DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.02.17

# 滤芯渗井在不同下垫面的渗水性能研究

张光明[1], 李顺群[1], 芮子航[1], 吕欣蕾[1], 方大转[2], 包义勇[2], 银利军[3]
(1.天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2.安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601; 3.新乡职业技术学院, 河南 新乡 453000)

**摘 要**: 基于海绵城市建设理念,利用自行设计的降雨模拟装置,研究滤芯渗井在不同下垫面条件下对径流削减的效果,同时通过布置水位观测井来评价滤芯渗井的渗水性能。试验结果表明:布置滤芯渗井能够有效增加土体渗水性能,减少地表积水量;同一深度位置处,土体体积含水率随着监测点水平布置间距的增大而减小;同一水平位置处,土体体积含水率随着监测点埋置深度的加深而减小。研究结论在一定程度上验证了滤芯渗井能够提高场地土体的入渗效率,削减地表径流,可为滤芯渗井在海绵城市建设、老旧小区改造中提供理论依据和技术支持。

**关键词**: 海绵城市; 滤芯渗井; 下垫面渗水性能; 地表积水量; 体积含水率
**中图分类号**:TU992 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2023)02-0135-07

# Seepage performance of filter element seepage well under different underlying surfaces

**ZHANG Guangming**[1], **LI Shunqun**[1], **RUI Zihang**[1], **LÜ Xinlei**[1], **FANG Dazhuan**[2], **BAO Yiyong**[2], **YIN Lijun**[3]
(1. *School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin* 300384, *China*; 2. *Anhui Shui' an Construction Group Co., Ltd., Hefei* 230601, *China*; 3. *Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang* 453000, *China*)

**Abstract**: Based on the concept of sponge city construction, the effects of filter element seepage wells on the runoff reduction were studied under different underlying surfaces using a self-designed rainfall simulator, and monitoring wells were arranged to record the water level changes for the evaluation of the seepage performance of the filter element seepage well. The experimental results showed that the arrangement of the filter element seepage wells can effectively increase soil permeability and reduce the accumulation of surface runoff. When the soil depth is constant, the volumetric moisture content of soil decreases with the increase of horizontal spacing; when the horizontal spacing is constant, the volumetric moisture content of soil decreases with the increase of the soil depth. To some extent, the conclusion verifies that the filter element seepage well can improve the soil infiltration efficiency and reduce surface runoff. This approach can provide a theoretical basis and technical support for the construction of sponge city and the reconstruction of old residential areas.

**Key words**: sponge city; filter element seepage well; underlying surface permeability; surface runoff; volumetric moisture content

## 1 研究背景

近些年来,水资源危机、环境恶化、城市内涝等灾害给城市健康可持续化发展带来了巨大挑战[1-3]。不透水路面的增加使得城市下垫面的渗水效率大幅降低,导致雨季期间出现不同程度的内涝,对城市的基础设施和人民安全造成了严重的威胁。海绵城市作为全新的城市建设发展理念,在保护城市原有生态水环境下,可实现对雨水的综合利用,从而缓解城市内涝,推进城市的生态文明建设[4-6]。国外海绵城市建设包括日本推广的“雨水贮留渗透计划”、德国的小区雨水综合利用系统、澳大利亚墨尔本市的水敏性城市建设方案、英国针对水资源匮乏和水体污染严重提出的可持续发展城市系统

**收稿日期**:2022-07-06; **修回日期**:2022-11-21
**基金项目**:国家自然科学基金项目(41877251)
**作者简介**:张光明(1995—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事海绵城市方面的研究工作。
**通讯作者**:李顺群(1971—),男,河南卫辉人,博士,教授,主要从事岩土工程和海绵城市方面的研究工作。

等[7-8]。我国海绵城市建设起步较晚,大多采用绿色屋顶、雨水桶、蓄水池、植草沟等技术措施[9-10]。朱木兰等[11]通过绿化带土壤渗透性能试验表明,加入砂石和腐殖土可改善土壤渗透性能;孔向东[12]对比了 3 种不同下垫面的低影响开发技术,发现低影响开发技术能够减少地表径流;唐双成等[13]研究了砂土及黄土两种填充物对雨水花园中地表径流削减效果的影响。上述研究中的措施主要考虑地表以下 30 cm 以内的土体,没有充分利用地下水位以上的土体,严重影响到土体的储水蓄水能力,同时所研究的技术设施还存在建设周期长、造价高、老旧小区难以应用等缺点。

