

生物滞留池的产流规律模拟研究

殷瑞雪¹, 孟莹莹^{1,2}, 张书函¹, 陈建刚¹

(1.北京市水科学技术研究院,北京 100044; 2.北京师范大学水科学研究院,北京 100875)

摘要:根据生物滞留池降雨径流观测试验数据,应用 HYDRUS-1D 对生物滞留池在 24h 不同降雨频率和不同填料层的产流规律进行模拟分析。结果表明,率定和验证后的 HYDRUS-1D 可用于模拟生物滞留池的产流过程;在 1 年一遇($P=100\%$)到百年一遇($P=1\%$)的不同频率下,传统填料的生物滞留池通过下渗的排水量占入流总量的百分比从 90.7% 下降到 25.8%,而添加大粒径颗粒填料从 88.9% 下降到 64.7%,说明添加大粒径填料能够显著增加下渗量,并减少溢流和积水时间,但是从延缓产流时间和洪峰削减效果(不发生溢流)方面,传统填料要优于添加大粒径颗粒的填料。

关键词:生物滞留;HYDRUS-1D;降雨产流

中图分类号:P349

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)02-0028-05

1 引言

城市化进程的不断推进引发了区域不透水面积增加、地面径流增加、洪峰流量增大等一系列水文效应。自 20 世纪 90 年代中期以来,低影响开发(LID)作为针对源头的径流削减措施开始在世界各地逐渐发展起来,其中生物滞留池作为低影响开发(LID)体系中的一项重要技术^[1],在径流量削减、径流污染控制、地下水回补及景观方面具有显著的生态效应,成为最具成本效益的雨水径流管理方法^[2]。

生物滞留技术最初于 20 世纪 90 年代在美国马里兰州 Prince George 县展开实施,其后各国学者开展了大量的物理、化学和生物试验,研究了生物滞留技术的水文效应及水质改善效果,如径流和洪峰的削减效果^[3-4],对氮、磷、SS 和重金属的去除效果等^[5-8],但容易受长时间性能监测数据的制约^[9]。同时,研究者开发了诸多模型软件(如 RECARGA^[10]和 MUSIC^[11]等),可应用于模拟和预测生物滞留池对雨水特性(水质或水量)的影响。该类模型多适合于系统设计和长时间系列模拟,并简化了土壤入渗过程。然而,研究生物滞留池的降雨径流关系需要精确考虑填料层的土壤入渗过程。HYDRUS-1D^[12]是基于土壤水动力学原理的一维入渗

模型,可模拟多孔介质中变饱和情况下(饱和-非饱和)的水分、溶质和热运移过程。因此,利用 HYDRUS-1D 模拟生物滞留池的水分下渗过程是研究其产流规律的有效途径。

本研究结合生物滞留池降雨径流观测试验和一维入渗模型 HYDRUS-1D,根据实验数据对模型的水力特征参数进行率定和验证,并基于已验证参数模拟计算不同填料层的生物滞留池在不同降雨频率下的产流过程,分析生物滞留池的产流规律,进而为生物滞留池的建设和推广提供参考。

2 降雨径流观测试验

2.1 试验装置

设计 2 个倒四棱形的土槽作为生物滞留池(以下简称 1#、2#),其上底面为 3m×2m,下底面为 2.2m×1.2m,深 1.1m,均由蓄水层、溢流管、植物、松树皮覆盖层、填料层、碎石层及防渗层组成。土槽内均种植麦冬,种植密度约 90 株/m²,成熟后株高约 30cm,根深约 20~40cm,排水层中埋设一根穿孔管监测出水流速,溢流管也与穿孔管相连。2 个土槽填料构成不同(表 1),1# 为传统填料,2# 为添加了大粒径颗粒的填料,其余均相同,土槽装置如图 1 所示,试验实景如图 2 所示。

收稿日期:2014-06-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51179009)

