

$$A_i = \frac{W_i - W_{i-1}}{\rho_w S} (W_i - W_{i-1} > 0), \quad (3)$$

式中,  $M_i$  为  $i$  时刻装置的含水量(g),  $E_i$  是小时蒸发量(mm/h),  $A_i$  是小时吸湿量(mm/h),  $W_i$  为  $i$  时刻装置的重力(g),  $W_0$  为装置完全干燥时的重力(g),  $S$  是装置底面积( $\text{cm}^2$ ),  $\rho_w$  为水的密度( $1 \text{ g/cm}^3$ )。

在实验槽底部放置 LYS220S 蒸渗仪,实时记录透水混凝土铺装含水量的变化。该仪器最大承重为 220 kg,精度为 0.1 g,数据记录时间间隔为 10 min。监测气象条件的 Davis 气象站(美国)位于北京大学深圳研究生院 E 栋楼顶,记录气象数据包括温度、相对湿度、风速、风向、气压、太阳辐射和降雨量等,数据记录时间间隔为 10 min。采用 SI-411 红外温度传感器监测记录铺装表面温度的变化,数据记录时间间隔为 10 min。

## 2 结果与分析

### 2.1 透水混凝土铺装蒸发强度的动态变化规律

本实验分别在雨季和旱季进行为期 3 个月的连

续监测,各选取其中连续两周的监测数据,分析透水混凝土铺装蒸发强度的动态变化规律。

雨季 8 月 26 日至 9 月 9 日期间连续两周的铺装含水量、降雨量及蒸发强度(本文认为降雨过程中的蒸发量可忽略不计)的变化过程见图 2。可以看出,降雨条件是影响雨季透水混凝土铺装蒸发强度变化的重要因素。有降雨时,通过滞留雨水,透水混凝土铺装的含水量显著增加;雨后则迅速减少,即蒸发作用大大增强。八月末降雨密集,雨量较大,雨前干旱时间较短,因此透水混凝土铺装中滞留大量雨水,含水量较高;九月初降雨前干旱时间较长,有利于铺装蒸发,含水量整体上比八月末低。

旱季 3 月 25 日人工模拟 100 mm 降雨后,连续干旱两周内透水混凝土铺装实验平台的含水量、小时蒸发量、小时吸湿量(蒸发量为负值时,其绝对值即为吸湿量)的变化过程如图 3 所示。可以看出,3 月 25 日中午 12:00 降雨及径流过程完全结束后,由于铺装含水量充足且昼间太阳辐射等气象条件适宜,随铺装蒸发的增强,含水量下降较快。当日晚间,蒸发强度下降,含水量缓慢减少,至第二天早晨 7:00 后,随蒸发的增强,铺装含水量再次迅速减少。降雨结束 24 小时后的干旱时间内,铺装含水量在持续无降雨补充的情况下却呈现规律性的上下波动。昼间太阳辐射较强时,含水量随蒸发作用的加强而下降,每日傍晚至夜间,铺装含水量却呈上升趋势。根据监测数据分析,推测是由于透水混凝土铺装表面在适当的天气条件下发生吸湿而补充含水

