

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.019

## 不同降雨条件下透水铺装水量平衡分析

欧阳友<sup>1,2</sup>, 潘兴瑶<sup>1</sup>, 杨默远<sup>1</sup>, 和继军<sup>2</sup>, 张雪<sup>1,2</sup>, 徐晋轩<sup>1,3</sup>,  
黎光和<sup>1,4</sup>

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048; 3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 4. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 透水铺装是常用的低影响开发技术之一, 具有调控径流、补给地下水等功能。为深入了解透水铺装的水文转化过程、识别水文转化规律, 借助蒸渗仪等设备监测降雨、土壤水分、深层渗漏、砾石层出流与蒸发过程。在天然降雨和人工降雨两个监测时间序列中, 砾石层仅在降雨强度为 98 mm/h 的人工降雨中产生出流, 表明透水铺装的径流削减效果良好。天然降雨和人工降雨条件下深层渗漏量分别占降雨损失的 75% 和 91%, 深层渗漏是透水铺装主要的水分损失项, 透水铺装截留的大部雨水通过下渗回补地下水。位于换土层的 2 层监测土壤, 其含水率变化较一致, 且对降雨的响应较强; 而位于原状土层的 3 层监测土壤, 对降雨的响应随着土壤埋深的增加而降低。

**关键词:** 透水铺装; 蒸渗仪; 土壤含水率; 蒸发

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0127-05

## Water Balance of Permeable Pavement under Different Rainfall Conditions

OUYANG You<sup>1,2</sup>, PAN Xing-yao<sup>1</sup>, YANG Mo-yuan<sup>1</sup>, HE Ji-jun<sup>2</sup>, ZHANG Xue<sup>1,2</sup>,  
XU Jin-xuan<sup>1,3</sup>, LI Guang-he<sup>1,4</sup>

(1. Beijing Water Science & Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Permeable pavement is one of the commonly used low impact development technologies, which can regulate runoff and replenish groundwater. This paper monitored the rainfall, soil moisture, deep seepage, gravel outflow and evaporation by means of lysimeter and other equipments, so as to deeply understand the hydrological transformation process and identify the hydrological transformation law of permeable pavement. In the two monitoring time series of natural rainfall and artificial rainfall, the gravel layer only produced outflow in the artificial rainfall with intensity of 98 mm/h, indicating that the runoff reduction performance of permeable pavement was good. Deep seepage in natural rainfall and

基金项目: 北京市科技计划项目(Z201100008220005); 国家重点研发计划项目(2019YFC0408703)

通信作者: 杨默远 E-mail: ymoyuan@163.com

artificial rainfall accounted for 75% and 91% of rainfall loss, respectively. It was the main water loss item of permeable pavement, and most of the rainwater intercepted by permeable pavement seeped back to replenish groundwater. The moisture content of the monitored soil in the two layers of the replaced soil layer was consistent, and the response to rainfall was strong. However, the response to rainfall of the three monitoring soil layers in the raw soil layer decreased with the increase of soil depth.

**Key words:** permeable pavement; lysimeter; moisture content of soil; evaporation

海绵城市是我国新一代雨洪管理理念,旨在从源头控制雨水径流,使区域开发后的水文特征接近开发前的自然过程。透水铺装因具有使用区域广、施工方便、可补充地下水、径流调控效果佳等优点,在海绵城市建设中被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。

透水铺装作为典型的海绵设施,其水文效应是国内外学者研究的热点<sup>[4-9]</sup>。例如,赵飞等<sup>[4]</sup>对增加了收集措施的透水铺装进行径流调控研究,结果表明透水铺装对径流量的削减率在40%~90%之间,对径流峰值的削减率在20%~80%之间;Brattebo等<sup>[6]</sup>监测的总降雨量为570 mm的15场降雨过程中,透水铺装无地表径流形成;黄国如等<sup>[7]</sup>研究发现,透水铺装的径流削减率随着雨前干旱期的增加而上升,且与降雨历时极显著相关、与降雨量显著相关;Hou等<sup>[9]</sup>对5种透水铺装进行了2.5、3.4、4.6、5.5 mm/min四种强度的降雨实验研究,结果表明随着土壤前期含水量的增加,入渗时间开始滞后,降雨120 min内入渗量逐渐减少。但是,目前对透水铺装的水文效应研究多集中于单场降雨尺度和单个水文过程,缺乏透水铺装的自然状态连续运行下的水文过程的系统监测与分析,尤其对透水铺装的蒸发和土壤水分关注较少。因此,有必要开展对透水铺装水文过程的连续性精细化监测,准确分析透水铺装入渗、蒸发等水文过程,量化评估其水文效应,以期为海绵城市建设中透水铺装的规划设计 and 推广应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验方案