作者简介:殷瑞雪(1988-),女,山西汾阳人,助理工程师,硕士,主要从事雨洪利用方面的研究。E-mail:yrxdemao@sina.com

表1 土槽填料层设置

Table1 The filter media of bioretention

土槽编号	1#	2#
填料层	砂土比为 2:1,均匀添加草炭 3%	高炉矿渣、砂、土比为 82:42:1,均匀添加草炭 3%(25cm) 蛭石(35cm)

注:砂土中<0.16mm、0.16~0.315mm、0.315~1.25mm、1.25~2.5mm、2.5~5mm粒径的颗粒含量分别为10%、10%、30%、40%、10%;高炉矿渣粒径为5mm;蛭石粒径为0.5~5mm。

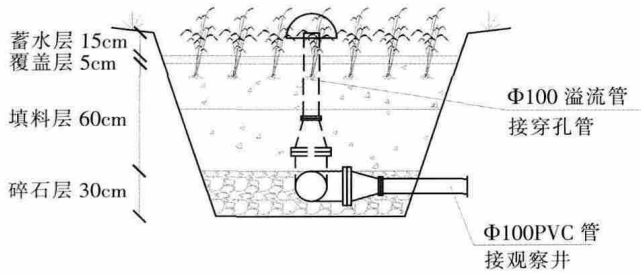


图1 土槽装置示意图

Fig.1 The typical structure of bioretention



(a)土槽

(b)监测井

图2 试验实景照片

Fig.2 The pictures of the experiment

2.2 试验方法

(1)填料层特性。分别采用定水头渗透仪法和HITACH高速离心机测定土槽填料的饱和导水率和水分特征曲线;在降雨径流观测试验开始前测定土壤的初始含水率。

(2)降雨径流观测试验。分别对2个土槽在1h内均匀注入面积负荷比为10时0.25年一遇和0.5年一遇(考虑到年内小频率降雨频繁,同时受到实验条件的制约,因此选取0.25年和0.5年重现期进行实验)降雨频率下产生的径流量,采用暴雨强度公式(式1)和推理公式(式2)推求径流量。待土槽开始排水后每5~20min测定一次排水流速,直到排水基本结束,土槽在进水的同时,观测其出流、积水和溢流过程,当土槽有积水或溢流出现时,记录积水时长和溢流次数。

$$q = \frac{0.0002(1+0.8111gP)}{(t+8)^{0.711}} \quad (1)$$

式中: q 为设计暴雨强度[L/(s·hm²)]; t 为降雨历时(min); P 为设计重现期(a)。

$$Q_s = q\varphi F \quad (2)$$

式中: Q_s 为设计径流量(m³/s); q 为设计暴雨强度[L/(s·hm²)]; φ 为径流系数,取0.9; F 为汇水面积(m²)。

3 HYDRUS-1D 模型率定与验证

3.1 模型原理

HYDRUS-1D是由国际地下水模型中心(IGWMC)发布的用于模拟多孔介质中变饱和情况下(饱和-非饱和)水分运动、溶质运移、热量迁移以及作物生长的模型,可设置多种源汇项的影响参数和边界条件。其中水分模块采用Richards方程对土壤水流运动进行模拟计算,将Darcy方程和连续方程(质量守恒定律)联立可推出Richards方程,如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - s(h) \quad (3)$$

式中: θ 为土壤体积含水率,L³·L⁻³; t 为时间,T; c 为容水度,L⁻¹; h 为土壤压力水头,L⁻¹; k 为土壤导水率,L·T⁻¹; z 为土壤深度,假定向下为正,L; $s(h)$ 为源汇项,如根系吸水率,L·T⁻¹,只在根系层土壤区有此项,根系层以下土壤区源汇项为0。

土壤水分特征曲线可采用van Genuchten模型(1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h^n|)^m} \quad (4)$$

$$K = K_s S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{n-1}{n}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (6)$$

式中: θ_s 为饱和含水率,L³·L⁻³; θ_r 为残余含水率,L³·L⁻³; θ 为计算时段内的土壤含水率,L³·L⁻³; m 、 n 、 α 为经验系数,需通过试验求得,其中 $m=1-1/n$; S_e 为相对饱和度, K_s 为土壤饱和导水率,L·T⁻¹; λ 为取决于dK/dh的性状参数。

