

新型渗井-透水网格措施的径流调控效果研究

梁 萌¹, 薛明星², 冯怀平¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 华邦建投集团股份有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘 要: 为更加合理地对雨水资源进行管理和调控,低影响开发(LID)措施日益成为我国许多城市“海绵化”的必然选择。透水网格被认为是一种有着良好雨洪管控效用的LID措施,然而大多情况下施工过程中不尽规范,土基多采用渗透性不良的土质,这使得径流调控及渗流效益难以充分发挥,故拟以透水网格砖孔布设渗井来改善该现状。采用试验与SWMM仿真相结合的方法,研究了在6场重现期降雨作用下新型渗井-透水网格措施较透水网格在径流调控方面的改善效果,以及100年重现期降雨条件下两种措施的入渗规律。结果表明,在不同降雨场次下,新型措施较透水网格雨量径流系数降低了9.94%~51.09%,洪峰流量削减率提高了2.91%~30.42%;滞峰时间延迟效果不显著,在3 min以内;在100年重现期降雨下湿润锋迁移速率提高了73.47%。

关键词: 透水网格; 渗井; SWMM模型; 径流调控; 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)03-0114-09

Runoff Regulation Effect of New Type Seepage Well and Permeable Grid Measures

LIANG Meng¹, XUE Ming-xing², FENG Huai-ping¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Huabang Construction Investment Group, Lanzhou 730030, China)

Abstract: In order to manage and control rainwater resources more reasonably, the low impact development (LID) has increasingly become an inevitable choice for sponge city construction of many cities in China. Permeable grid is considered to be a low impact development measure with good stormwater management effect. However, most of permeable grid is not standardized, and the soil foundation is mostly made of poorly permeable soil, which makes it difficult to fully utilize runoff regulation and seepage benefits. Therefore, seepage wells were planned to be laid in the permeable grid pavement brick hole to improve the present situation. Using the method of experiment and SWMM simulation, the improvement effect of new type seepage well and permeable grid measures on runoff regulation under six rainfall events with different return periods were investigated, and the infiltration law of the two measures under the rainfall of 100-year return period was explored. The runoff coefficient of the new measures was 9.94% - 51.09% lower than that of the permeable grid under different rainfall events, and the reduction rate of peak flow increased by 2.91% - 30.42%. The delayed effect of peak

lag time was insignificant, which was less than 3 minutes, and the migration rate of wet front increased by 73.47% under the rainfall of 100-year return period.

Key words: permeable grid; seepage well; SWMM model; runoff regulation; sponge city

随着我国城镇化进程的不断推进,城市硬化路面占比不断攀升,每逢暴雨来临,“城中看海”的场景屡见不鲜。另外,华北地区地下水资源连年超采,正成为世界上最大的地下“漏斗区”^[1]。作为华北地区重要的节点城市,石家庄近些年来资源性缺水严重,水资源承载能力不足,常常逢雨必涝、雨后即旱,如何平衡好雨水资源浪费和地下水蓄存成为亟待解决的问题。我国借鉴其他国家的雨洪管理经验,提出了海绵城市的发展理念。透水网格铺装作为透水铺装的子类,在海绵城市建设中备受重视。然而在现实生活中,透水网格铺装渗水效果千差万别,铺装结构的土基压实度较高,且多为黏土、粉黏土、灰土等渗透性不良的土质,这使得径流调控及入渗效益难以有效发挥^[2-3],与海绵城市“自然存积、自然渗透”的理念相背离。因此,采用内置碎石的渗井对透水网格进行改良,对进一步提升透水网格涵养水源、径流削减能力有着重要意义。

渗井作为一种具有削减径流、提高入渗等优点的LID措施,在华北地区等地下水稀缺区域适用性较高^[4]。目前针对渗井在海绵城市领域的研究有限,主要侧重于无填料盲管试验^[5]、建筑垃圾填料渗井试验^[6]及渗井结构有限元计算^[7-8],而内置碎石的渗井应用于透水网格铺装中的研究有待挖掘。

关于透水铺装试验,Brown等^[9]对某区域3种类型渗透路面下0.4 m处含水量进行监测,并评估其堵塞动态。张书函^[10]、侯立柱^[11]等对不同类型透水铺装进行降雨试验,对比其降雨入渗及产流特性。以上试验采用的TDR探头的测试精度、空间适应性尚有待提高,且其均未考虑雨洪模型与试验结果建立联系。相较试验而言,SWMM的应用可以更灵活地对透水铺装的降雨径流过程进行预测^[12-13],但目前多数研究仍缺乏试验实测数据对模型精度的验证^[14-15]。

为了更加合理地对LID措施水文特性进行分析,试验与SWMM模型联合的方法受到了研究者的广泛关注。孟莹莹等^[16]对植草沟进行径流试验并开展SWMM模拟,评估了设施长期径流削减效果。周倩倩等^[17]采用试验与模型结合的方法,研究了自