透水铺装的面层材料为透水混凝土,将4 m<sup>2</sup>(2 m×2 m)的透水铺装布设在蒸渗仪上,蒸渗仪能实现实验的闭环监测与设施蒸发过程的监测。透水铺装结构自地表向下依次为60 mm面层(灰色透水混凝土长方砖)、50 mm找平层(1:6干硬性水泥砂浆)、400 mm垫层(200 mm C20透水混凝土、200 mm砾

石),依据实际透水铺装的监测环境,将砾石层以下厚度为890 mm的土层也纳为实验监测对象。土层由300 mm的换填土层与590 mm的原状土层组成,两土层之间用透水土工布隔开。透水铺装的实验监测剖面结构如图1所示。

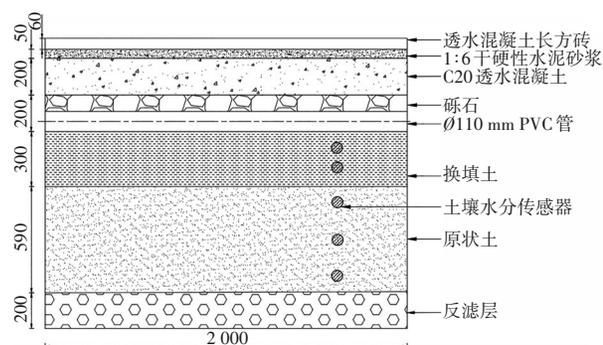


图1 透水铺装实验监测剖面结构

Fig.1 Permeable pavement experiment monitoring profile structure

本实验降雨由天然降雨与人工降雨两部分组成,天然降雨监测时间段为2020年4月8日—7月27日,期间最大日降雨量为44 mm。人工降雨实验的场次降雨量均较大,在10.00~100.00 mm之间,平均为39.14 mm,共9场,总降雨量为352.25 mm。

### 1.2 水文过程监测

透水铺装需监测的水文要素有降雨、砾石层出流、土壤含水量、深层渗漏、蒸发。降雨数据通过HOBO小型气象站获取;土壤含水量通过蒸渗仪的称重系统监测,为充分反映土壤含水量的变化过程,识别土壤含水量变化规律,在距离砖面600、700、900、1 100、1 300 mm处均布设一个5TE传感器监测土壤含水量;砾石层出流和深层渗漏均通过翻斗流量计监测,在砾石层安装一根穿孔管,使得砾石层的水可以从铁箱的开孔流出,并通过管道与翻斗相连(翻斗翻转一次,会形成一次脉冲,电脑会记录一次数据),同理,在铁箱反滤层底部也开一个孔,通过管道与翻斗相连,使得深层渗漏的水排出

并进行记录。

### 1.3 监测数据处理

#### 1.3.1 降雨量

气象站每间隔30 min记录一次降雨数据,降雨量的统计采用日降雨量。

#### 1.3.2 砾石层出流和深层渗漏

砾石层出流和深层渗漏均通过翻斗流量计监测,翻斗容积为0.08 L,因此砾石层出流量和深层渗漏量的计算公式为:

$$h_{\text{砾石层出流量}} = n_1 V / S \quad (1)$$

$$h_{\text{深层渗漏量}} = n_2 V / S \quad (2)$$

式中: $h_{\text{砾石层出流量}}$ 、 $h_{\text{深层渗漏量}}$ 分别为砾石层出流量、深层渗漏量,mm; $n_1$ 、 $n_2$ 分别为监测砾石层出流和深层渗漏的翻斗流量计的翻转次数; $V$ 为翻斗容积,L; $S$ 为透水铺装面积, $\text{m}^2$ 。