滤芯渗井具有施工简单、成本底、渗水性好的特点,是一种经济实用的低影响海绵城市渗水设施。侯英剑等[14]通过原位渗透试验研究表明,砂石渗井能够有效提高土体渗水效率;刘烨璇等[15]采用原位试验与数值模拟的方法验证了砂石渗井可大幅度增加雨水在土体内的下渗速度;朱希等[16]将建筑垃圾作为渗井填料,经试验量化分析表明,建筑垃圾渗井能够改变原始场地的渗水性能,同时有效提升雨水入渗效率。但是,目前对于滤芯渗井在不同下垫面的渗水性能还缺乏研究,为此本文设计了一种监测滤芯渗井渗水性能的试验装置,通过场地降雨模拟试验对不同下垫面的观测井水位、地表积水量和体积含水率进行监测与分析,以期为滤芯渗井装置在海绵城市建设中的进一步应用提供参考。

## 2 滤芯渗井技术与机理

当降雨引起地表积水过多时,滤芯渗井能够在短时间内将雨水引入深层地层,以减少地表径流并形成蓄水海绵体地下水库供日后使用,其渗流作用如图 1 所示。

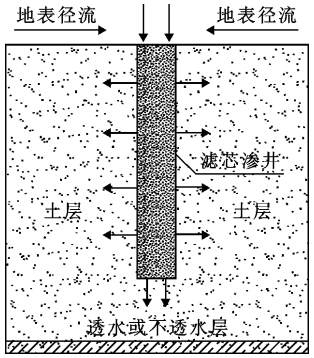



图 1 滤芯渗井渗流作用示意图

为了便于运输和埋置,滤芯通常制做为圆柱形,经过多次试验测试和现场应用,最终确定单根透水滤芯长度为 50 cm、直径为 10 cm,渗水效率最优的材料用量比例为石子 12 kg、水泥 1.8 kg、水 0.96 kg。本次试验区域埋置的滤芯长度为 100 cm,直径为 10 cm,现场预制完成的透水滤芯如图 2 所示。



图 2 试验用透水滤芯实物图

根据单个滤芯渗井的原位场地染色体示踪试验和水量平衡原理,给出关于滤芯渗井影响范围的 4 个假设:(1)滤芯渗井的渗透效率远远大于土层的渗透效率;(2)浸润锋前后分别对应初始体积含水率和饱和体积含水率;(3)入渗范围内初始含水率相等;(4)入渗过程中滤芯渗井入渗量与浸润体含水量的增加量相等。滤芯渗井入渗过程还符合 Green - Ampt 模型[17-18],则有以下关系式:

$$i(t) = K_s \frac{Z_f + S_f + l_1}{Z_f} \tag{1}$$

式中:$i(t)$ 为土体入渗速率,cm/min; $K_s$ 为土体饱和导水率,cm/min; $S_f$ 为基质吸力,cm; $Z_f$ 为湿润锋深度,cm; $l_1$ 为透水滤芯长度,cm。

$$t = \frac{\theta_s - \theta_i}{K_s}\left[l_2 - (S_f + l_1)\ln\frac{l_1 + S_f + l_2}{S_f + l_1}\right] \tag{2}$$

式中:$t$ 为入渗时间,min; $\theta_s$ 为土体饱和体积含水率; $\theta_i$ 为土体初始体积含水率; $K_s$ 为土体饱和导水率,cm/min; $l_1$ 为透水滤芯长度,cm; $l_2$ 为渗井底以下湿润体的轴长,cm。

单个滤芯渗井在土中的浸润体如图 3 所示。

## 3 试验场地概况

试验场地位于天津市西青区天津城建大学海绵城市示范片区,试验场地选址如图 4 所示,场地面积约为 225 $m^2$。试验区域包括 3 种不同下垫面共 6 种渗水试验场地,分别为原位场地、原位场地-滤芯渗井、透水砖路面、透水砖路面-滤芯渗井、大理石路面、大理石路面-滤芯渗井。试验场地土层由上至下分别为素填土、黏土、淤泥土,地下水水位距离地表2.5 m,