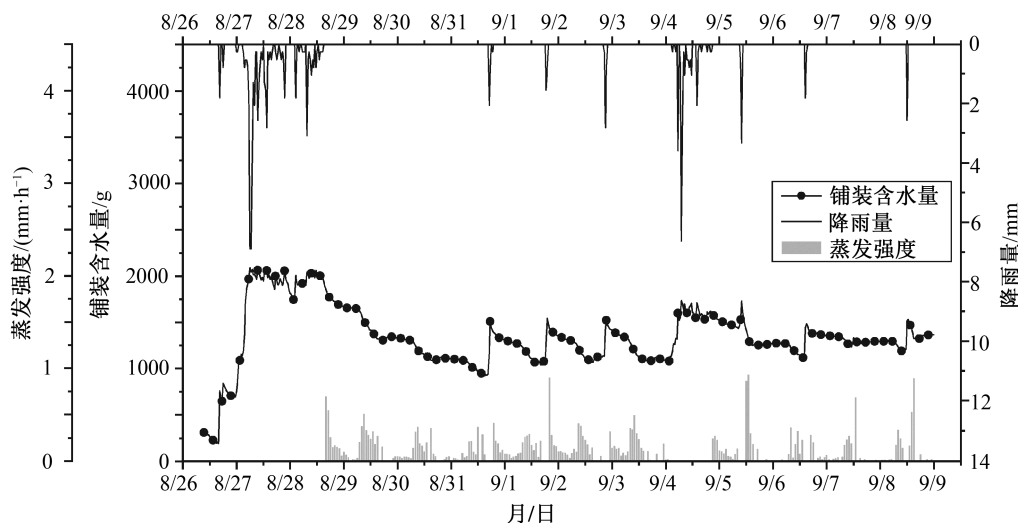


图 2 雨季连续两周透水混凝土铺装含水量、降雨量及蒸发强度的变化

Fig. 2 Variations of moisture content, precipitation and evaporation intensity during two consecutive weeks in rainy season

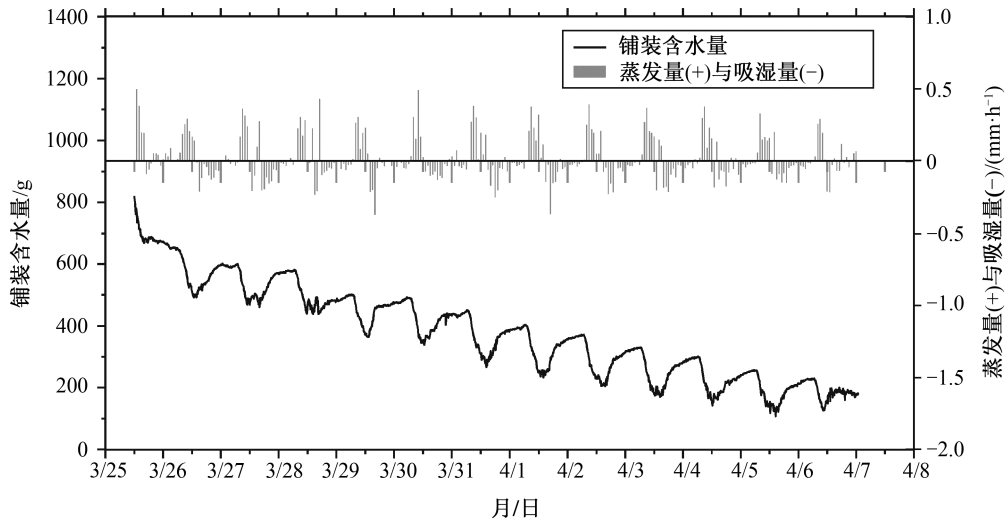


图3 旱季雨后两周干旱期内透水混凝土铺装含水量、蒸发量及吸湿量的变化

Fig. 3 Variations of moisture content, evaporation and moisture absorption during two consecutive weeks in dry season

量导致。每日早晨 7:00 左右, 随太阳辐射的增强, 蒸发速率加快, 铺装含水量快速下降; 每日 13:00–17:00 之间, 铺装开始吸湿增重, 含水量增加; 凌晨 1:00 左右, 吸湿速率减慢, 透水混凝土铺装的吸湿与蒸发过程基本上达到平衡, 含水量增加减缓; 第二天 7:00 左右蒸发再次加强。在两周的干旱过程中, 铺装含水量随时间整体上呈下降趋势, 但由于每日吸湿过程对水分的持续补充, 铺装的日蒸发量未明显降低(图 4)。

### 2.2 降雨条件对蒸发强度动态变化的影响

降雨可显著地增加透水混凝土铺装的蒸发强度。选择雨季的监测数据, 按照昼间且前期无降雨、昼间且前期有降雨、夜间且前期无降雨和夜间且前期有降雨(分析时间段的初始时刻前 6 小时内有降雨, 则归类为前期有降雨, 反之则归类为前期无降雨)4 个阶段, 对铺装的蒸发过程逐半天进行统计分析, 结果如图 5 所示。可以看出, 在前期无降

雨的条件下, 铺装昼间和夜间的蒸发速率均较低; 降雨后, 无论昼夜, 透水混凝土铺装的蒸发效应均有所增强, 且昼间的蒸发更强, 波动更大。

统计监测期间干旱无雨条件下, 透水混凝土铺装的小时蒸发量以及相应时段内的气象条件、铺装含水量、铺装表面温度及其与气温的温差, 同样分昼间且前期无降雨、昼间且前期有降雨、夜间且前期无降雨和夜间且前期有降雨 4 个阶段进行 Spearman 相关性分析, 其中气象条件包括气温、相对湿度、太阳辐射和风速, 各因素分别与小时蒸发量的相关性分析结果见表 1。