3.2 参数率定与模型验证

分别选取1#和2#在0.25年一遇(1h)人工降雨条件下的实验数据,对模型参数进行率定。1#和2#模拟的土壤层厚度均设置为60cm(填料层厚度),其中1#填料层只有土壤介质,不进行分层,2#填料层分为两

表2 土壤水力特征参数

Table2 The parameters of the soil characteristics

生物滞留池填料	饱和含水率 θ_s / $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	残留含水率 θ_r / $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	饱和导水率 K_s / $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$	α	λ	N
1#	0.422	0.055	0.083	0.025	0.5	1.69
2#(上层)	0.431	0	0.172	0.025	0.5	2.55
2#(下层)	0.448	0	0.518	0.0023	0.5	1.44

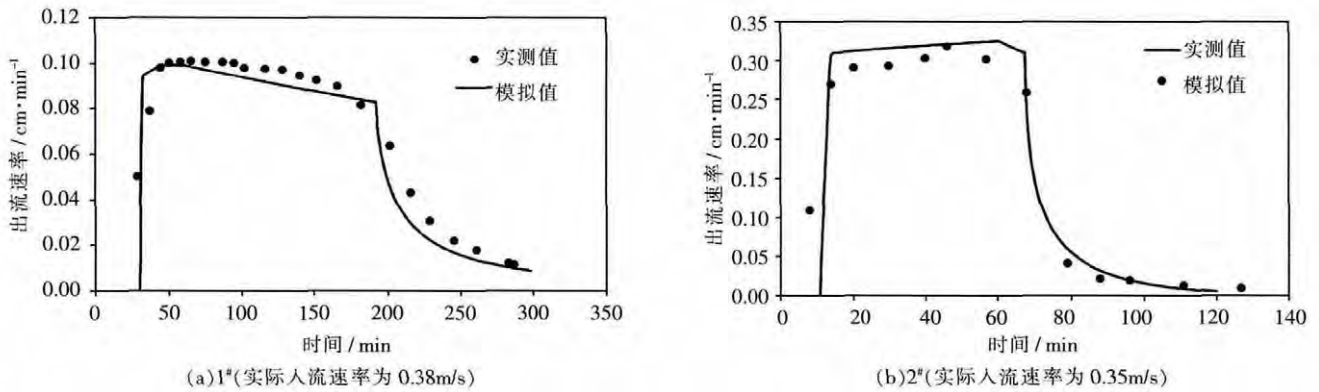


图3 实测和模拟的出流过程验证对比图

Fig.3 Validation of the observed and simulated runoff process

层,上层 25cm(土壤介质)、下层 35cm(蛭石);积水深度均设置为 15cm;初始条件为初始土壤含水率,上边界条件均为土壤表层的大气边界,下边界条件均为渗漏面边界;由于模拟时间较短,不考虑作物蒸腾和土壤蒸发。本文将对 1# 和 2# 的出流过程和积水时间的吻合程度。土壤水力特征参数在实验值的基础上进行调参,率定后的参数见表 2。

分别选取 1# 和 2# 在 0.5 年一遇(1h)人工降雨条件下的实验数据,对模型进行验证,验证后的出流过程比较见图 3。从图 3 中可以看出 1# 和 2# 的模拟值与实测值基本吻合,均方根误差(RMSE)分别为 0.032 和 0.086cm/min,平均相对误差(MRE)分别为 18.6%和 36.8%,相关系数(R^2)分别为 0.96 和 0.87,模拟结果处于可接受范围内。对于 1# 和 2# 的积水时间,1# 的实测积水时间为 183min,模拟积水时间为 187min;2# 的实测积水时间为 0,模拟积水时间为 5min,实测积水时间均略小于模拟积水时间,这可能是由于模拟中未考虑生物滞留池中的作物截留以及松树皮覆盖层的蓄水而造成的,这个误差相对较小,对于所研究的产流过程影响不大,表明 HYDRUS-1D 模型可以较好的应用于模拟生物滞留池的产流过程。