为弱潜水。各层土体的物理指标见表 1。

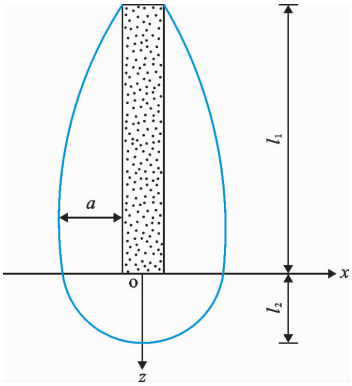



图 3　单个滤芯渗井浸润土体示意图

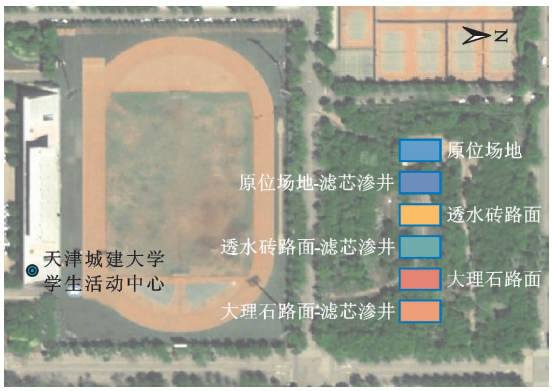



图 4　试验场地选址

表 1　试验场地土层的基本物理指标

| 土体 | 深度/m | 初始孔隙比 | 饱和容重/（kN·m$^{-3}$） | 渗透系数/（m·s$^{-1}$） | 泊松比 |
|---|---|---|---|---|---|
| 素填土 | 0～0.8 | 0.79 | 21 | $8.0\times10^{-5}$ | 0.3 |
| 黏土 | 0.8～2.1 | 0.41 | 21 | $1.2\times10^{-6}$ | 0.3 |
| 淤泥质土 | 2.1～5.0 | 0.57 | 21 | $8.5\times10^{-7}$ | 0.3 |

在试验区域布设水位观测井和滤芯渗井，水位观测井用于评价滤芯渗井在 3 种不同下垫面的渗水效率，自西向东在 6 种不同试验场地内共布置 6 个水位观测井，水位观测井和滤芯渗井布置如图 5 所示，每种下垫面的水位观测井装置构成如图 6 所示。

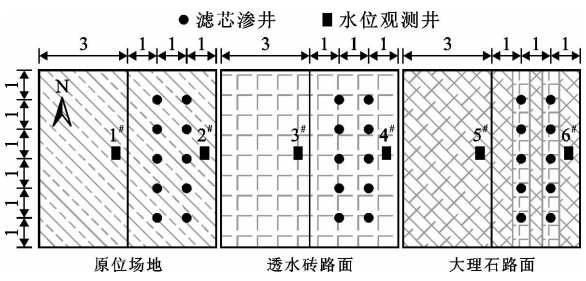



图 5　试验场地水位观测井和滤芯渗井布置（单位：m）

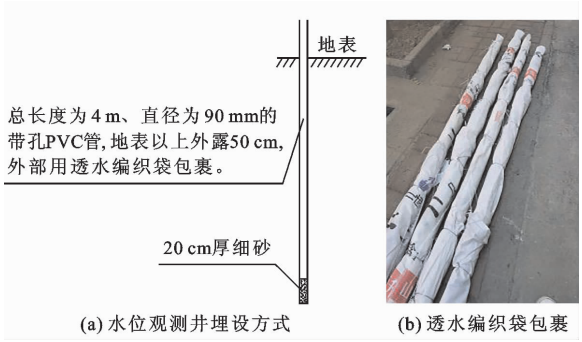



图 6　水位观测井装置

## 4　试验装置及方案

试验装置示意图如图 7 所示，试验装置由降雨模拟装置、土壤水分传感器、数据采集系统 3 部分组成，其中降雨模拟装置包括流量计、水泵、移动电源、蓄水桶、降雨喷头、输水管。

