DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.06.19

建筑废弃料对改良土壤蓄渗效果的试验及模拟研究

周倩倩[1], 李阿婷[1], 饶宇锐[1], 任 毅[2], 王和平[1]

(1.广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2.中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

摘　要: 为了解决我国华南地区土壤质地黏重、渗透性能极差,无法及时排干随着不透水路面剧增而增长的城市径流雨水的问题,依据生物滞留池典型构造原理制备实验室自制滤柱装置,通过测试不同重现期下滤柱装置的下渗曲线,以评估不同粒径级配的建筑废弃料对土壤蓄渗的改良效果。结果表明:中小雨强下符合华南地区土壤特征和降雨条件的最优建筑废弃料粒径级配为5~9mm,且随着降雨重现期的增加,蓄渗改良效果更为明显,产渗流时间也显著提前;在SWMM中构建LID生物滞留池模块,根据试验结果进行模型率定,可为生物滞留池提供合理设定参数。研究成果拓展了建筑废弃料在低影响开发措施中的应用,以期为华南地区大规模海绵城市低影响开发措施的土壤蓄渗改造提供科学参考和评估工具。

关键词: 土壤蓄渗改良; 建筑废弃料; 生物滞留池; 径流调控; 低影响开发

中图分类号:TV125; TU992　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672-643X(2018)06-0127-06

Experimental and simulated research on improvement of soil permeability using building waste materials

ZHOU Qianqian[1], LI Ating[1], RAO Yurui[1], REN Yi[2], WANG Heping[1]

(1. *School of Civil and Transportation Engineering*, *Guangdong University of Technology*, *Guangzhou* 510006, *China*;
(2. *China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co. Ltd*, *Guangzhou* 510610, *China*)

Abstract: In view of the poor textures and permeability of soils in South China, it is impossible to promptly drain the urban runoff rainwater that has grown with impervious pavement growth. A laboratory self-made filter column device was prepared based on a bioretention tank, the infiltration curve of the filter column device under different return periods was tested to evaluate the improvement effect of building waste materials with different particle size gradations on soil infiltration. The experimental results showed that the optimal particle sizes of building waste materials for the soil characteristics and rainfall conditions in south China is 5-9 mm, with the increase in the return period of rainfall, the effect of infiltration improvement is more obvious and the time for seepage is also significantly earlier. The LID bioretention tank module was constructed in SWMM and the model was calibrated based on the test results, the simulation provided reasonable parameters for the bio-retention tank. The research results have expanded the application of building waste materials in low-impact development measures and provided scientific reference and assessment tools for the large-scale sponge-city low-impact development measures for soil infiltration.

Key words: soil permeability improvement; building waste materials; bioretention tank; runoff regulation; low impact development(LID)

收稿日期:2018-05-24;　**修回日期**:2018-06-27

基金项目:广州市科技计划项目(201804010406); 国家自然科学基金青年项目(51809049); 广东省公益研究与能力建设基金项目(2017A020219003); 广东省水利科技创新项目(2017-10)

作者简介:周倩倩(1984-),女,浙江乐清人,博士,讲师,主要从事市政排水研究。

通讯作者:李阿婷(1994-),女,湖南娄底人,硕士研究生,研究方向为海绵城市。

1 研究背景

近年来，受极端水文气候的影响，我国多个地区频繁遭遇强降雨袭击[1]。为了降低城市洪涝灾害发生频率，恢复城市化开发前的水文环境，我国“十三五”规划纲要提出要建设自然积存、自然渗透、自然净化的“海绵城市”，低影响开发(LID)措施如雨水花园、生物滞留池、下凹式绿地等在城市建设中倍受重视[2-4]。近年来，生物滞留池在有效控制雨水径流水量和有效改善雨水径流水质等方面取得了显著效果，生物滞留池已快速成为国内外最高效的 LID 工程措施之一[5-6]。研究证明，生物滞留池能有助于减少雨水径流量、削减径流的峰值流量和低渗透集水区的洪水量[7-9]；同时还可以去除一定量的固体悬浮物、TN 和重金属镉(Cd)、铜(Cu)、铅(Pb)和锌(Zn)等污染物，其中尤以包含粉煤灰和砂混合物的人造填料效果最佳[10-13]。另针对建筑垃圾在土壤蓄渗改良中的研究表明，建筑垃圾可用作雨水储备层，但需合理确定其粒径级配、填充次序和填充厚度[14]。固结砂浆和加气混凝土砖块两种建筑废弃料可有效提高土壤渗透能力，对 pH 的缓冲容量也有相应提高[15-16]。