由表 1 可知, 透水混凝土铺装的蒸发强度在不同时期受到不同关键因素的影响。昼间, 铺装的蒸发强度与太阳辐射及铺装含水量显著正相关, 而与空气温湿度、风速、铺装表面温度及其与气温的温差等因素无显著相关性; 当前期有降雨时, 由于铺装层含水量的增加, 蒸发作用得到增强, 蒸发强度

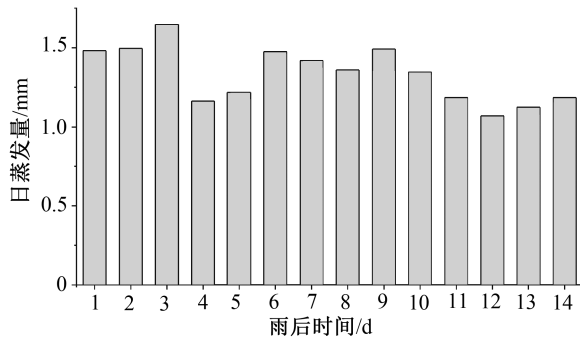


图4 旱季雨后铺装日蒸发量变化

Fig. 4 Variations of daily evaporation after rain in dry season

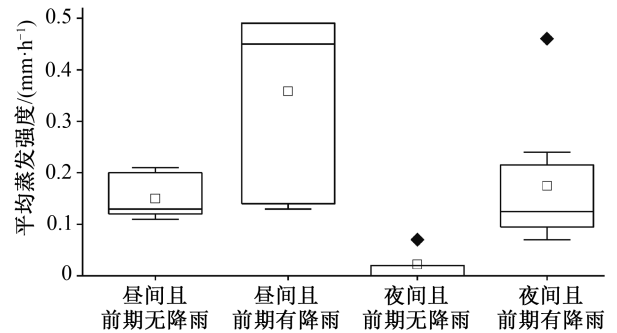


图5 铺装半天内平均蒸发强度

Fig. 5 Average evaporation intensity in half a day

表1 透水混凝土铺装的小时蒸发量与各影响因素间的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between the hourly evaporation and the influencing factors of the pavement

不同阶段	空气温度	铺装表面温度	铺装表面温度与气温温差	相对湿度	风速	太阳辐射	铺装含水量
昼间且前期无降雨	-0.152	-0.137	-0.212	0.128	-0.089	0.295**	0.298**
昼间且前期有降雨	-0.263	-0.383	-0.252	0.348	-0.161	0.528**	0.566**
夜间且前期无降雨	0.096	0.034	-0.015	-0.174	0.325**	—	0.125
夜间且前期有降雨	0.321**	0.305**	0.193*	-0.406**	0.491**	—	0.396**

注: \*\*表示在置信度(双侧)为0.01时,相关性是显著的; \*表示在置信度(双侧)为0.05时,相关性是显著的。

与太阳辐射及铺装含水量的相关性也明显提高。夜间,前期无降雨时,透水混凝土铺装的蒸发强度接近零,仅随风速变化有较小的波动;当前期有降雨时,透水混凝土铺装的蒸发强度与气温、风速、含水量、铺装表面温度及其与气温的温差等因素正相关,与大气相对湿度负相关,即气温越高,风速越大,铺装含水量及表面温度越高,则蒸发强度越大,而大气相对湿度的增加会导致铺装蒸发强度的减小。这是由于蒸发作用实际上是液体中分子热运动的动能达到一定程度,挣脱液面进入空气的过程,辐射越强,温度越高,风速越大,则水分子热运动的动能越大,蒸发就越强,且含水量越大,可供蒸发的水分就越充足。同时,空气中的分子也会进入液体,当两个过程平衡时,宏观上就不再蒸发,因此较高的大气相对湿度反而会在一定程度上降低蒸发强度。由此可知,降雨不仅会直接影响透水混凝土铺装蒸发强度的大小,还会影响其他因素对蒸发强度的影响程度。