制滤柱对土壤蓄渗的改良效果。笔者以渗井-透水网格与透水网格为研究对象,依托室内试验与SWMM模型,对比分析了两者的径流调控效果及土体水分迁移规律,以期为该结构型式进一步推广应用提供理论依据,并为LID措施的应用提供参考。

1 室内试验

对透水网格、渗井-透水网格两种措施在两种降雨条件下开展4组试验,通过径流量、径流速率、含水率、湿润锋迁移速率等指标对两者径流、土体水分入渗规律进行研究。

1.1 试验装置及材料

试验所用模型箱的高度为40 cm、外径为25 cm、壁厚为5 mm。该箱上、下部开孔,以便收集径流与排水。人工降雨装置由气泵、集水桶、高压雾化喷头、塑料软管、LZB-4WB流量计、K24流量计构成。两种流量计分别用于控制人工降雨强度和监测径流速率。含水率探头的长度为2.5 cm,探针长度为1 cm,探头与三轴土样水分迁移测试系统联合监测土体含水率分布。渗井高度为30 cm、直径为8 cm、开孔率为3%,内部装满碎石。因透水网格砖主要依靠孔洞渗水,故采用模拟其形状尺寸的有机玻璃板代替砖体进行试验,试验装置如图1所示。



图1 试验装置

Fig. 1 Diagram of experimental device

试验分为A、B两组,分别指透水网格、渗井-透水网格的人工降雨试验。A组试验箱内结构层从上往下依次为:铺面层,为1 cm厚模拟砖体的有机玻璃板,铺设为单面坡,坡度为1.5%;找平层,由3 cm厚的砂组成,最大干密度为1.86 g/cm³;基层,由

10 cm 厚种植土 (15% 的碎石、20% 的砂、65% 的黏土) 组成; 土基, 由 22 cm 厚的黏土夯实, 干密度为 1.54 g/cm^3 , 压实度为 0.81, 初始含水率为 15%。基于以上布置, B 组试验在 A 组砖孔中布设碎石渗井, 碎石的堆积密度为 1.44 g/cm^3 , 针片状颗粒含量为 14.41%。A、B 组试验土体内均布置两层含水率探头, 环绕渗井呈等边三角形分布, 两层共 6 个, 下层编号为 1、2、3, 上层编号为 4、5、6。两层探头分别布置在距箱底 8 和 18 cm 处, 如图 2 所示。

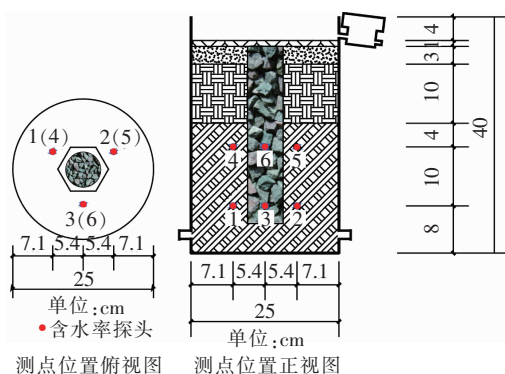


图2 探头测点位置

Fig. 2 Map of probe location

1.2 试验方案

试验分为 4 组, 分别为 Aa、Ab、Ba、Bb, a、b 分别代表 50 年和 100 年重现期下 120 min 的降雨情况, 降雨资料基于石家庄市地区于 2013 年修订的暴雨强度公式, 50 年和 100 年重现期下的降雨强度分别按式(1)和式(2)计算。

$$i = \frac{1800.427(1 + 0.812 \lg P)}{(t + 9.911)^{0.691}} \quad (1)$$

$$i' = \frac{1660.481(1 + 0.789 \lg P)}{(t + 9.39)^{0.671}} \quad (2)$$

式中: i 和 i' 分别为 50 年和 100 年重现期下的暴雨强度, $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$; P 为重现期, 年; t 为降雨历时, min。

采用芝加哥雨型对总雨量进行分配^[18], 雨峰系数为 0.3^[19], 具体降雨方案: 当重现期分别为 50 年和 100 年时, 降雨历时均为 120 min, 降雨量分别为 106.8、117.6 mm, 平均降雨强度分别为 53.4、58.8 mm/h, 最大降雨强度分别为 316.15、342.89 mm/h, 降雨峰现时间均为 36 min。

试验采用的含水率探头具有微型化、瞬态反馈、不破坏土样的优点^[20], 通过对探头施加电压与电流, 计算机显示相应测点的电阻率值, 进而根据标

定试验得到的土体电阻率与含水率之间的关系式推求测点含水率。这种含水率测量方法的原理在于土体在一定压实度下, 电阻率与含水率的关系具有唯一性^[21]。基于该特性, 对压实度为 0.81 测点位置的土体在不同含水率 (10%、20%、30%、40%) 条件下进行电阻率测量, 然后通过拟合数据点得到二者的关系式: $y = 0.477x^{-0.329}$, $R^2 = 0.973$ 。式中, y 为含水率, x 为电阻率。此外, 试验过程中, 每间隔 5 min 记录 1 次 6 个测点的土体电阻率及 4 组试验的径流量、排水量、径流速率随时间的变化情况。