由上述学者对建筑垃圾在土壤蓄渗改良的研究可知，土壤入渗性能的改良是一个较为复杂的过程，需系统性地测试填充材料和方式对土壤理化性状的影响机理。目前针对建筑材料在土壤渗蓄改良的研究仍十分有限，难以形成系统性的对比分析和理论方法。因此建立可靠的建筑材料－土壤蓄渗能力的改良模型，对建筑废弃料在城市土壤蓄渗改良中的工程设计和应用具有一定的指导作用。通过对建筑垃圾在生物滞留池中的合理利用，使生物滞留池对雨水呈现出海绵特性，既可满足在快速发展的城市中达到吸纳和调控雨水径流的目的，又可有效削减初期雨水的径流污染，且经济上合理，环保效果突出，还可增加城市的美观性，具有广阔的应用前景。

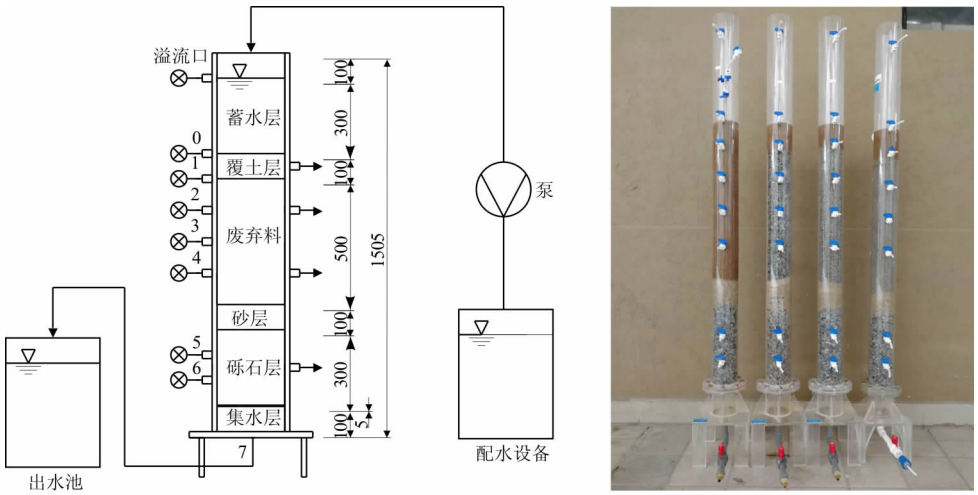
鉴于此，本项目通过将生物滞留池典型构造中原有的换土层改造成为旧建筑拆除过程中产生的建筑废弃料层，科学合理地将建筑垃圾应用到改善土壤渗蓄的研究中来，利用自制滤柱装置，以不同粒径建筑废弃料作为研究对象，优化土壤的蓄渗条件。

根据试验结果，基于 SWMM 中已开发的 LID 模型——生物滞留池，定量化模拟滤柱装置的水文过程，经参数率定后的模型结果为生物滞留池提供了合理参数设定，也为华南地区大规模推广海绵城市低影响开发措施中的土壤蓄渗改造提供了科学参考。

2 试验条件

2.1 装置与材料

试验主要装置为 4 根各层填充高度根据《海绵城市建设技术指南》复杂型生物滞留设施典型构造设计而成的自制滤柱，如图 1(a)所示。整个滤柱高为 1 505 mm(不包含底座高度)，内径为 90 mm，内含蓄水层、覆土层、废弃料层、砂层、砾石层和集水层；4 根滤柱实物图如图 1(b)所示，填充层部分从左至右分别为纯土层和 0.5～2 mm、2～5 mm、5～9 mm 建筑废料层。



(a) 自制滤柱示意图 (b) 自制滤柱实物图

图 1 自制滤柱示意图和自制滤柱实物图

试验初始土壤采自广东省广州市番禺区瀛洲生态公园,土壤成分经测定黏粒含量为 38.41%,粉粒含量为 39.74%,砂粒含量为 21.85%,属于华南地区典型的黏壤土。采回土壤经初步敲碎,置于烘箱烘干,过 5 mm 筛处理,与海砂粒按 1∶1 混合制备试样。试验所用建筑废弃料为广东工业大学流体力学试验室旁某建筑现场收集的落地灰数桶,经过相应目数筛网筛分而成。