#### 1.3.3 土壤含水量

土壤含水量通过蒸渗仪的称重系统测得,称重系统每30 min记录一次数据,土壤含水量计算公式为:

$$d = 1000(W_t - W_0) / (S \cdot \rho) \quad (3)$$

式中: $d$ 为土壤含水量,mm; $W_t$ 、 $W_0$ 分别为最后和初始时刻的土体水质量,kg; $S$ 为透水铺装面积, $\text{m}^2$ ; $\rho$ 为水的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 天然降雨水循环过程量化分析

#### 2.1.1 降雨数据

监测期间降雨场次共28场,根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012),以24 h时段划分,大雨2场、中雨4场、小雨22场,总降雨量为210.40 mm。各月降雨情况如下:4月份为4场小雨,总降雨量为18.80 mm;5月份为5场小雨、2场中雨,总降雨量为38.60 mm;6月为6场小雨,总降雨量为18.40 mm;7月份为7场小雨、2场中雨、2场大雨,总降雨量为134.60 mm。

#### 2.1.2 水量平衡分析

透水铺装的水文输入要素为降雨,输出要素为砾石层出流、土壤含水量、深层渗漏、蒸发。监测期间透水铺装的降雨量为210.40 mm、深层渗漏量为158.06 mm、土壤含水量增加了12.02 mm、蒸发量为40.32 mm,且砾石层未发生出流。因此,透水铺装监测时段内的深层渗漏量、蒸发量和土壤含水

量变化占降雨量的比例分别为75.12%、19.16%和5.71%。进一步按月统计分析(见图2),透水铺装的深层渗漏量占比超过水分损失总量的50%(土壤湿度减少时,水分损失由降雨量和土壤含水量减少量组成,反之水分损失量为降雨量),蒸发量占水分损失的比例不小于10%。以上结果表明,透水铺装的渗透性较好,大部分雨水通过深层渗漏过程进入包气带,进而补充地下水。

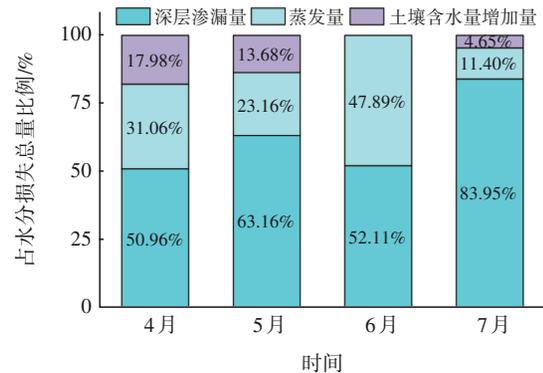


图2 各月水分损失详细情况

Fig.2 Details of monthly water loss

#### 2.1.3 土壤含水率变化过程分析

土壤含水率受降雨影响较大,但土壤含水率总体上保持稳定状态。距透水铺装面层600、700、900、1 100、1 300 mm的5层土壤的含水率分别在0.267~0.308、0.178~0.239、0.218~0.249、0.261~0.273和0.288~0.295之间,各土层含水率变化过程如图3所示。

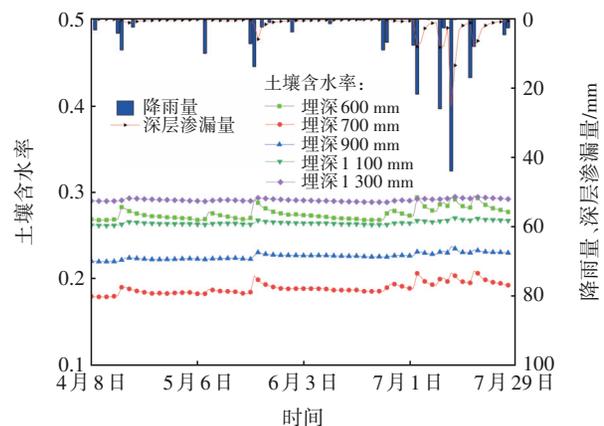


图3 土壤含水率变化过程

Fig.3 Change process of soil moisture content

换填土层位于透水铺装垫层以下,受透水铺装垫层入渗作用的影响显著,土壤含水率的变化与降雨过程一致性较好。随着埋深的增加,土壤含水率

呈现减小趋势,第2层(距透水铺装面层700 mm)的土壤含水率比第1层(距透水铺装面层600 mm)的土壤含水率减少了约0.090,主要原因是换填土层下部和原状土上部存在疏干层,导致第2层的土壤含水率较低。原状土层主要为砂石含量较高的土壤,其入渗能力较好,土壤含水率随着埋深的增加而增加。此外,进入原状土层之后,由于埋深较大,土壤含水率与对地面降雨的响应敏感度迅速降低,原状土层底部(距透水铺装面层1 100和1 300 mm)的土壤含水率基本保持稳定,随降雨变化不明显,基本处于饱和状态。