1.3 结果分析

表 1 为 4 组试验的结果, 可知, 径流量大小依次为 $Ab > Aa > Bb > Ba$ 。在 a、b 两种降雨条件下, B 较 A 的径流量分别减少了 9.88% 和 14.89%。就 A 或 B 而言, 随着降雨重现期的增大, 径流量随之增大, 但 B 径流量的增长率为 9.59%, A 径流量增长率为 16.05%。由此可知, 渗井-透水网格在应对雨量增大时, 能把径流量更好地维持在原始水平。

表1 4组试验的结果

Tab. 1 Results of four group experiments

项目	径流开始时间/min	排水开始时间/min	径流峰现时间/min	径流洪峰流量/($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	总降雨量/L	排水量/L	径流量/L
Aa	7	41	41	0.001 9	5.24	0.98	2.43
Ab	3	—	41	0.002 4	5.77	0.66	2.82
Ba	4	35	42	0.001 6	5.24	0.65	2.19
Bb	3	68	42	0.001 9	5.77	1.24	2.40

图 3 为 4 组试验中径流量的变化曲线。从图 3 可知, 4 组试验在 36 min 前径流量相差不大, 36 min 后径流量增长基本呈先急后缓的趋势, 其增长速度快慢依次为 $Ab > Bb > Aa > Ba$, 这与径流洪峰流量的大小相符合。就上述两个降雨场次而言, 雨量越小, 两种 LID 措施径流量增长速度越慢。

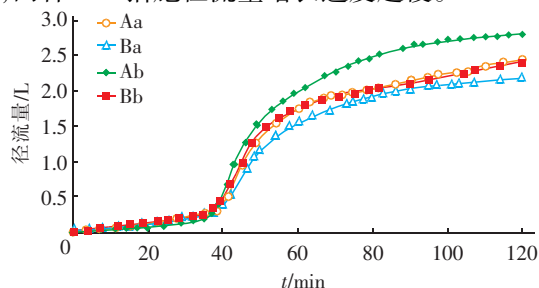


图3 4组试验中径流量的变化曲线

Fig. 3 Runoff curve in four groups of experiments

在100年重现期降雨条件下,A、B两组试验结构层含水率的变化见图4。由图4(a)可知,降雨35 min后,上层测点先被润湿,此后土体湿润锋面迅速下移,最终含水率稳定在33%左右。55 min后,下层测点含水率开始发生变化,80 min 探针附近含水率稳定在35%左右。上层测点含水率从开始变化到稳定状态历经了25 min,而下层需要35 min,且湿润锋面变化不再明显,原因在于基层较上部结构层压实度高、渗透率低,致使水流经基层时,竖向渗流速度变缓,做横向流动使该层饱和和后流向下部土层。

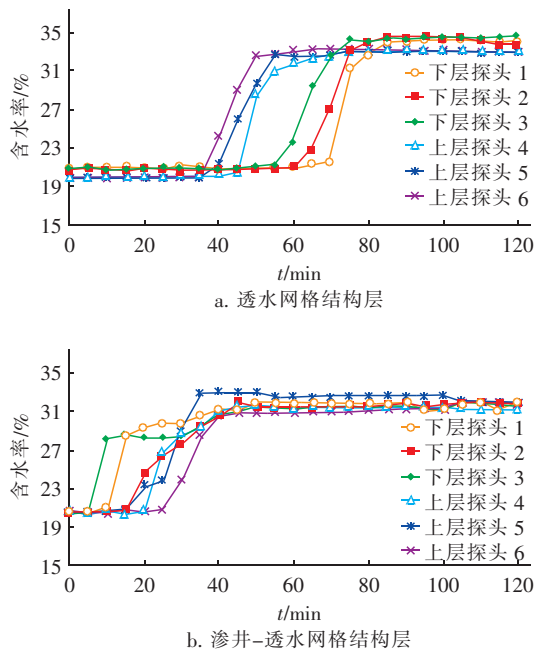


图4 两种LID措施结构层含水率变化曲线

Fig.4 Change curves of moisture content in two types of LID measures

由图4(b)可知,由于渗井的存在,在降雨峰值时间到来前,测点含水率基本趋于稳定,且下层土体要早于上层被润湿。这表明从降雨开始的一段时间内,少量雨水部分化为地表径流,部分直接渗入铺装结构层,大量雨水迅速通过渗井内碎石孔隙,并在10 min时到达底部。而后底部雨水积存,并通过渗井侧壁渗孔渗入下部测点土层,这也反映了碎石渗井具有较好的横向与竖向渗水效果。