2.2　模拟方法与试验结果

模拟降雨前初步调试 4 个滤柱,使其在同样的水分含量和空气湿度中放置 0.5 h,试验根据广州市水务局印发文件《广州市中心城区暴雨公式及计算图表 2012 年》中的单一重现期暴雨强度公式,采用了均一降雨强度,设置多组设计暴雨重现期 1a(雨强 55 mm/h)、5 a(雨强 76 mm/h),根据式(1)得出重现期为 1 a 时恒定进水负荷为 0.097 mL/s,重现期为 5 a 时恒定进水负荷为 0.13 mL/s。通过测量降雨经过不同滤柱滞留作用后下渗的雨水量,确定不同设计暴雨重现期与滤柱填充方式对土壤渗透性的改善效果以及对渗流总量的控制效果。

进水负荷 = 恒定进水雨强 × 滤柱面积　　(1)

试验结果通过滤柱下渗速率随不同降雨重现期、不同建筑废弃料粒径级配随时间的变化得以体现,据其变化曲线(如图 2)可知:(1)建筑废弃料的使用能有效增强土壤蓄渗效果,这是由于华南地区红壤土本身土质黏重,渗透性极低,适当施加土壤蓄渗改良材料十分必要。(2)各个重现期下粒径级配为 5 ~ 9 mm 的建筑废弃料在华南地区土壤蓄渗效果改善方面表现出最佳的效果,这是由于随着建筑废弃料粒径级配的增加,除了粒径与粒径之间缝隙增大外,该级配本身孔隙率较大颗粒含量也增多。而在 0.5 ~ 5 mm 的粒径范围之内,下渗速率随粒径级配的递增而增大的趋势还不是十分显著,容易受其他因素的影响,如进水扰动引起的覆土层特征(厚度等)改变、各滤柱材料层无法保证填充高度完全均一等等。但若考虑到水质情况,介于污染物削减需要合理停留时间,故粒径级配可能需要进一步优化调整。

随着降雨重现期的增加,各粒径建筑废弃料的峰值下渗速率(即下渗速率变化曲线峰值)逐渐增加(如图 3)的同时,产渗流时间和峰值下渗速率出现时间也随之提前,这是因为随着降雨强度的增加,单位时间内渗入同一滤柱区域单位面积的雨量也随之增加。而各滤柱径流总量的削减率通过以公式(2)求的,结果如图 4 所示。由图 4 可得,随着重现期的增加,各滤柱对径流总量的削减率也随之增加,且建筑废弃料的粒径级配越大,其渗水性能增强的同时,保水性能相应减弱。

径流削减率 = (雨量 − 渗流量)/雨量 × 100%　　(2)