4 生物滞留池产流规律分析

根据《北京市水文手册-暴雨图集》^[13]设计了不同

频率的城区 24h 降雨量,见表 3。应用验证后的 HYDRUS-1D 模型,分别对 1# 和 2# (10 倍汇水面积)在 24h 不同降雨频率下的产流过程进行模拟,模拟初始土壤含水率为从表层 0.25 均匀变化到底层 0.3,其余参数均选用已率定值。分别从产流量、产流延迟时间、积水时间和洪峰削减四个方面分析不同降雨频率和填料层对生物滞留池产流规律的影响。

表3 不同设计频率的24h降雨量

Table3 The designed precipitation with different frequency

设计频率 P/%	1	2	5	10	20	50	100
24h 降雨量/mm	423.4	357.7	274.7	213.5	155.0	87.4	48.1

(1)产流量。由于生物滞留池设置有蓄水层和溢流管,当积水深度小于 15cm 时,产流量为通过填料层下渗的排水量;当积水深度超过 15cm 时会产生溢流,产流量为通过下渗的排水量与溢流量之和。生物滞留池的径流削减和水质改善效果是通过雨水在下渗过程中实现的,因此通过填料层下渗的水量越多,溢流量越少,其效果越明显。对比 1# 和 2# 在不同降雨频率下的溢流量分别占入流量的百分比(图 4),可以看出 2# 的溢流量始终小于 1#,且两者的溢流量均随降雨量的增加而增加。对比 1# 和 2# 的下渗排水量占入流量的百分比,在 1 年一遇($P=100%$)到百年一遇($P=1%$)

的不同频率下,1#的占比从90.7%下降到25.8%,而2#的占比从88.9%下降到64.7%,2#较1#下降缓慢,这与2#含有大粒径填料、会形成大孔隙流有关,因此2#的渗透性能优良,有助于减少溢流的产生,进而充分发挥生物滞留池对径流削减及水质的改善效果。

(2)产流延迟时间。在描述生物滞留池延缓产流时间的效果时,采用延迟时间作为参数,其定义为开始降雨的时刻与开始产流时刻的时间差。从1#和2#在不同降雨频率下的延迟时间图(图5)可以看出,两者均随降雨量的增加而减小。在1年一遇($P=100%$)和2年一遇($P=50%$)频率下,1#和2#延迟时间均大于2h,最长可达3.4h;在5年一遇($P=20%$)到百年一遇($P=1%$)不同频率下,1#的延迟时间在1.0~1.5h之间,2#的延迟时间在0.4~1.0h之间,且变化幅度趋于平缓,这说明生物滞留池在降雨频率不超过2年一遇($P=50%$)情形下,延缓产流时间效果显著,且1#略优于2#。

(3)积水时间。其定义为蓄水层深度超过0cm的时长。由于设计降雨每小时的降雨速率不同,导致生物滞留池会在不同时段出现积水。一般来说,积水超过6h可能会对作物生长造成影响,同时会导致蚊蝇滋生,根据1#和2#在不同降雨频率下不同时间段的积水时

间(图6),1#超过6h的积水时段数占其总积水时段数的64.3%,2#仅占5.3%,1#超过6h的积水时段分布在降雨频率超过5年一遇条件下,2#仅分布在降雨频率超过百年一遇条件下,同时对比1#和2#的总积水时间,2#显著低于1#,可见添加大粒径颗粒可以显著减少积水时间,在降雨频率不超过2年一遇($P=50%$)条件下均能满足作物生长和环境需求。