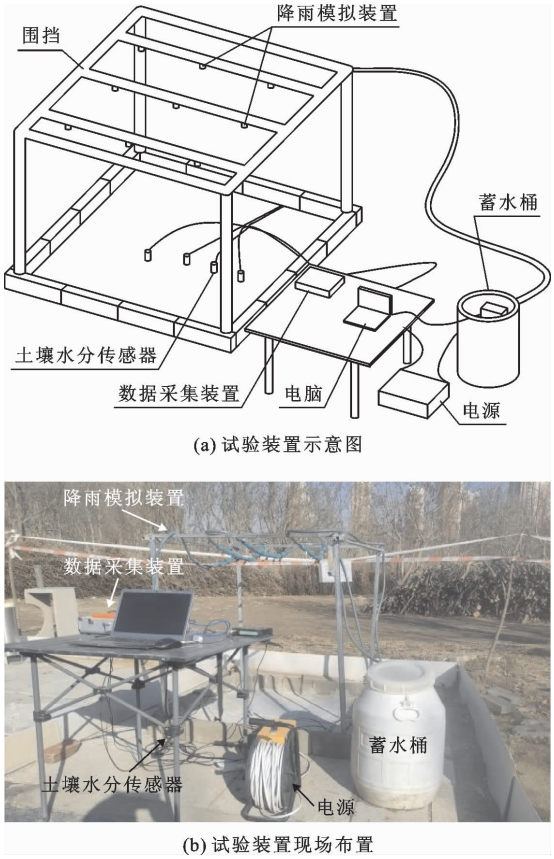



图 7　试验装置示意图及现场布置

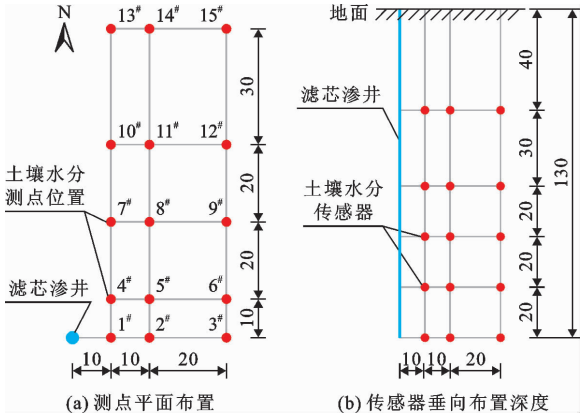
### 4.1　降雨模拟装置

降雨模拟装置主要由降雨支架、降雨喷头、输水软管和其他连接件组成。降雨支架由 8 根长为 1 m、宽度为 3 cm 的方钢搭建，带有降雨喷头的输水管均匀布置在降雨支架上，通过扎扣绑扎后与蓄水桶中的水泵连接。为了保证试验数据的准确性，在降雨支架四周布

置围挡,围挡底端与地面的缝隙用密封胶填充。

### 4.2 土壤水分传感器测点布置

为了能更准确地测量降雨过程中各个时刻的土体体积含水率变化,根据土壤水分传感器布置原则和埋设方法[19-21],分别沿滤芯渗井方向的竖向和横向布置,对设置滤芯渗井的 3 种不同下垫面的每种场地布置 15 个监测点(编号 1#~15#),在每个监测点下方 40、70、90、110、130 cm 深度处布设土壤水分传感器,各测点相对于滤芯渗井距离的平面布置及垂向深度布置如图 8 所示。

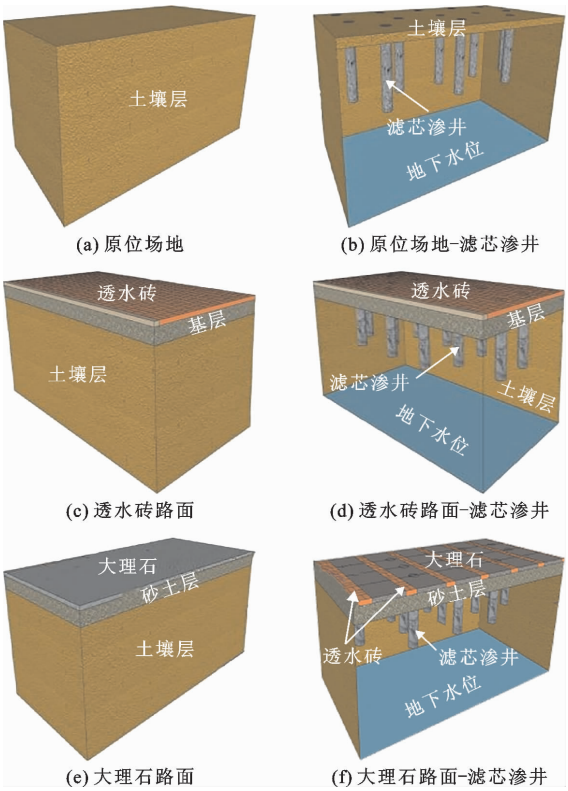



(a) 测点平面布置 (b) 传感器垂向布置深度

图 8 土壤水分传感器测点布置(单位:cm)

### 4.3 滤芯渗井在不同下垫面的组合方式

每种下垫面和滤芯渗井的组合方式如图 9 所示。




(a) 原位场地 (b) 原位场地-滤芯渗井

(c) 透水砖路面 (d) 透水砖路面-滤芯渗井

(e) 大理石路面 (f) 大理石路面-滤芯渗井

图 9 滤芯渗井在不同下垫面的组合方式

图 9 中用透水砖对大理石路面-滤芯渗井的部分大理石进行替换来提高其渗水性能。

### 4.4 试验方案设计

为了研究滤芯渗井与不同下垫面组合的渗水效率,经气象站查询天津市历年的气候资料,试验采用的降雨强度设定见表 2。每个方案的降雨历时均为 1 h,试验过程中每隔 5 min 记录一次数据。

表 2 滤芯渗井渗水效率试验方案

| 方案编号 | 下垫面类型 | 降雨强度/(mm·min$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 1-1 | | 0.5 |
| 1-2 | 原位场地 | 1.0 |
| 1-3 | | 1.5 |
| 2-1 | | 0.5 |
| 2-2 | 原位场地-滤芯渗井 | 1.0 |
| 2-3 | | 1.5 |
| 3-1 | | 0.5 |
| 3-2 | 透水砖路面 | 1.0 |
| 3-3 | | 1.5 |
| 4-1 | | 0.5 |
| 4-2 | 透水砖路面-滤芯渗井 | 1.0 |
| 4-3 | | 1.5 |
| 5-1 | | 0.5 |
| 5-2 | 大理石路面 | 1.0 |
| 5-3 | | 1.5 |
| 6-1 | | 0.5 |
| 6-2 | 大理石路面-滤芯渗井 | 1.0 |
| 6-3 | | 1.5 |