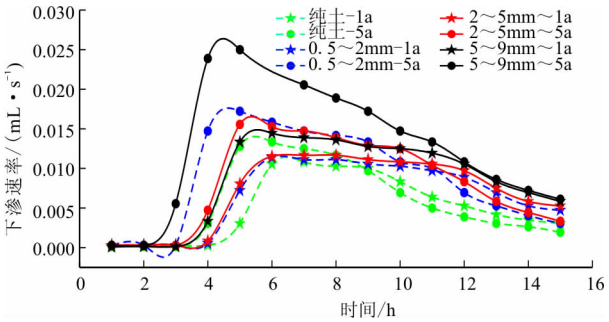


图 2　下渗速率变化曲线

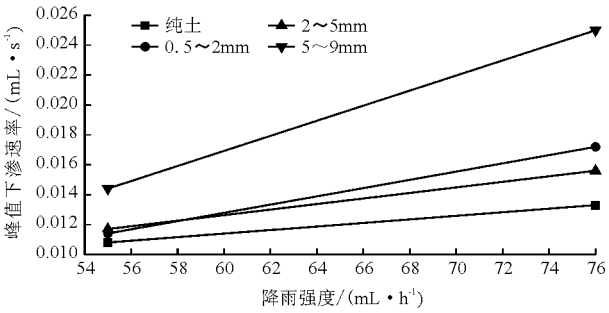


图 3　峰值下渗率随降雨强度的变化

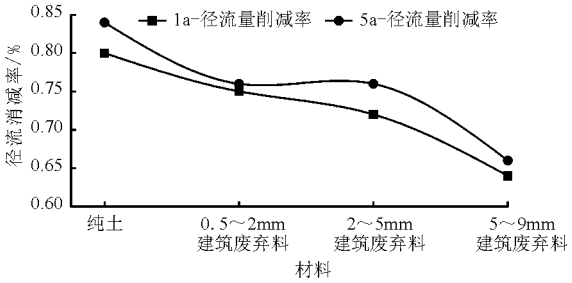


图 4　各滤柱径流量削减率曲线

3　SWMM 模拟

3.1　SWMM 模拟与 LID 模块

SWMM(storm water management model,暴雨洪水管理模型)是一个动态的降水 − 径流模拟模型,主要被用于模型适应性的检验及模型参数的识别、城市暴雨洪水地表径流及其污染过程的模拟、城市低影响开发效果的模拟、与其他模型软件的耦合应用模拟等方面。SWMM 最新版本包含水文、水力、

水质模块,水文模块增设 LID 控制区,用于研究不同 LID 措施诸如生物滞留池、渗透铺装、雨桶等对雨水径流和水质的控制效果,通过与 SWMM 水力模块的结合,有效评估 LID 水文效应[2,17]。

LID 控制通过多个填充竖向层的组合表示,其水流路径如图 5(a)所示。根据试验实际情况,选定 LID 模块为生物滞留池,生物滞留池分为表面层(surface)、土壤层(soil)、蓄水层(storage)和排水层(drain)4 大板块,如图 5(b)所示。表面层实为种植层,可通过种植各类植物以截留进入生物滞留池的雨水;表面层设置蓄水厚度、植物覆盖小数、表面覆盖度、表面坡度 4 个参数模拟表面积水、植物覆盖比例等情况;入渗后的雨水流经土壤层,该层设置土壤厚度、孔隙率、产水能力、倾斜点、导水率、导水率坡度、吸水头 7 个参数模拟土壤层土壤厚度、孔隙率、相对于土壤允许完全排干之后总容积的孔隙水容积等情况;经土壤层雨水继续往下渗即是蓄水层,蓄水层设置蓄水层高度、孔隙比、过滤速度、堵塞因子等参数用于描述该层高度、相对于层中固体容积的空隙容积、可以流过层底水的最大速率等情况;蓄水层下渗后的雨水通过排水层向外排出,排水层相当于暗渠系统,从底部收集蓄水并输送至常规雨水管渠,该层包含排水指数、暗渠偏移高度等数据输入域。4 个板块各个参数详细取值依据和取值范围见表 1。

表 1 LID 参数设置表

板块	参数	取值依据	取值
表面层	蓄水深度/mm	根据广州市降雨重现期数据	55、76
	植被覆盖小数	试验所用土壤为裸土	0
	表面粗糙度	根据手册,除多孔路面和草洼其他类型取 0	0
	表面坡度	根据手册,除多孔路面和草洼其他类型取 0	0
土壤层	厚度/mm	试验土壤厚度为 100mm	100
	孔隙率	根据试验结果率定	0.7
	产水能力	根据试验结果率定	0.2
	枯竭点	根据试验结果率定	0.1
	导水率/(mm·h^{-1})	根据试验结果率定	18
	导水率坡度	根据手册粉质黏土典型取值	15
	吸水头/mm	根据试验结果率定	90
蓄水层	厚度/mm	试验所用建筑废弃料厚度为 500mm	500
	孔隙比	基于本试验所用建筑废弃料,经过率定	0.43
	过滤速度/(mm·h^{-1})	基于本试验所用建筑废弃料,经过率定	500
	堵塞因子	根据手册,忽略阻塞时使用数值 0	0
排水层	排水系数	根据手册,层中无暗渠,使用数值 0	0
	暗渠偏移高度/ mm	根据手册,层中无暗渠,使用数值 0	0
	排水滞后/mm	根据手册,除雨桶外其他类型忽略此参数	0

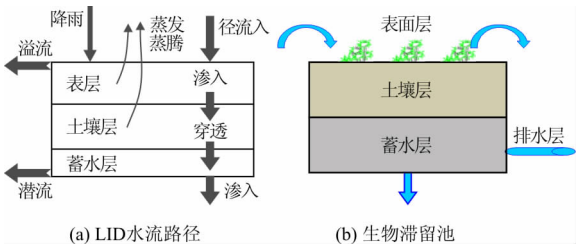


图 5 LID 水流路径和生物滞留池示意图

3.2 参数设置

根据试验条件,在 SWMM 中建立一个与自制滤柱面积相一致的子汇水区域模型,布置管渠汇集子汇水区出水,构建 LID 生物滞留池模块对自制滤柱出流过程进行模拟。相关参数设置如下。