(4)洪峰削减率。由于HYDRUS-1D模型输出结果的局限性,仅能对不发生溢流情形下生物滞留池的洪峰削减率进行计算,本研究中1#和2#仅在1年一遇降雨频率下不发生溢流。对比计算结果,1#的洪峰削减率为70.6%,2#的洪峰削减率为21.0%。结合本研究的实验成果,1#和2#在0.25年一遇(1h)人工降雨条件下的洪峰削减率分别为70.0%和24.8%,在0.5年一遇人工降雨条件下分别为73.7%和33.8%,由此可见,在不发生溢流情形下,1#的洪峰削减率超过70%,2#不足35%,传统填料的洪峰削减效果优于添加大粒径颗粒的填料。

5 结论

根据生物滞留池降雨径流观测试验资料对

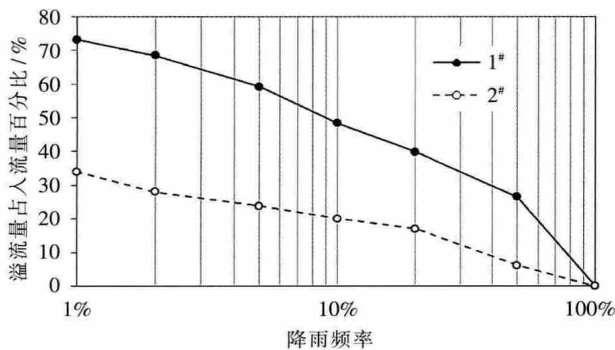


图4 1#和2#的下渗量和溢流量占入流总量的百分比对比图

Fig.4 Comparison of infiltration and outflow depth to total flow for 1# and 2#

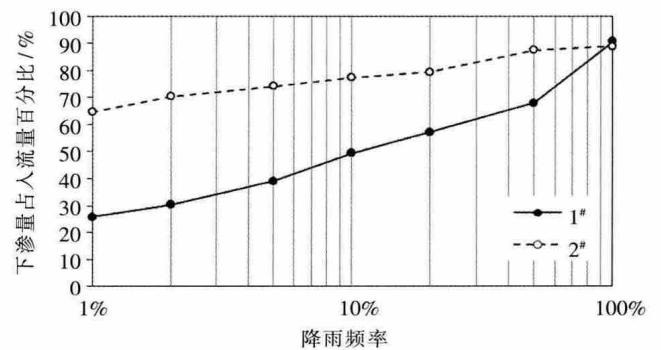


图5 1#和2#的产流延迟时间对比图

Fig.5 Comparison of runoff delay duration for 1# and 2#

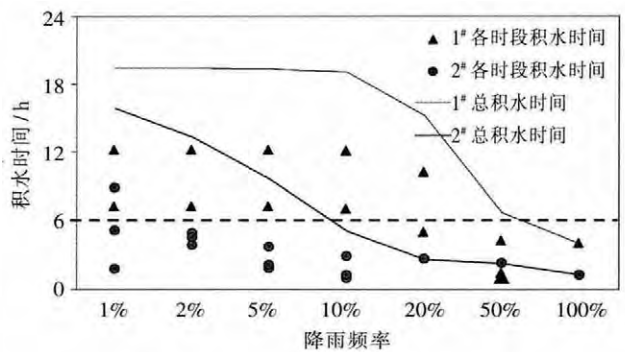


图6 1#和2#的积水时间对比图

Fig.6 Comparison of ponding duration for 1# and 2#

HYDRUS-1D 进行了率定和验证,确定了适合的土壤参数,模拟值与实测值吻合较好,表明 HYDRUS-1D 模型经率定和验证后可用于模拟生物滞留池的产流过程。

根据北京市 24h 不同降雨频率数据,对不同填料层生物滞留池的产流规律进行了模拟分析,模拟结果表明:①在 1 年一遇($P=100\%$)到百年一遇($P=1\%$)的不同频率下,传统填料的生物滞留池通过下渗的排水量占入流总量的百分比从 90.7% 下降到 25.8%,添加大粒径颗粒填料从 88.9% 下降到 64.7%,添加大粒径填料能够显著增加下渗量,减少溢流和积水时间;②生物滞留池在降雨频率不超过 2 年一遇 ($P=50\%$) 情形下,延缓产流时间效果显著(超过 2h),且传统填料略优于添加大粒径颗粒的填料;③在不发生溢流情形下,传统填料的洪峰削减率超过 70%,而添加大粒径颗粒的填料不足 35%,传统填料的洪峰削减效果优于添加大粒径颗粒的填料。

