

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.014

基于 HYDRUS-1D 生物滞留设施雨水径流 水文调控模拟

张 炜^{1,2}, 王浩远^{1,2}, 赵玉华^{1,2}, 李思敏^{1,2}

(1. 河北工程大学能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心, 河北 邯郸 056038)

摘要:为研究生物滞留设施水文调控效能,基于 HYDRUS-1D 建立生物滞留设施模型,通过物模试验数据率定模型参数,验证模型可靠性;利用验证后的模型开展模拟试验,采用径流总量和峰值削减率及产流和峰现延迟时间定量分析水力负荷参数、蓄水层高度和初始含水率对生物滞留设施水文调控效应的影响。结果表明:所建模型模拟值与实测值的均方根误差最高仅为 0.134,相对误差为 -2.28% ~ 7.59%,纳什效率系数和决定系数均在 0.8 以上,模拟结果可靠;综合考虑水力负荷参数,汇流比小于 10:1 的生物滞留设施对于重现期小于 1a 并且降雨时长小于 120 min 的降雨过程有较好的调控效果,随着汇流比、重现期和降雨时长的增加,设施水文调控效果不断削弱;增加蓄水层高度会提升生物滞留设施水文调控效果,当蓄水层高度由 0 cm 增加至 25 cm 时,径流总量和峰值削减率分别增加 86.16% 和 96.74%,产流和峰现延迟时间分别为 57.8 min 和 36.0 min;初始含水率的增大会降低设施水文调控效果,其径流总量和峰值削减率变化范围分别为 49.32% ~ 54.11% 和 22.84% ~ 45.37%,产流和峰现延迟时间变化范围分别为 24.1 ~ 25.0 min 和 1.0 ~ 2.5 min。

关键词:生物滞留设施;HYDRUS-1D;雨水径流;水文调控

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0102-07

Hydrological regulation simulation of rainwater runoff of bioretention based on HYDRUS-1D // ZHANG Wei^{1,2}, WANG Haoyuan^{1,2}, ZHAO Yuhua^{1,2}, LI Simin^{1,2} (1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Technology Innovation Center for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Handan 056038, China)

Abstract: In order to study the hydrological regulation efficiency of bioretention facilities, a bioretention model was established based on HYDRUS-1D, and the model parameters were calibrated through experimental data to verify the reliability of the model. The verified model was used to carry out simulation experiments, and the influence of hydraulic load parameters, aquifer height and initial water content on the hydrological regulation effect of bioretention was quantitatively analyzed by using the total runoff and peak reduction rate, and the delay time of runoff and peak emergence. The results showed that the maximum root mean square error of the simulated and measured values was only 0.134, the relative error was -2.28% to 7.59%, the Nash-Sutcliffe efficiency and R^2 were both above 0.8, and the simulation results were reliable. Comprehensively considering the hydraulic load parameters, the bioretention with a confluence ratio of less than 10:1 have a better control effect on the rainfall process with a return period of less than 1a and a rainfall duration of less than 120 min. With the increase of the confluence ratio, return period and rainfall duration, the hydrological control effect of facilities continues to weaken. Increasing the height of the aquifer will improve the hydrological regulation effect of the bioretention. When the height of the aquifer increases from 0 cm to 25 cm, the total runoff and peak reduction rate increase by 86.16% and 96.74%, respectively, and the runoff generation and peak emergence delay time are extended by

基金项目:国家重大科技专项(2018ZX07110-002);河北省自然科学基金(E2018402172);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2019148);河北省水环境科学实验室开放课题(HBSHJ202104)

作者简介:张炜(1981—),男,副教授,硕士,主要从事城市雨洪控制技术研究。E-mail:zhangwei1981@hebeu.edu.cn

通信作者:李思敏(1968—),男,教授,博士,主要从事污(废)水处理及资源化与雨水利用研究。E-mail:chyeli@126.com

57.8 min and 36.0 min, respectively. The increase of the initial water content will reduce the hydrological control effect of the bioretention, the total runoff and peak reduction rate ranged from 49.32% to 54.11% and 22.84% to 45.37%, respectively, and the range of runoff generation and peak-occurrence delay time ranged from 24.1 min to 25.0 min and 1.0 min to 2.5 min, respectively.