因探头具有瞬态反馈的特点,湿润锋面到达上层测点位置的时间节点,即上层测点含水率初始变化时间。在此采用湿润锋迁移速率来表征土体水分迁移过程^[22]。湿润锋每前移10 cm除以所对应的时间间隔得到湿润锋迁移速率。在100年重现期降

雨条件下,透水网格与渗井-透水网格湿润锋迁移速率分别为0.49、0.85 cm/min,后者较前者的湿润锋迁移速率提高了73.47%。

2 SWMM 模拟

SWMM是一个动态的降水-径流模拟模型,主要用于对区域多种降水事件进行水量和水质的模拟。本研究主要利用模型中水文、LID模块对试验中的降雨径流过程开展模拟,将模型结果与试验实测值进行对比来验证模型的可靠性,进而预测其他降雨情况下LID措施的径流调控效果。

2.1 SWMM 模型构建

因渗渠的构造与渗井基本相同,均填充碎石骨料用于捕获雨水径流,且SWMM中LID措施的内涵是广义的,可通过改变参数来模拟任意多种的LID措施^[23],故采用渗渠对渗井进行概化,试验区域概化图如图5所示。

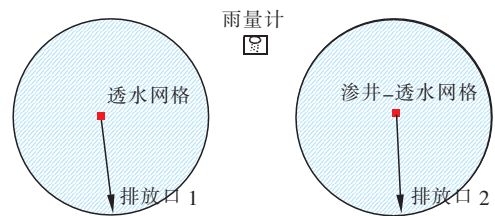


图5 试验区域概化图

Fig.5 General map of experiment areas

利用SWMM模型对A、B两组试验情况在2年、5年、10年、30年、50年、100年重现期,历时120 min的6种降雨情景下进行水文模拟。根据透水网格与渗井的实际尺寸,模型中两种LID面积占比分别为86.9%和5.7%。雨量计中时间序列采用芝加哥雨型对总雨量进行分配,雨峰系数为0.3,得出石家庄地区不同降雨重现期下的雨强分布,见图6。

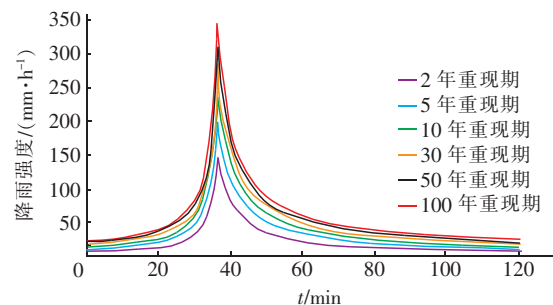


图6 不同重现期下的降雨强度曲线

Fig.6 Curves of rainfall intensity in different return periods

2.2 参数设置

结合试验实际情况,设置模型中一些确定性参数,如子汇水区面积、坡度、透水网格各结构层厚度和渗井高度等,其余参数在模型手册建议的取值范围内进行率定,最终使得模拟与实测结果呈现较高的吻合程度。透水网格及渗井参数分别如表2和表3所示。

表2 透水网格参数

Tab.2 Parameters of permeable grid

项 目		取值
表面层	护堤高度/mm	4
	表面粗糙度	0.013
	表面坡度	0.02
路面层	厚度/mm	40
	孔隙比	0.15
	渗透性/(mm·h ⁻¹)	100
土壤层	厚度/mm	100
	孔隙体积分数	0.398
	枯竭点	0.136
蓄水层	厚度/mm	220
	孔隙比	0.4
	渗水速率/(mm·h ⁻¹)	250

表3 渗井参数

Tab.3 Parameters of seepage well

项 目		取值
表面层	表面粗糙度	0.1
	表面坡度	1
蓄水层	厚度/mm	300
	孔隙比	0.5
	渗水速率/(mm·h ⁻¹)	400

2.3 模型精度验证

将实测值与模拟值进行对比分析,进一步优化参数取值,从而提高模型精度。选取 Aa、Ab、Ba、Bb 的试验结果与模型 50 年、100 年两种降雨情景下的模拟结果进行模型精度验证,实测和仿真径流数据如图7所示。