HYDRUS-1D 模型在研究生物滞留池产流方面仍具有一定的局限性,需进一步探索或通过耦合其他模型的方法完善生物滞留模拟技术,为生物滞留池的推广和应用提供更多参考。

参考文献:

- [1] Environmental Protection Agency (EPA). Low impact development (LID): a literature review [Z]. Washington, DC: US EPA Office of Water, 2000.
- [2] Davis A P, Hunt W F, Traver R G, et al. Bioretention technology: overview of current practice and future needs [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009,135(3):109-117.
- [3] Hunt W F, Smith J T, Jadlocki S J, et al. Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte,NC[J]. Journal of Environmental Engineering, 2008,134(5):403-408.
- [4] Chapman C, Horner R R. Performance assessment of a street-drainage bioretention system [J]. Water Environment Research, 2010,82(2):109-119.
- [5] Dietz M E, Clausen J C. Saturation to improve pollutant retention in a rain garden [J]. Environmental Science & Technology, 2006,40(4):1335-1340.
- [6] Davis A P. Field performance of bioretention: water quality [J]. Environmental Engineering Science, 2007,24(8):1048-1064.
- [7] Hsieh C H, Davis A P. Multiple-event study of bioretention for treatment of urban storm water runoff [J]. Water Science & Technology, 2005,51(3):177-181.
- [8] Davis A P. Field performance of bioretention: hydrology impacts[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008,13(2):90-95.
- [9] Asleson B C, Nestingen R S, Gulliver J S, et al. Performance assessment of rain gardens [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2009,45(4):1019-1031.
- [10] Atchison D, Severson L. RECARGA User's Manual [M]. Madison: University of Wisconsin, 2004.
- [11] 邱训平,毛红梅. 雨水箱对雨水收集和径流水质的影响[J]. 水利水电快报, 2011,32(8):36-38. (QIU Xunping, MAO Hongmei. The influence of stormwater collection and runoff water quality for rain-water tank [J]. Express Water Resource & Hydropower Information, 2011,32(8):36-38. (in Chinese))
- [12] Simunek J, Sejna M, Van Genuchten M T. HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably media [Z]. Department of Environmental Sciences, University of California, 2008:315.
- [13] 北京市水务局. 北京市水文手册第一分册暴雨图集 [Z]. 1999. (Beijing Water Authority. Beijing Hydrological Manual: Rainstorm Atlas [M]. 1999. (in Chinese))

Study on Runoff of Bioretention by Model Simulation

YIN Ruixue¹, MENG Yingying^{1,2}, ZHANG Shuhan¹, CHEN Jiangang¹

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100044, China;

2. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To investigate the runoff of bioretention, a rainfall-runoff relationship experiment was conducted. HYDRUS-1D model was applied to simulate the runoff generation processes with different designed precipitation frequency and filter media. The simulated runoff process and ponding duration were in good consistence with the measured data. The results show that the model is able to capture the runoff processes reasonably well of bioretention after parameter calibrated and model validation. With designed precipitation frequency changed from $P=100\%$ to $P=1\%$ as the rainfall depth from 48.1mm to 423.4mm in 24 hours, the infiltration depth to total flow changed from 90.7% to 25.8% for bioretention with traditional filter media, while it changed from 88.9% to 64.7% for bioretention with large particle filter media. The simulated results indicate that the infiltration capability of bioretention with large particle filter media is better than with traditional filter media, and reducing the amount of outflow and ponding time obviously. However, the delay period with traditional filter media is longer than with large particle filter media. Also the peak flow reduction of the bioretention with traditional filter media is larger than large particle filter media before over flood occurrence.

Key words: bioretention; HYDRUS-1D; rainfall-runoff