分析降雨后半天内铺装小时蒸发量的变化过程,结果如图6所示。可以看出,降雨虽然可以增

强透水混凝土铺装的蒸发强度,但影响的持续时间有限,在深圳市雨季的天气条件下,8小时内这种增强效应就会逐渐减弱至较低水平。

### 2.3 透水混凝土吸湿现象对蒸发强度动态变化的影响

作为一种多孔介质,透水混凝土铺装的表面在适当的天气条件下会吸收空气中水分。透水混凝土可以通过分子引力、静电引力和毛细管力等作用,从潮湿的空气中吸附水分,吸湿能力通常与材料的理化性质、表面微结构和外界温湿度等有关<sup>[16]</sup>。吸湿现象主要是由多孔介质表面与近表面大气之间的温度差和湿度差引起<sup>[17-20]</sup>。温差是控制水分运移方向和流通量的决定性因素,水分在温度梯度的作用下,从高温处向低温处运移。当材料孔隙中空气的相对湿度低于大气相对湿度时,也会发生吸收空气中水汽的现象,近地面空气相对湿度越大,越有利于吸湿现象的发生。

从2.1节已知,在旱季,吸湿现象是影响透水混凝土铺装蒸发强度动态变化的重要因素。选择3月31日0:00—4月3日0:00共72小时的监测数据

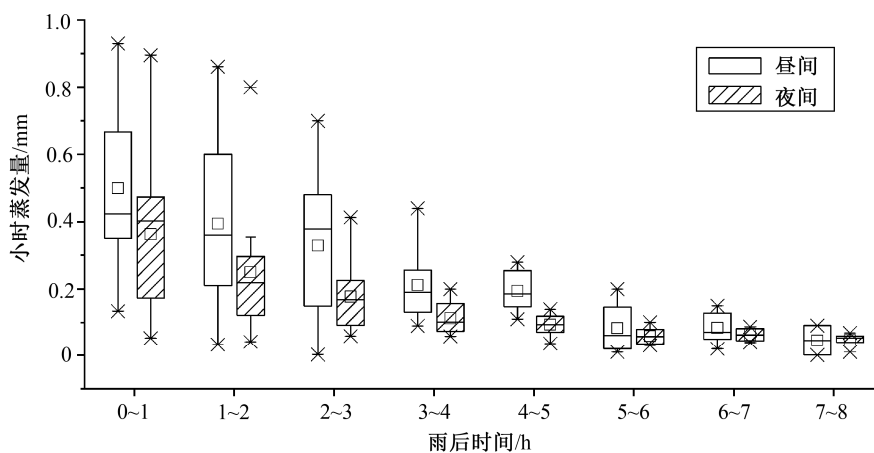


图6 雨季铺装雨后小时蒸发量变化

Fig. 6 Variations of hourly evaporation after rain in rainy season

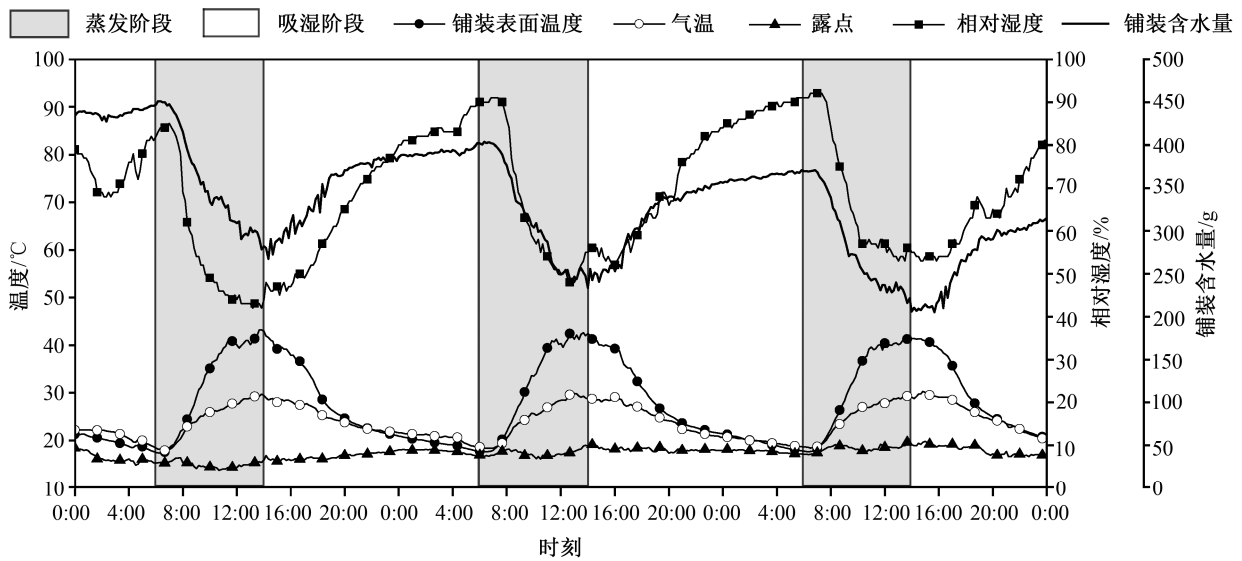
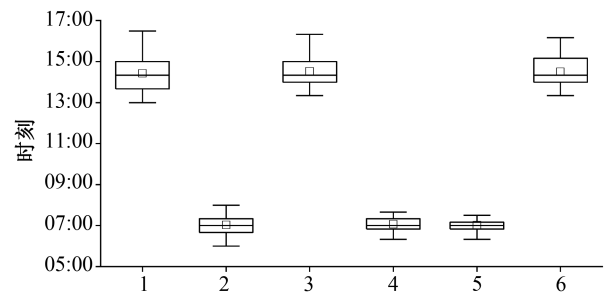