Key words: bioretention; HYDRUS-1D; rainwater runoff; hydrological regulation

近年来,为应对城市内涝频繁和水环境恶化,我国开始实施并全面推进海绵城市建设,生物滞留设施作为主要的单项海绵措施之一受到了业内广泛关注,相关理论与技术的研究不断发展^[1-3]。目前,关于生物滞留设施的研究大多集中于试验或实测研究^[4-5],容易受到试验装置或现场条件的制约,鉴于模型模拟可以大范围多角度地分析解决问题,且具有较好的准确性和便捷性,众多学者引入模型技术用于生物滞留设施的研发工作^[6]。唐双成等^[7]利用西安市 1951—2007 年长序列降雨过程,通过 DRAINMOD 模拟雨水花园长期运行效果;Gao 等^[8]利用 RECARGA 模拟生物滞留设施对降雨径流调控效应;Meng 等^[9]基于实测数据验证了 HYDRUS-1D 模拟生物滞留设施运行效果的可靠性。HYDRUS-1D 是由美国盐土实验室开发的土壤环境模拟软件,可以模拟变饱和和多孔介质中的一维水流入渗过程,适应范围较广,模拟结果可靠^[10-11]。殷瑞雪等^[12]以北京城区为背景,运用 HYDRUS-1D 模拟分析两种填料层生物滞留设施在不同重现期下 24 h 降雨过程的产流规律;李家科等^[13]通过设定多组情景,利用 HYDRUS-1D 模拟不同填料层厚度生物滞留设施径流总量调控效果。然而,不同地区降雨特征差异较大,需根据降雨条件调整生物滞留设施结构,同时设施结构设计较为复杂,缺乏系统性研究。因此,本文通过物模试验结果率定模型参数,验证基于 HYDRUS-1D 生物滞留设施模型模拟结果的可靠性;通过改变降雨特征和设施结构参数,分析不同水力负荷、蓄水层高度和初始含水率条件下生物滞留设施雨水径流水文调控效应,以期生物滞留设施的优化设计和建设提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

生物滞留设施试验装置采用直径 150 mm UPVC 管试制,依据《海绵城市建设技术指南》中生物滞留设施的设计要求,设施自上而下分为 50 mm 超高层、100 mm 蓄水层、150 mm 种植土层、600 mm 填料层和 100 mm 承托层,如图 1 所示。种植土层选用我国华北地区典型表层 20 cm 处粉质壤土,种植北方地区常见的早熟禾和鸢尾;填料层选用体积比 1:2 的种

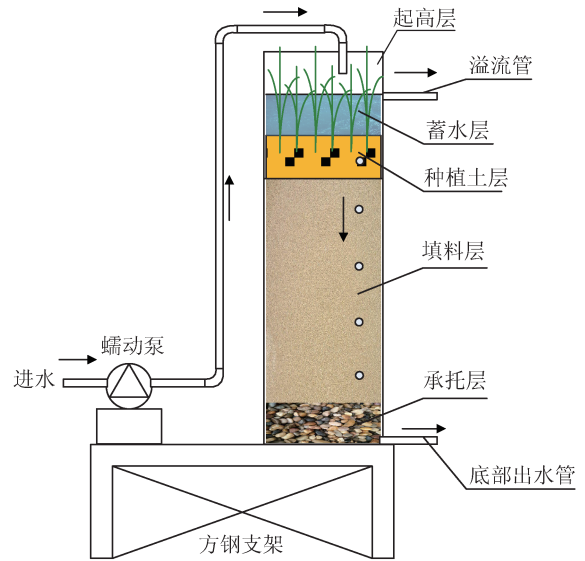


图1 生物滞留设施装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of bioretention facilities

植土加工程砂混合填料。

1.2 模型原理

HYDRUS-1D 采用 Richards 方程来描述一维垂向水分运移过程,忽略水流水平和侧向运动^[14],表达式为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \beta \right) \right] - S \quad (1)$$

$$K(h, x) = K_s(x) K_r(h, x) \quad (2)$$

式中: h 为压力水头, cm; θ 为体积含水率, cm^3/cm^3 ; t 为时间, s; x 为垂向坐标, cm; $K(h, x)$ 为非饱和渗透系数函数; S 为源汇项, 通常代表根系吸水率; β 为水流方向与垂直方向夹角, 取 $\beta = 0$; K_r 为相对导水率, cm/d; K_s 为饱和导水率, cm/d。

HYDRUS-1D 提供了 5 种可选的土壤水力模型, 本文选用应用较为成熟、适用范围更广的 van Genuchten-Mualem 模型, 且忽略水流滞后现象^[15], 该模型方程为

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (4)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

其中

$$m = 1 - 1/n$$

式中: θ_r 为残余含水率, cm^3/cm^3 ; θ_s 为饱和含水率, cm^3/cm^3 ; S_e 为有效饱和度; α 为进气值倒数, cm^{-1} ; n 为孔径分布参数。