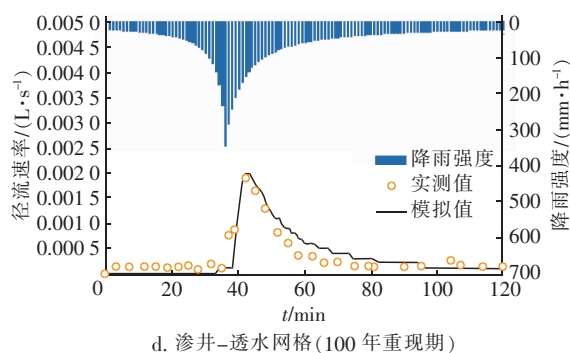
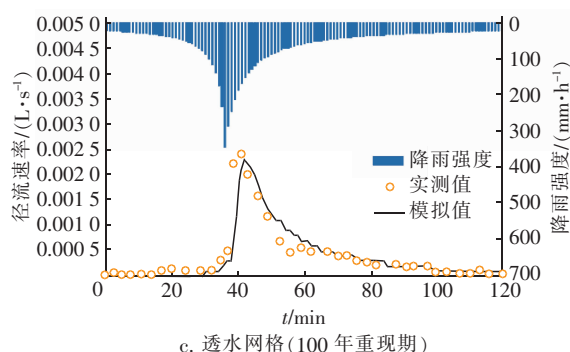
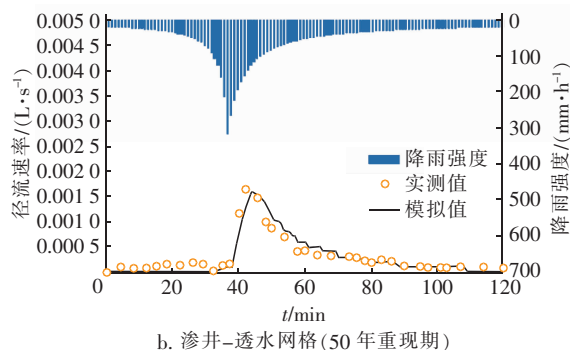
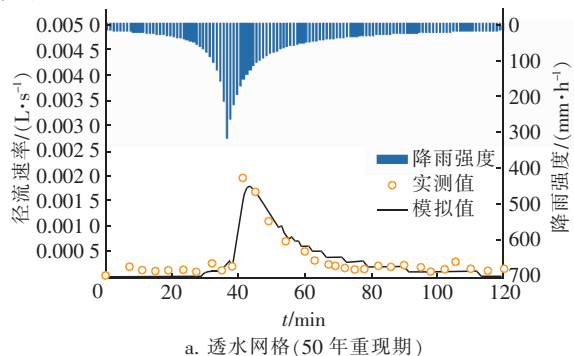


图7 实测与模拟径流过程线

Fig.7 Curves of measured and simulated runoff process

模型验证考察的目标主要有实测与模拟径流过程数据的拟合程度、洪峰流量、峰现时间。常晓栋等^[24]提出采用纳什效率系数 R_{NS} 、洪峰流量相对误差 RE_p 和峰现时间误差 AE_T 三个指标评价模型模拟精度。通过优化参数,使得4种情况下的 R_{NS} 均在0.8以上, RE_p 在10%以内, AE_T 在2 min以内,见表4。

表4 模型指标误差统计

Tab.4 Statistics of model indicators errors

项 目	Aa	Ba	Ab	Bb
R_{NS}	0.854	0.897	0.823	0.801
$RE_p/\%$	5.26	0	4.17	5.26
AE_T/h	-0.033	-0.033	-0.017	0

依据《水文情报预报规范》,降雨径流预报中 RE_p 许可值在 20% 以内, R_{NS} 值越接近 1, 表明模拟与实测过程拟合程度越好。由此可知, 构建模型精度较好, 可继续应用此模型来预测该区域在其他降雨情景下的径流变化趋势。

3 径流调控效果分析

目前, 已提出了诸多指标来评价 LID 措施的径流调控能力^[25-27], 主要体现在水量削减、径流峰值削减、洪峰时间延迟 3 个方面。本研究通过雨量径流系数、洪峰流量削减率、滞峰时间 3 个指标来评估透水网格与渗井-透水网格对雨水径流的调控效果。采用式(3)~(5)对 6 个降雨情景下两种 LID 措施的径流调控效果进行量化分析, 其中 50 年和 100 年重现期降雨情景下的结果以试验为准, 其余降雨情景下的结果以模型预测为准, 径流调控效果如图 8 所示。

$$\Psi = \frac{V_{\text{径流}}}{V_{\text{入}}} \quad (3)$$

式中: Ψ 为雨量径流系数; $V_{\text{入}}$ 为总入流量, L; $V_{\text{径流}}$ 为总径流量, L。

$$R_p = \frac{q_{\text{入}} - q_{\text{径流}}}{q_{\text{入}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: R_p 为洪峰流量削减率, %; $q_{\text{入}}$ 为入流峰值流量, L/s; $q_{\text{径流}}$ 为径流峰值流量, L/s。

$$T_d = T_{\text{径流}} - T_{\text{入}} \quad (5)$$

式中: T_d 为滞峰时间, min; $T_{\text{径流}}$ 为径流流量峰值出现时间, min; $T_{\text{入}}$ 为入流流量峰值出现时间, min。

由图 8(a) 可知, 透水网格的 Ψ 值为 0.092 ~ 0.489, 渗井-透水网格的 Ψ 值为 0.045 ~ 0.417。两种 LID 措施的 Ψ 值均与降雨重现期大小呈正相关, 在 2 年重现期降雨下, Ψ 值均最低, 即两种 LID 措施在应对 2 年重现期降雨时, 可把更多的雨水以土体水分蓄存的形式来替代地表径流。