## 5 试验结果及分析

滤芯渗井在不同下垫面的渗水性能试验结果包括:3 种不同下垫面的水位观测井观测结果、地表积水量、各个测点的体积含水率。

### 5.1 水位观测井监测结果

对水位观测井进行了长达 8 个月的连续监测,各水位观测井的月均水位深度监测结果如图 10 所示。由图 10 可知,6 个水位观测井的水位在 3—7 月份整体呈下降趋势,7 月份进入主汛期后水位开始上升。其中 4#水位观测井的水位最高,5#水位观测井的水位最低,两者最大相差 0.91 m。原因是 4#水位观测井位于透水砖路面-滤芯渗井区域,在雨季时,降雨通过透水砖和滤芯渗井快速下渗,滤芯渗井

中汇集的雨水向四周土体扩散,导致其水位较高,而未设置滤芯渗井的 5# 水位观测井对应的为大理石路面,因其表层渗水能力较弱,雨水不能在短时间内渗入土体,大部分积水通过地表流向其他区域,只有少数积水渗入土体,故该区域的水位低于其他下垫面水位。

### 5.2　滤芯渗井与不同下垫面组合的地表积水量变化

图 11 ~ 13 为不同降雨强度时 3 种下垫面有无设置滤芯渗井的场地地表积水量随雨后时间变化的试验观测结果。

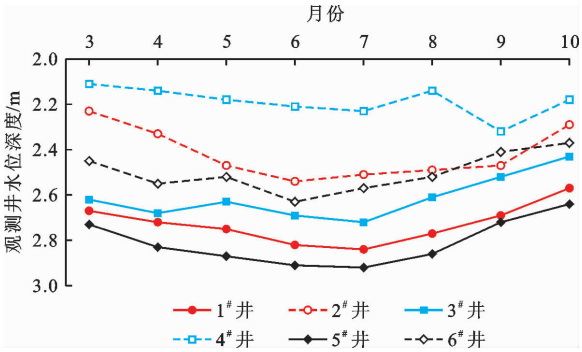



图 10　试验期各水位观测井月均水位深度监测结果

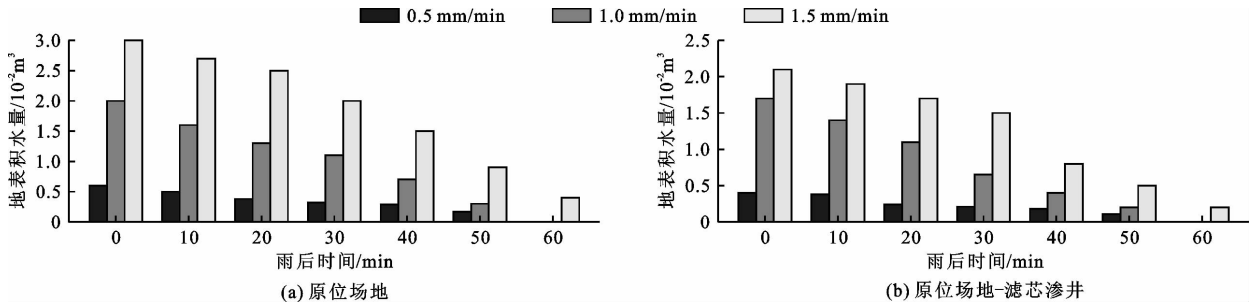



图 11　不同降雨强度下有无滤芯渗井的原位场地地表积水量随雨后时间的变化

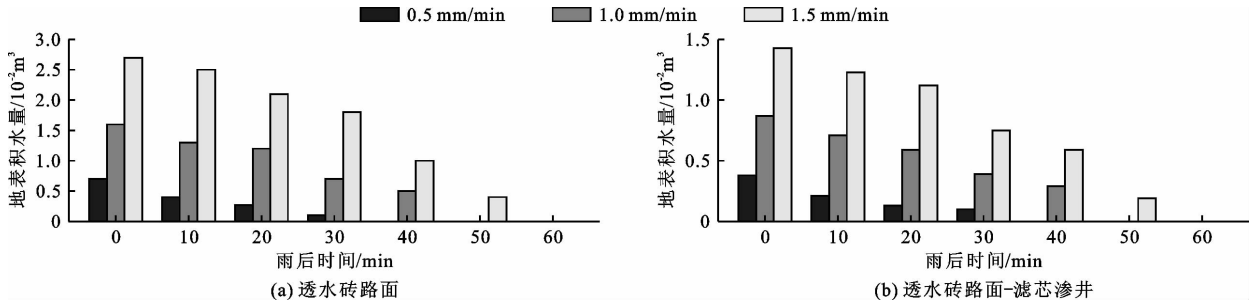



图 12　有无滤芯渗井的透水砖路面地表积水量随雨后时间的变化

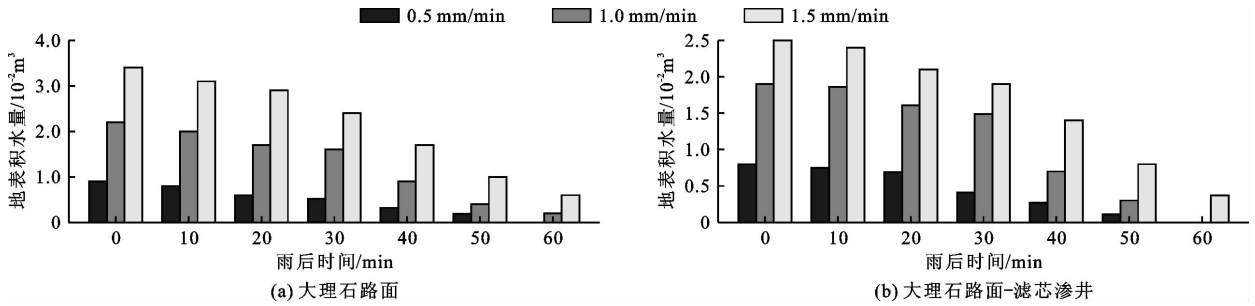



图 13　有无滤芯渗井的大理石路面地表积水量随雨后时间的变化