## 2.2 人工降雨实验水文过程量化分析

### 2.2.1 降雨数据

基于人工降雨实验,分析大雨量情景下透水铺装的水文过程规律。在2019年11月11日—29日开展了9场人工降雨实验,其中暴雨2场、大雨5场、中雨2场。人工降雨量介于10.00~100.00 mm之间,总降雨量为352.25 mm,场次降雨历时均为60 min。

### 2.2.2 水量平衡分析

人工降雨监测期间,透水铺装的深层渗漏量为320.50 mm,占水分损失总量的比例为90.99%,大部分的降雨通过下渗回补地下水,土壤含水量变化不明显,蒸发量占水分损失总量的7.85%,日平均蒸发量达到了1.46 mm。主要原因是人工降雨强度与降雨量均较大,虽然温度较低,但透水铺装的蒸发量仍较大。在2019年11月20日发生了砾石层出流事件,但出流量仅为0.06 mm,表明透水铺装雨强和降雨量较大且降雨较频繁的情况下,径流削减效果仍较好。人工降雨实验条件下,透水铺装的水量平衡分析如表1所示。

表1 人工降雨实验条件下水量平衡分析

Tab.1 Analysis of water balance in artificial rainfall experiment

水文要素	总量/mm	占比/%	平均值/mm
降雨量	352.25	—	18.54
砾石层出流量	0.06	0.02	0
深层渗漏量	320.50	90.99	16.87
土壤含水量增加量	4.03	1.14	0.21
蒸发量	27.66	7.85	1.46

### 2.2.3 土壤含水率变化过程分析

距透水铺装最上面的3层(600、700和900 mm)的土壤含水率对降雨的响应剧烈,埋深1 100 mm和

1 300 mm的土壤含水率虽然有波动,但随降雨变化不明显,基本处于饱和状态,各土壤层含水率的变化过程如图4所示。埋深600、700、900、1 100和1 300 mm各层的土壤含水率分别介于0.278~0.312、0.183~0.276、0.227~0.285、0.268~0.295和0.295~0.304之间,总体变化趋势与天然降雨条件下相近,各层土壤含水率的最小值与天然降雨条件下相差不大,个别土层最大值比天然降雨条件下有所增大,造成差异的主要原因是人工降雨强度较天然降雨强度大,两种降雨条件下的土壤含水率比较如表2所示。

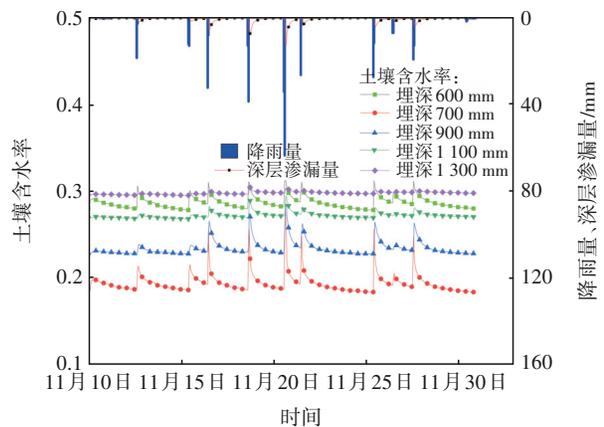


图4 人工降雨实验下的土壤含水率变化过程

Fig.4 Change process of soil moisture content in artificial rainfall experiment

表2 两种降雨形式的土壤含水率比较

Tab.2 Comparison of soil moisture between two types of rainfall

埋深/ mm	人工降雨			天然降雨		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
600	0.278	0.312	0.286	0.267	0.308	0.275
700	0.183	0.276	0.193	0.178	0.239	0.189
900	0.227	0.285	0.234	0.218	0.249	0.226
1 100	0.268	0.295	0.272	0.261	0.273	0.264
1 300	0.295	0.304	0.298	0.288	0.295	0.291