3.2.1 基础参数设置 参考 SWMM 模型手册和试验实际情况,子汇水区参数及管段参数设置如表 2 所示。模拟选用的下渗模型为霍顿下渗。雨量与试验条件保持一致,故选用均一雨强降雨,根据试验条件,选取 0.5 h 后开始降雨,2.5 h 后降雨结束。雨量计雨强设置 55 mm/h 为 1 a 重现期,76 mm/h 为 5 a 重现期,雨量计记录时间间隔取 0.01 h。表 2 中

未提及的参数均采用 SWMM 软件默认值,无需设置与率定。

3.2.2　LID 参数设置　子汇水区域属性中设置 LID 模块 1 个,即生物滞留池单元,其面积与子汇水区域面积相一致。LID 控制编辑器定义可以在整个研究面积使用的低影响开发控制区域,用于表达子汇水面积径流的储存、下渗和蒸发。控制编辑器是对单位面积进行设计,以便在不同尺寸的研究区放置任意数量子汇水区域,或者对研究区进行任意数量的重复。

生物滞留池各参数名称、选值依据和选值大小如表 1 所示。

4　结果与分析

根据试验,建立与自制滤柱面积相一致的子汇水区域模型,布置管渠汇集子汇水区出水,选取径流减排效果明显优于 0.5 ~2 mm 和 2 ~5 mm 两种粒径建筑废弃材料的 5 ~9 mm 建筑废弃料材料作为参数调试模拟对象,通过参数率定过程,使得 SWMM 模拟运行结果与试验所得下渗速率变化曲线大致相符。其参数选择结果见上文 3.2 节所示。

模拟结果见图 6。由图 6 可知,在重现期为 1 a 的情况下,自制滤柱出流的试验值与 SWMM 模拟值整体拟合程度极高,下渗出流开始时间均为 2 h 左右,峰值下渗速率出现时间、峰值下渗速率数值量等参数亦接近一致。

而在重现期为 5 a 的情况下,虽然模拟值的产渗流和峰值下渗速率出现时间滞后于实测值 1 h,但模拟值与实测值的峰值下渗速率数值量和下渗曲线形状基本一致,参数率定后的结果对不同雨强下模型与实测的拟合程度会存在允许范围内的差异,这并不影响整个模型的外延。

表 2　基础参数设置表

参数名称	取值依据	取　值
子汇水区面积/m^2	试验滤柱面积	6.359×10^{-3}
子汇水区宽度/m	根据试验结果率定	3×10^{-8}
不渗透百分比/ %	根据试验结果率定	3
无洼地蓄水/ %	试验无洼地不渗透面积	0
最大下渗速率/($mm\cdot h^{-1}$)	根据手册黏土典型选值	25.4
最小下渗速率/($mm\cdot h^{-1}$)	根据手册黏土典型选值	0.254
管段断面最大深度/m	根据试验结果率定	0.01
管渠长度/m	根据试验结果率定	120
曼宁粗糙系数	根据手册封闭塑料管段典型取值	0.015

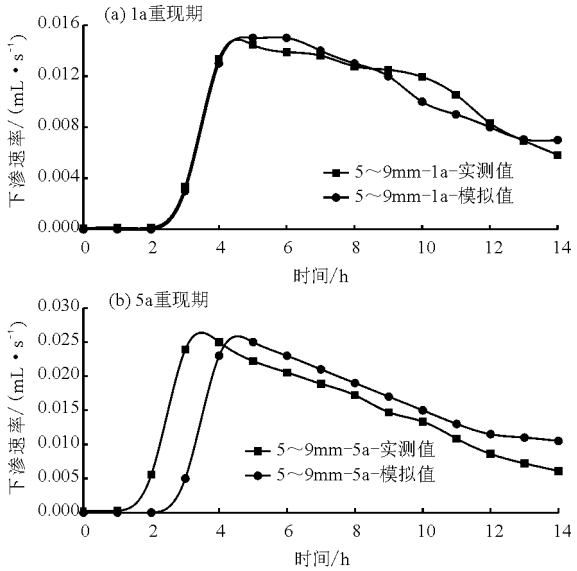


图 6　1a 重现期和 5a 重现期模拟值与实测值对比

5　结　论

(1)提出将建筑废弃料运用于土壤渗透性改善的新思路,初步实现建筑废弃料的资源化管理,在一定程度上可解决大量建筑垃圾增长带来的一系列环境问题。作为一种新型填充材料,建筑废弃料对土壤的改性应用在缓减排水压力、径流总量控制等方面具有广泛的应用前景。