由图 11 ~ 13 可以看出,在 3 种不同下垫面布置滤芯渗井能够有效提高雨水的入渗效率,减少地表积水量,且透水砖路面结合滤芯渗井对地表积水量的削减效果最佳。当降雨强度为 0.5 和 1.0 mm/min 时,3 种不同下垫面的地表积水基本能够在 50 ~ 60 min 后完全消去,不存在积水现象;当降雨强度为 1.5 mm/min、雨后 30 min 时,设置滤芯渗井的 3 种不同下垫面与相应无滤芯渗井下垫面相比,原位场地路面的地表积水最大削减率为 32%,透水砖路面的地表积水最大削减率为 47%,大理石路面的地表积水最大削减率为 27%。分析认为:透水砖的渗水性能大于未经处理的原位场地,虽然用部分透水砖代替大理石路面来提高渗水性能,但相对于原位场地的渗水效果还是较差;其次因大理石的自重较大,造成其相邻的下部土体被压缩,使土体上端孔隙被封闭,雨水无法下渗到滤芯渗井,因而只能积聚在大理石路面地表,

故地表积水削减率小于其他两种路面。

### 5.3 滤芯渗井在不同下垫面的土体体积含水率变化

图 14 ~ 16 为设置滤芯渗井的 3 种下垫面各测点土体体积含水率随深度变化趋势的试验观测结果。由图 14 ~ 16 可以看出,同一深度位置处,土体体积含水率随着测点距滤芯渗井水平距离的增大而递减;同一水平位置处(即同一测点),土体体积含水率随着深度的增加而减小,最终趋于土体原始体积含水率,上述规律在透水砖路面土体中表现的尤为明显。产生上述现象的主要原因是土体的水平向渗透系数大于竖向渗透系数,且土体的渗透系数远远小于滤芯渗井的渗透系数,地表水通过滤芯渗井渗入土体,地表水的渗流速度随着距滤芯渗井距离的减小而递增,滤芯渗井削减径流的效果也就越显著,其所在位置的土体也过早达到饱和状态。其次,地表水进入滤芯渗井后还会发生径向或斜向扩散,扩散过程中势必会造成水头损失,且 3 种下垫面下部土体自身含有的杂质也会影响其渗水效率,故当水平距离一定时,土体体积含水率随深度的增大而不断降低。