图7 吸湿过程的分析

Fig. 7 Analysis of the process of moisture absorption

进行吸湿现象分析,连续3天内铺装表温、气温、露点温度、大气相对湿度及铺装含水量随时间的变化规律如图7所示。可以看出,这3天内铺装表面温度及气温均未达到露点,表明无凝结现象发生,透水混凝土铺装主要通过吸湿作用增加含水量。在此期间,吸湿现象均是从下午14:00左右开始,至次日早晨6:00左右结束。14:00—22:00期间,铺装表面温度高于气温,含水量却升高,这是因为经过上午及中午高强度蒸发的水分散失后,铺装表面较干燥,加上大气相对湿度开始逐渐升高,铺装表面与大气之间形成较高的湿度差,有利于吸湿现象的发生。22:00—6:00期间,铺装表面温度略低于气温,在温度梯度的作用下,水分从大气向铺装表面传递,促进吸湿现象的发生。从图7可以看出,透水混凝土铺装开始吸湿的时刻是在大气相对湿度开始升高和气温开始下降的拐点,而在相对湿度开始下降和气温开始升高的拐点时吸湿结束。统计旱季监测期间每一天铺装含水量、气温及相对湿度变化的时间拐点,结果如图8所示。可以看出,铺装含水量开始上升的时刻与大气相对湿度开始上升和气温开始下降的时刻基本上吻合,铺装含水量开始下降的时刻与大气相对湿度开始下降和气温开始上升的时刻也基本上吻合,由此可证实上述推论。

在已有的研究中,很少关注透水混凝土铺装的吸湿现象。在旱季少雨的条件下,吸湿作用是影响



1: 铺装含水量开始上升; 2: 铺装含水量开始下降; 3: 相对湿度开始上升; 4: 相对湿度开始下降; 5: 气温开始上升; 6: 气温开始下降

图8 旱季监测期间各因素变化时间拐点统计

Fig. 8 Statistics on points of time inflection of each factor during dry season

蒸发强度动态变化的重要因素。缺乏降雨时,渗透铺装从空气中吸收的水分将成为铺装含水量的重要补充,而铺装含水量的增加对增强蒸发有显著的影响。透水混凝土铺装的蒸发与吸湿为互逆的两个过程,二者之间相互影响,相互作用,综合调控城市水文及热环境。

### 3 结论

本文的分析结果表明,透水混凝土铺装的蒸发强度主要受太阳辐射等气象条件及铺装本身含水量的影响,在铺装结构和材料一定时,降雨条件以及铺装表面的吸湿现象分别是雨季和旱季中影响蒸发强度动态变化的重要因素。