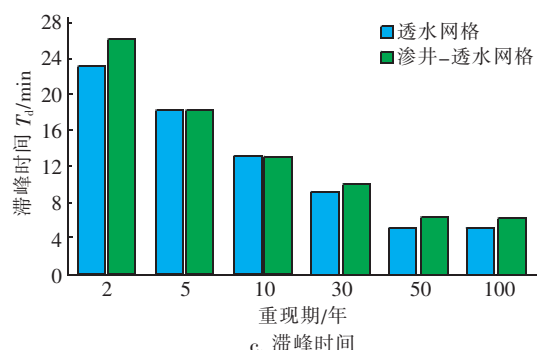
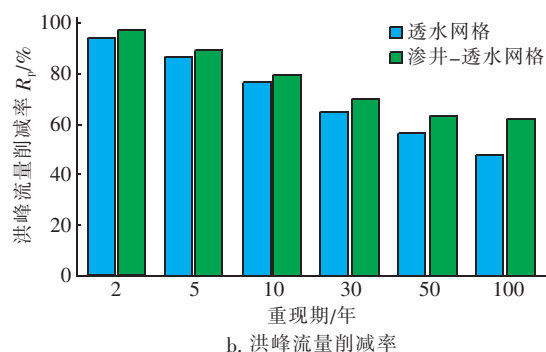
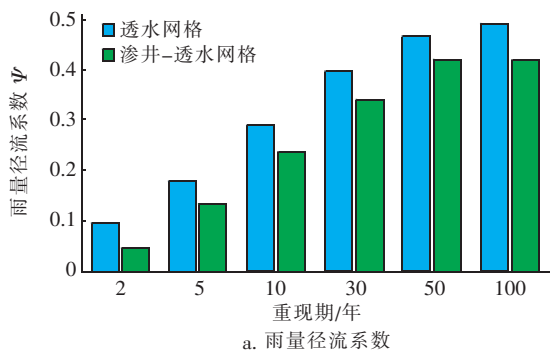


图 8 两种 LID 措施在不同重现期下的径流调控效果

Fig. 8 Runoff regulation effect of two LID measures in different return periods

由图 8(b) 可知, 透水网格和渗井-透水网格的 R_p 值分别为 46.94% ~ 94.06%、61.22% ~ 96.80%, 两种 LID 措施的 R_p 值均与降雨重现期大小呈负相关, 在 2 年重现期降雨下, R_p 值均最高, 可知两种 LID 措施均在 2 年重现期降雨时, 对降雨峰值流量的削减作用更为显著。

由图 8(c) 可知, 透水网格的 T_d 值为 5 ~ 23 min, 渗井-透水网格的 T_d 值为 6 ~ 26 min。整体来看, 两种 LID 措施的滞峰时间与重现期均呈负相关, 在 2 年重现期降雨下滞峰时间最长。原因在于不同降雨场次下, 雨量越大, 试验区域结构层土体达到饱和的时间越短, 地表径流峰现时间越早, 从而滞峰时间越短。

图 9 为渗井-透水网格较透水网格在不同重现期下 Ψ 、 R_p 、 T_d 的变化率。可知, 在单场次降雨下, 渗井-透水网格相较于透水网格, Ψ 值降低了 9.94% ~ 51.09%, 其在不同重现期降雨下的降低程度顺序为: 2 年 > 5 年 > 10 年 > 30 年 > 100 年 > 50 年。由此可见, 渗井-透水网格在 2 年重现期降雨下, 对 Ψ 值的降低效果最佳, 达到了 51.09%。单场降雨事件下, R_p 值提高了 2.91% ~ 30.42%, 且 R_p

值提升效果与重现期呈正相关,在100年重现期下, R_p 值的提升效果最显著,为30.42%。结合图8(c)可知,尽管在50年、100年重现期降雨下 T_d 变化率均达到了20%,但两种措施在同一降雨事件下 T_d 差别依然不大,在3 min以内。原因在于两种LID措施的研究范围相对于实际场地来说规模较小,坡面汇流路径及时间较短,以致渗井对透水网格 T_d 的延迟效果不明显。

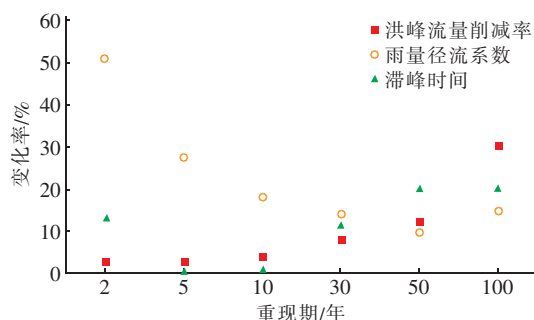


图9 渗井-透水网格较透水网格在不同重现期下 Ψ 、 R_p 、 T_d 的变化率

Fig. 9 Change rates of Ψ , R_p and T_d in seepage well-permeable grid compared with permeable grid at different return periods