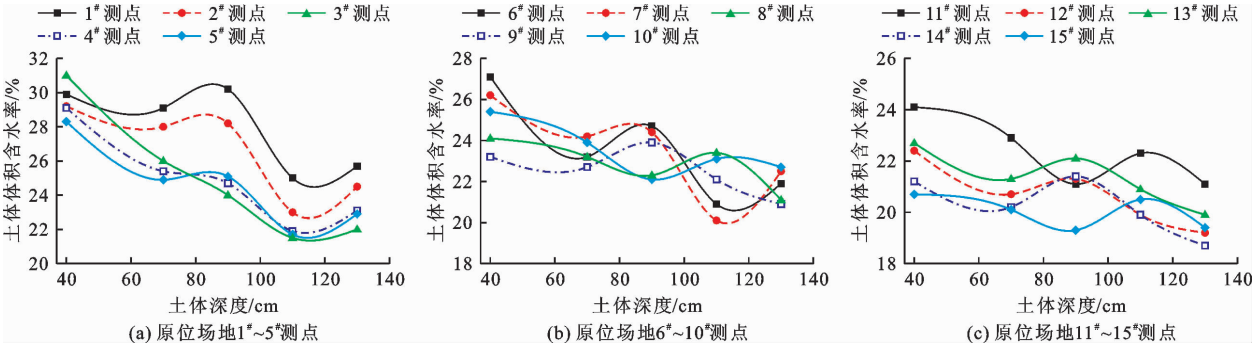



图 14 原位场地各测点土体体积含水率随深度的变化趋势

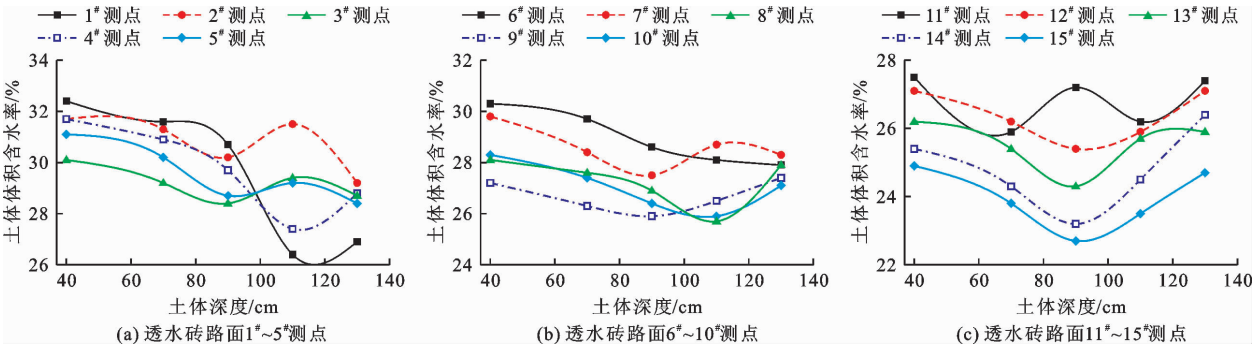



图 15 透水砖路面各测点土体体积含水率随深度的变化趋势

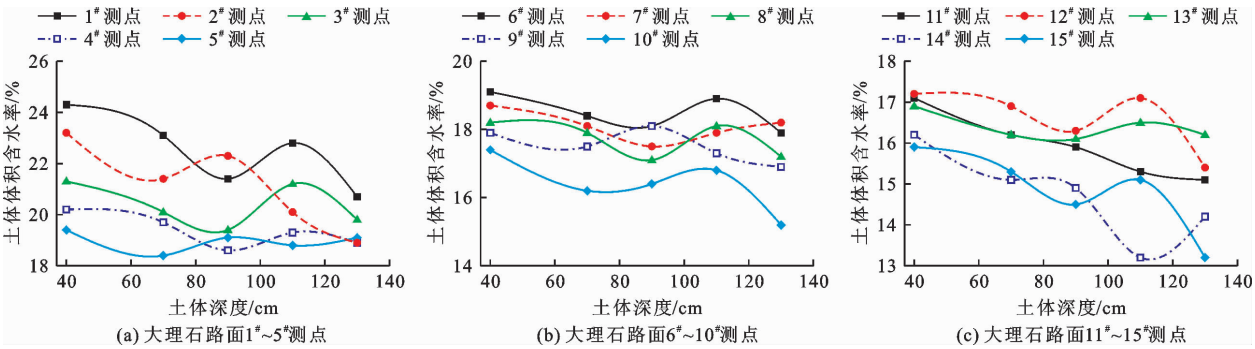



图 16 大理石路面各测点土体体积含水率随深度的变化趋势

## 6 讨 论

本文通过原位场地试验表明,滤芯渗井的布置能够加速雨水向土体的渗透,削减地表积水量,且渗水效率远远高于未设置滤芯渗井的同类型下垫面[13,22],这与已有的研究结论相符合。滤芯渗井的布置数量也会影响渗水效率,因此,如何既考虑成本又保证渗水效率的最大化,从而合理地布置滤芯渗

井是海绵城市建设中的一个重要问题。本试验仅研究了滤芯渗井在原位场地、透水砖路面、大理石路面 3 种下垫面对地表雨水径流入渗的动态响应,未考虑不同土质、不同布置间距、不同深度等对径流削减的影响,今后应考虑这些因素对研究加以完善。此外,面对城市内涝频发和水资源严重不足的情况,如何将现有海绵城市技术措施与滤芯渗井相结合将是未来研究的热点问题。