## 3 结论

① 透水铺装的入渗能力和蓄水能力较强,在天然降雨条件下,透水铺装雨水入渗与蒸发的比例接近4:1,在人工降雨条件下接近12:1。天然降雨和人工降雨条件下入渗比例分别占降雨量的80.83%、92.13%,其中深层渗漏量分别占降雨量的75.12%、90.99%,土壤含水量变化量分别占降雨量的5.71%、1.14%。因此,透水铺装的水分损失主要

为深层渗漏,大部分的雨水通过深层渗漏过程进入包气带,进而补充地下水。

② 根据天然降雨条件下的水文过程分析结果可知,降雨是影响透水铺装蒸发的主要因素。由人工降雨实验结果可知,降雨前期的土壤含水率也会影响土壤蒸发,且透水铺装降雨强度较大、降雨较频繁的情况下径流削减效果仍较好。原状土层的上层土壤含水率对降雨的敏感度较强;当土壤埋深超过900 mm时,土壤含水率与对降雨的敏感度迅速降低;当土壤埋深超过1 100 mm时,土壤含水率基本保持稳定,随降雨变化不明显,基本处于饱和状态。

#### 参考文献:

- [1] 李美玉,张守红,王玉杰,等. 透水铺装径流调控效益研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 105-112, 130.  
LI Meiyu, ZHANG Shouhong, WANG Yujie, *et al.* Runoff management performances of permeable pavements: a review [J]. Environmental Science and Technology, 2018, 41 (12): 105-112, 130 (in Chinese).
- [2] 韩天宇,宋璐逸,潘尚昆,等. 透水铺装控制和净化地表径流的研究进展[J]. 建筑节能, 2019, 47(6): 98-101.  
HAN Tianyu, SONG Luyi, PAN Shangkun, *et al.* Research progress on surface runoff control and purification efficiency of permeable pavement [J]. Building Energy Efficiency, 2019, 47(6): 98-101 (in Chinese).
- [3] 付恒阳,李榜晏. 4种常用低影响开发雨水管理技术研究进展[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 56-64.  
FU Hengyang, LI Bangyan. Research progress of four commonly used low impact development on rainwater management [J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 36(1): 56-64 (in Chinese).
- [4] 赵飞,张书函,陈建刚,等. 透水铺装雨水入渗收集与径流削减技术研究[J]. 给水排水, 2011, 37(S1): 254-258.  
ZHAO Fei, ZHANG Shuhan, CHEN Jiangan, *et al.* Research on rainwater infiltration collection and runoff reduction technology of permeable pavement [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37 (S1): 254-258 (in Chinese).
- [5] 赵远玲,王建龙,李璐菡,等. 不同类型透水砖对雨水径流水量的控制效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14(3): 835-841.  
ZHAO Yuanling, WANG Jianlong, LI Luhan, *et al.* Effect of different types of permeable brick on the stormwater runoff quantity control [J]. Environmental Engineering Journal, 2020, 14 (3): 835-841 (in Chinese).
- [6] BRATTEBO B O, BOOTH D B. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement system [J]. Water Research, 2003, 37 (18): 4369-4376.
- [7] 黄国如,赵晓莺,麦叶鹏. 低影响开发措施对雨水径流的控制效应[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 29-36.  
HUANG Guoru, ZHAO Xiaoying, MAI Yepeng. Control effect of low impact development measures on rainwater runoff [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 29-36 (in Chinese).
- [8] 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.  
WANG Junsong. Study on Evaporative Cooling Characteristics of Pervious Pavements in Hot and Humid Areas [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [9] HOU L J, WANG Y, SHEN F C, *et al.* Study on variation of surface runoff and soil moisture content in the subgrade of permeable pavement structure [J]. Advances in Civil Engineering, 2020(8): 8836643.

作者简介:欧阳友(1997- ),男,湖南郴州人,硕士研究生,研究方向为海绵设施的水量水质转化过程和再生水的深度净化技术。

E-mail: oyy6554@163.com

收稿日期:2021-08-09

修回日期:2021-11-18

(编辑:刘贵春)