在雨季,降雨可显著地增加透水混凝土铺装的蒸发强度,但影响的持续时间有限,在深圳市雨季的天气条件下,8小时内这种增强效应就会逐渐减弱至较低水平。随着昼夜及降雨条件的变化,透水混凝土铺装的蒸发强度与各影响因素间的相关性也会发生变化。从小时尺度上看,昼间,透水混凝土铺装的蒸发强度与太阳辐射及铺装含水量正相关,当前期有降雨时,其相关性也明显提高。夜间,前期无降雨时透水混凝土铺装的蒸发强度接近零,仅随风速变化有较小波动;当前期有降雨时,气温越高,风速越大,铺装含水量及表面温度越高,蒸发强度越大,而大气相对湿度增加会导致铺装蒸发强度减小。因此,降雨不仅直接影响透水混凝土铺装的蒸发强度,还会影响其他因素对蒸发强度的影响程度。

在旱季,透水混凝土铺装作为一种多孔介质,其表面在适当天气条件下发生的吸湿现象将持续补充铺装含水量,促进蒸发,是影响蒸发强度动态变化的重要因素。透水混凝土铺装开始吸湿的时刻往往是在大气相对湿度开始升高和气温开始下降的拐点,而在相对湿度开始下降和气温开始升高的拐点时结束吸湿。因此,在对透水混凝土铺装的蒸发效应进行研究与评估时,吸湿过程的作用不容忽视,应当综合考虑在连续天气变化条件下各影响因素间的相互作用。

在下一步的研究中,可构建水热平衡模型,模拟渗透铺装的蒸发与吸湿过程,以便更好地评估长时间尺度动态变化条件下的水文及热效应。

### 参考文献

- [1] Sieffert Y, Huygen J M, Daudon D. Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering-architecture collaboration. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 67: 125-138
- [2] Nakayama T, Fujita T. Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(2): 57-67
- [3] 王琳, 徐涵秋. 城市蒸发散量与相关生态要素的定量关系. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 255-261
- [4] Scholz M, Grabowiecki P. Review of permeable pavement systems. *Building & Environment*, 2007, 42(11): 3830-3836
- [5] Asaeda T, Ca V T. Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment. *Building and Environment*, 2000, 35(4): 363-375
- [6] Brown R A, Borst M. Quantifying evaporation in a permeable pavement system. *Hydrological Processes*, 2015, 29(9): 2100-2111
- [7] 韩理亚. 城市道路透水铺装透水功能设计计算与应用研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014
- [8] 李美玲, 刘京, 李彪, 等. 透水性铺装系统与大气间热水分传输过程实验方法及初期实验研究. *建筑科学*, 2013, 29(6): 73-78
- [9] 汪俊松, 张玉, 孟庆林, 等. 透水路面蒸发降温效应研究综述. *建筑科学*, 2017, 33(4): 142-149
- [10] Starke P, Göbel P, Coldewey W G. Urban evaporation rates for water-permeable pavements. *Water Science & Technology*, 2010, 62(5): 1161-1169
- [11] Yamagata H, Nasu M, Yoshizawa M, et al. Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater. *Water Science & Technology*, 2008, 57(5): 763-772
- [12] Li H, Harvey J, Ge Z. Experimental investigation on evaporation rate for enhancing evaporative cooling effect of permeable pavement materials. *Construction & Building Materials*, 2014, 65(9): 367-375
- [13] Syrrakou C, Pinder G F. Experimentally determined evaporation rates in pervious concrete systems. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2014, 140(1): 04013003
- [14] Nemirovsky E M, Welker A L, Lee R. Quantifying evaporation from pervious concrete systems: methodology and hydrologic perspective. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2013, 139(4): 271-277
- [15] Qin Y, Hiller J E. Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete. *Construction & Building Materials*, 2016, 111: 77-84
- [16] 于航, 王小林. 混凝土多孔介质等温吸湿过程的数值模拟. *电力与能源*, 2007, 28(3): 171-174
- [17] 韩双平, 荆继红, 荆磊, 等. 温度场与凝结水的观测研究. *地球学报*, 2007, 28(5): 482-487
- [18] 郭占荣, 刘建辉. 中国干旱半干旱地区土壤凝结水研究综述. *干旱区研究*, 2005, 22(4): 576-580
- [19] 冯金朝, 刘成敏. 沙坡头地区土壤水分吸湿凝结的动态观测与理论计算. *中国沙漠*, 1998, 18(1): 11-15
- [20] Agam N, Berliner P R. Diurnal water content changes in the bare soil of a coastal desert. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 5(5): 922-93