由此可知,渗井-透水网格相比于透水网格在延缓 T_d 方面效果有限,在2年重现期降雨条件下 Ψ 值降低效果最佳,100年重现期降雨条件下 R_p 值提升效果最显著。

4 结论

① 在100年重现期降雨条件下,相较于透水网格,渗井-透水网格的湿润锋迁移速率提高了73.47%。表明渗井-透水网格具有较好的导渗效果。另外,模型验证表明,所构建模型在该试验研究区域内有着较好的适用性,可用于进一步预测其余场次降雨对该区域产生的水文效应。

② 在不同场次降雨下,渗井-透水网格相较于透水网格的雨量径流系数降低了9.94%~51.09%,在2年重现期降雨条件下降低效果最佳。洪峰流量削减率的提高效果与重现期呈现正相关关系,变化率为2.91%~30.42%。延迟滞峰时间效果不显著,在3 min以内。本试验中的两种LID措施在应对2年重现期降雨时均有着较优的径流调控作用,其雨量径流系数最低,洪峰流量削减率最高,滞峰时间最长。

参考文献:

- [1] 王熹,王湛,杨文涛,等. 中国水资源现状及其未来发展方向展望[J]. 环境工程,2014,32(7):1-5.
Wang Xi, Wang Zhan, Yang Wentao, et al. Shortage of water resources in China and countermeasures [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(7): 1-5 (in Chinese).
- [2] 董祥,沈正. 我国城市道路透水路面建设的工程选址与类型选择分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(3):145-150,160.
Dong Xiang, Shen Zheng. Analysis on choice of engineering site and type in Chinese urban pervious pavement construction [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(3): 145-150, 160 (in Chinese).
- [3] 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 & Technology, 2018, 41(12): 105-112, 130 (in Chinese).
- [4] 张云娟,陈旺,张蕊,等. 渗井在不同地区的适用性及利用现状[J]. 绿色科技,2018(22):147-148,154.
Zhang Yunjuan, Chen Wang, Zhang Rui, et al. Application status of seepage wells in different regions [J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(22): 147-148, 154 (in Chinese).
- [5] 王俊岭,张亚琦,秦全城,等. 基于弱渗水土质含渗透管的透水铺装水量控制[J]. 科学技术与工程,2018,18(12):286-291.
Wang Junling, Zhang Yaqi, Qin Quancheng, et al. Water control of permeable pavement based on impermeable soil with perforated pipe [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(12): 286-291 (in Chinese).
- [6] 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.
Zhu Xi, Li Shunqun, Feng Yanfang, et al. Study on application of rainwater seepage well in sponge city [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2017, 42(4): 1415-1421 (in Chinese).
- [7] 冯彦芳,李顺群,陈之祥,等. 基于土体各向异性的雨水入渗渗井试验研究与验证[J]. 长江科学院院报, 2019,36(3):110-115.
Feng Yanfang, Li Shunqun, Chen Zhixiang, et al.