(2)通过试验研究发现,相同重现期下,尤以 5 ~9 mm 的建筑废弃料对径流雨水总量削减作用效果最佳,即其更能针对性解决华南地区典型黏重红壤土土壤板结、渗透性极低等问题,但若考虑到水质方面,则需对粒径级配进行进一步优化调整;随着降雨重现期的增加,各粒径建筑废弃料作用下的总径流下渗速率逐渐增加,产渗流时间和峰值下渗速率

出现时间也随之提前。

(3)要使基于 LID 理念构建的研究区域 SWMM 模型能够更加精准和可靠地评估不同试验条件下的水文过程,必须利用试验所得数据对其进行参数率定,准确的模拟过程方可为新型填充材料在不同空间尺度、下垫面条件和雨洪情景下的推广提供科学支持。

(4)本文仅着重研究了建筑废弃料对径流总量削减的影响效果,近期将开展生物滞留池的新型填充材料对区域雨水水质和水量双重处理作用的探讨,进一步实现城市水资源的综合利用,为海绵城市可持续发展做出贡献。

参考文献:

[1] 范嘉炜,袁明道,马妍博,等. 二次重现期在暴雨洪涝灾害中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):149 - 154.

[2] 黄国如,麦叶鹏,李碧琦,等. 基于 PCSWMM 模型的广州典型社区海绵化改造水文效应研究[J]. 南方建筑,2017(3):38 - 45.

[3] 黄国如,黄 维,张灵敏,等. 基于 GIS 和 SWMM 模型的城市暴雨积水模拟[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):1 - 6.

[4] 黄国如,吴思远. 基于 Infoworks CS 的雨水利用措施对城市雨洪影响的模拟研究[J]. 水电能源科学,2013,31(5):1 - 4 + 17.

[5] 胡爱兵,张书函,陈建刚. 生物滞留池改善城市雨水径流水质的研究进展[J]. 环境污染与防治,2011,33(1):74 - 77 + 82.

[6] 马效芳,陶 权,姚 景 ,等. 生物滞留池用于城市雨水径流控制研究现状和展望[J]. 环境工程,2015,33(6):6 - 9 + 29.

[7] SILESHI R, PITT R, CLARK S. Impacts of soil texture, structure, and compaction on bioinfiltration device performance: results of lab and field investigations[C]// Low Impact Development Conference, 2015:4 - 15.

[8] 薛天一,徐乐中,李翠梅,等. 生物滞留池水文水质效应模拟分析[J]. 水利水电技术,2018,49(1):121 - 127.

[9] 颜 乐,夏自强,丁 琳,等. 基于 SWMM 模型的生物滞留池水文效应研究[J]. 中国农村水利水电,2014(4):25 - 28.

[10] YING Mei, LONG Gao, HANG Zhou, et al. Ranking media for multi-pollutant removal efficiency in bioretention[J]. Water Science & Technology, 2018, 77(7 - 8):2023 - 2035.

[11] LI Jiake, ZHAO Ruisong, LI Yajiao, et al. Modeling the effects of parameter optimization on three bioretention tanks using the HYDRUS - 1D model[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 217:38 - 46.

[12] AL - AMERI M, HATT B, COUSTUMER S L, et al. Accumulation of heavy metals in stormwater bioretention media: a field study of temporal and spatial variation [J/OL]. Journal of Hydrology, 2018, 3(12): https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.

[13] 唐宁远,李 田. Nitrogen removal by three types of bioretention columns under wetting and drying regimes [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(2): 324 - 332.

[14] 张志民. 京津晋冀缺水地区城市建筑垃圾及雨水利用新途径[J]. 中国水土保持,2004(5):31 - 32.

[15] 吴雨桐,张开明,孔成轩,等. 建筑废弃料对城市绿地土壤渗透性的改良[J]. 顺德职业技术学院学报,2016,14(4):1 - 4.

[16] 陈朝彬. 建筑废弃物改善土壤渗透性试验研究[J]. 山东工业技术,2017(10):127 - 128.

[17] 朱培元,傅 春,肖存艳. 基于 SWMM 的住宅区多 LID 措施雨水系统径流控制[J]. 水电能源科学,2018,36(3):10 - 13.