## 7　结　论

基于原位试验场地,利用自制试验装置进行滤芯渗井在不同下垫面的渗水试验,分析不同雨强下的地表积水量以及不同深度、不同位置的入渗土体体积含水率变化规律,得到以下结论:

(1)水位观测井的水位监测结果表明滤芯渗井的布置可以提高场地土体的渗水性能,减少地表径流,同时也可对地下水进行补给,有益于缓解城市水资源短缺的状况。

(2)滤芯渗井结合 3 种不同下垫面均能有效提高地表渗水效率,其渗水效果排序为透水砖路面-滤芯渗井 > 原位场地-滤芯渗井 > 大理石路面-滤芯渗井。

(3)在场地同一深度处,土体体积含水率随着距滤芯渗井水平距离的增大而减小;与滤芯渗井同一水平距离处,土体体积含水率随着深度的增大而减小,最终与土体原始体积含水率保持一致。

**参考文献:**


[1] 胡 楠,李 雄,戈晓宇. 因水而变——从城市绿地系统视角谈对海绵城市体系的理性认知[J]. 中国园林,2015,31(6):21 – 25.

[2] 童绍玉,周振宇,彭海英. 中国水资源短缺的空间格局及缺水类型[J]. 生态经济,2016,32(7):168 – 173.

[3] 张建云,王银堂,胡庆芳,等. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展,2016,27(6):793 – 799.

[4] 周夏飞,曹国志,於 方,等. 黄河流域水污染风险分区[J]. 环境科学,2022,43(5):2448 – 2458.

[5] 申 亚. 海绵城市建设理念下的新城建设管理策略[J]. 中国给水排水,2021,37 (18):47 – 51.

[6] 吴盈盈,佘敦先,夏 军,等. 典型 LID 措施对城市降雨径流过程影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):833 – 842.

[7] XIAO Liang. Integrated economic and financial analysis of China's Sponge City Program for water-resilient urban development[J]. Sustainability, 2018, 10(3): 669.

[8] WEI Huang, WEN Lin, LEI Huang, et al. Discussion of application of low impact development technology in the construction of sponge city in China[J]. Desalination and Water Treatment, 2020, 188: 297 – 302.

[9] 张 伟,王 翔,赵晨辰,等. 海绵城市建设实施路径探索——以宁波国家试点区系统化方案实施为例[J]. 给水排水,2021,57(S1):145 – 151.

[10] 周国华,徐国宾,武俊良,等. 天津生态城海绵城市建设系统化方案探索[J]. 中国给水排水,2020,36(12):65 – 69.

[11] 朱木兰,廖 杰,陈国元,等. 针对 LID 型道路绿化带土壤渗透性能的改良[J]. 水资源保护,2013,29(3):25 – 28 + 33.

[12] 孔向东. 三种典型 LID 渗透减排措施控制效果比选[J]. 铁道勘察,2015,41(4):86 – 90.

[13] 唐双成,罗 纨,贾忠华,等. 填料及降雨特征对雨水花园削减径流及实现海绵城市建设目标的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(1):73 – 78 + 102.

[14] 侯英剑,李顺群,王彦洋. 一种适用于海绵城市建设的渗水构件渗水性能分析[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版),2019,39(5):323 – 325 + 350.

[15] 刘烨璇,李顺群,胡铁馨,等. 砂石渗井在黏土地区海绵城市建设中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):113 – 118.

[16] 朱 希,李顺群,冯彦芳,等. 建筑垃圾雨水渗井在海绵城市中的应用[J]. 广西大学学报(自然科学版),2017,42(4):1415 – 1421.

[17] 朱昊宇,段晓辉. Green – Ampt 入渗模型国外研究进展[J]. 中国农村水利水电,2017(10):6 – 12 + 22.

[18] 郭向红,孙西欢,马娟娟,等. 不同入渗水头条件下的 Green – Ampt 模型[J]. 农业工程学报,2010,26(3):64 – 68.

[19] 李 堃,李建设,吴素萍,等. 基于实时控制灌溉系统的温室黄瓜土壤水分传感器合理埋设位置研究[J]. 灌溉排水学报,2015,34(7):18 – 23.

[20] 赵伟霞,李久生,王 珍,等. 滴灌均匀性对土壤水分传感器埋设位置的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(9):123 – 129.

[21] 张 益,马友华,江朝晖,等. 土壤水分快速测量传感器研究及应用进展[J]. 中国农学通报,2014,30(5):170 – 174.

[22] 余 嵘,赵 丹,刘渊博,等. SWMM 模型中不同 LID 措施在排水系统模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电,2016(1):35 – 38.