- Experimental study and verification of rainwater infiltration well based on soil anisotropy[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(3):110-115(in Chinese).
- [8] 王云,吴万平,阮艳彬,等. 调蓄式渗井非饱和渗透排水影响因素分析[J]. 公路,2013(2):20-24.
Wang Yun, Wu Wanping, Ruan Yanbin, *et al.* Analysis on influencing factors of unsaturated drainage of regulation-storage style seepage well[J]. Highway, 2013(2):20-24(in Chinese).
- [9] Brown R A, Borst M. Assessment of clogging dynamics in permeable pavement systems with time domain reflectometers[J]. J Environ Eng, 2013, 139(10):1255-1265.
- [10] 张书函,陈建刚,赵飞,等. 基于入渗产流分析的透水砖地面铺装结构试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5):39-42.
Zhang Shuhan, Chen Jiangang, Zhao Fei, *et al.* Experimental study on pavement structure of pervious bricks based on infiltration and runoff generation analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5):39-42(in Chinese).
- [11] 侯立柱,冯绍元,韩志文,等. 透水砖铺装地面垫层结构对城市雨水入渗过程的影响[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(4):83-88.
Hou Lizhu, Feng Shaoyuan, Han Zhiwen, *et al.* Experimental study on impacts of infiltration treated with porous pavement[J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(4):83-88(in Chinese).
- [12] 朱浩然,于明明,吴华菓. 基于暴雨洪水管理模型的透水铺装结构对城市雨洪的影响模拟研究[J]. 公路, 2019(1):65-72.
Zhu Haoran, Yu Mingming, Wu Huaguo. Simulating and research on effect of permeable pavement structure on urban runoff based on SWMM[J]. Highway, 2019(1):65-72(in Chinese).
- [13] 赵沛,程伍群,庞立军,等. 基于SWMM的透水铺装系统的水文效应研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(1):29-31.
Zhao Pei, Cheng Wuqun, Pang Lijun, *et al.* Study on hydrological effect of permeable pavement system based on SWMM[J]. Water Resource and Power, 2019, 37(1):29-31(in Chinese).
- [14] 郑志宏,段晓涵,赵飞. 基于暴雨洪水管理模型的低影响开发设施应用研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(9):32-40.
- Zheng Zhihong, Duan Xiaohan, Zhao Fei. Storm water management model-based study on application of low impact development facilities[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(9):32-40(in Chinese).
- [15] 郑琳琳,白天,何瑞珍,等. 基于SWMM模型的漯河市雨水径流模拟分析[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(5):793-800.
Zheng Linlin, Bai Tian, He Ruizhen, *et al.* Analysis of urban simulative rainwater runoff in Luohe City based on SWMM model[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(5):793-800(in Chinese).
- [16] 孟莹莹,陈茂福,张书函. 植草沟滞蓄城市道路雨水的试验及模拟[J]. 水科学进展, 2018, 29(5):636-644.
Meng Yingying, Chen Maofu, Zhang Shuhan. Experiment and simulation of the vegetative swale to control road stormwater[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5):636-644(in Chinese).
- [17] 周倩倩,李阿婷,饶宇锐,等. 建筑废弃料对改良土壤蓄渗效果的试验及模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6):127-132.
Zhou Qianqian, Li Ating, Rao Yurui, *et al.* Experimental and simulated research on improvement of soil permeability using building waste materials[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(6):127-132(in Chinese).
- [18] 李俊,吴珊,赵昕,等. 雨型选择对LID措施效果影响的分析探讨[J]. 给水排水, 2018, 44(5):21-27.
Li Jun, Wu Shan, Zhao Xin, *et al.* Analysis on the effect of rain type selection on LID measures[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(5):21-27(in Chinese).
- [19] 倪丽丽,曾坚,张彦平. 基于精细模型的城市暴雨内涝规划应对——以石家庄局部城区为例[J]. 城市发展研究, 2015, 22(6):4-10.
Ni Lili, Zeng Jian, Zhang Yanping. Planning strategies on urban rainstorm water-logging based on fine model: A case study on the part of Shijiazhuang[J]. Urban Development Studies, 2015, 22(6):4-10(in Chinese).
- [20] 田力达,冯怀平,常建梅,等. 土工结构物中土体含水率实时测量系统及方法[P]. 中国专利: CN104897734A, 2015-09-09.
Tian Lida, Feng Huaiping, Chang Jianmei, *et al.* Real-time Measuring System and Method of Soil Moisture

- Content in Geotechnical Structures [P]. China: CN104897734A, 2015-09-09 (in Chinese).
- [21] 冯怀平, 马德良, 王志鹏, 等. 基于范德堡法的非饱和土电阻率测试方法[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4): 690-696.
- Feng Huaiping, Ma Deliang, Wang Zhipeng, *et al.* Measurement of resistivity of unsaturated soils using van der Pauw method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 690-696 (in Chinese).
- [22] 周杨, 刘果果, 白兰英, 等. 降雨诱发黄土边坡失稳室内试验研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2016, 49(6): 838-843.
- Zhou Yang, Liu Guoguo, Bai Lanying, *et al.* Model test study of loess slope instability induced by rainfall[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(6): 838-843 (in Chinese).
- [23] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 33-42.
- Mei Chao, Liu Jiahong, Wang Hao, *et al.* Introduction of basic principle and application prospect for SWMM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 33-42 (in Chinese).
- [24] 常晓栋, 徐宗学, 赵刚, 等. 基于 SWMM 模型的城市雨洪模拟与 LID 效果评价——以北京市清河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(11): 84-93.
- Chang Xiaodong, Xu Zongxue, Zhao Gang, *et al.* Urban rainfall-runoff simulations and assessment of low impact development facilities using SWMM model—A case study of Qinghe catchment in Beijing[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(11): 84-93 (in Chinese).
- [25] 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.
- Tang Shuangcheng, Luo Wan, Jia Zhonghua, *et al.* Effects of filler and rainfall characteristics on runoff reduction of rain garden and achieving the goal of sponge city construction[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1): 73-78, 102 (in Chinese).
- [26] 黄静岩, 李俊奇, 宫永伟, 等. 道路生物滞留带削减雨水径流的实测效果研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(11): 120-127.
- Huang Jingyan, Li Junqi, Gong Yongwei, *et al.* Research on stormwater runoff reduction by roadside bioretention facilities[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(11): 120-127 (in Chinese).
- [27] 高建平, 潘俊奎, 谢义昌. 生物滞留带结构层参数对道路径流滞蓄效应影响[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 702-711.
- Gao Jianping, Pan Junkui, Xie Yichang. Effects of bioretention structural layer parameters on detention and retention for road runoff[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 702-711 (in Chinese).



作者简介: 梁萌(1995-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。

E-mail: liangmeng937@126.com

收稿日期: 2019-07-06