1.3 试验方法

取种植土和工程砂试样风干、研磨后过 2mm 筛,采用筛分法与比重计法测定试验所用种植土与混合填料颗粒组成,按照美国制土壤质地三角图确定其土壤质地^[16-17],采用环刀法测定容重,烘干法测定含水率,通过 HYDRUS-1D 自带的 Rosetta 软件,依据种植土与混合填料的机械组成及容重拟合水分特征曲线,预测水力模型参数^[18]。为率定模型参数,验证模型的可靠性,依据邯郸市暴雨强度公式和设计径流量公式,综合实际降雨特征和生物滞留设施分布特征,选择降雨重现期为 0.5 a、2 a 和 5 a,降雨时长为 60 min、90 min 和 120 min 的降雨过程,并且采用生物滞留设施汇流比为 10:1、15:1 和 20:1,结合正交试验原理设计 9 组试验,如图 2 所示。受试验条件的制约,试验时采用恒定进水水力负荷,同时观测和记录设施的溢流和出水过程,直至进水结束。分析生物滞留设施雨水径流水文调控影响因素时,为尽可能地模拟实际降雨过程,按芝加哥雨型确定生物滞留设施进水量,雨峰系数取 0.4^[19]。

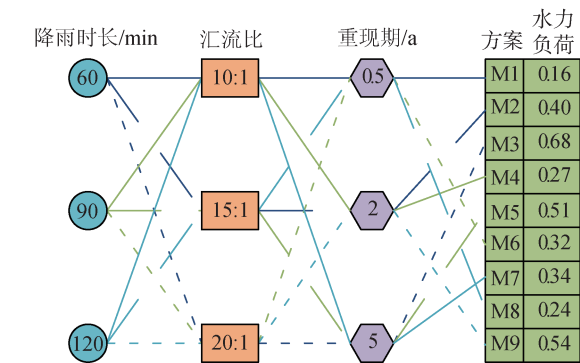


图 2 试验设计
Fig.2 Experiment design

试验通过蠕动泵(保定兰格 WT600-2J-A)控制装置进水流量,在装置溢流口和出水口利用容积法测定溢流量和出水量。每次试验间隔 3 d,试验前测定装置种植土层和填料层初始含水率,以保证每次试验生物滞留设施各层含水率基本相同。通过 HYDRUS-1D 建立生物滞留设施模型,以含水率作为模型初始条件,模型上边界为大气边界条件,下边界(出水口)为自由出流边界条件,根据试验降雨时长确定模型的时间信息和输出信息,迭代信息参照模型默认值。因试验降雨时长较短,故忽略植物吸收、土壤蒸发及环境温度等对雨水径流的影响。选取 M1、M4、M7 方案试验数据

率定模型参数,主要调整种植土层和填料层的 K_s 、 θ_s 及 n ,辅助微调 θ_r 和 α ^[13],对比生物滞留设施溢流量的模拟值和实测值;利用 M2、M3、M5、M6、M8、M9 方案试验数据验证模型可靠性。在参数率定和验证模型可靠性的过程中,通过均方根误差(RMSE)、相对误差(RE)、纳什效率系数(NSE)及决定系数(R^2) 4 个指标判断模拟值和实测值之间的吻合度^[20-21]。生物滞留设施雨水径流水文调控效应受水力负荷、蓄水层高度和初始含水率等因素的影响。采用验证后的生物滞留设施模型,通过改变不同影响因素,设定多组模拟情景,分析生物滞留设施水文调控效能,判断设施达到最佳调控效果的条件,从而达到优化和推广生物滞留设施的目的。

2 试验结果与分析

2.1 模型参数率定和验证

依据试验实测数据与模型模拟结果的吻合程度,不断优化调整种植土层和填料层对应的 θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 、 K_s 等模型水力特征参数,参数率定结果见表 1。将参数率定结果代入模型,利用剩余 6 组试验验证模型可靠性,率定期与验证期模型模拟评价结果见表 2。由表 2 可见,模型 RMSE 为 0.038 ~ 0.134, RE 为 -2.28% ~ 7.59%, NSE 为 0.849 ~ 0.999, R^2 为 0.894 ~ 0.999,表明模拟结果与实测结果基本一致,模型模拟结果可靠。

表 1 模型参数率定结果
Table 1 Calibration results of model parameters

填料	$\theta_r/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_s/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\alpha/$ cm^{-1}	n	$K_s/$ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
种植土层	0.083	0.453	0.010	1.466	0.016
填料层	0.060	0.418	0.031	1.343	0.079

表 2 模型评价结果
Table 2 Evaluation results of model

阶段	方案	RMSE	RE/%	NSE	R^2
率定期	M1	0.110	5.84	0.849	0.894
	M4	0.080	3.34	0.989	0.997
	M7	0.134	7.59	0.915	0.992
验证期	M2	0.080	3.34	0.989	0.997
	M3	0.038	0.20	0.999	0.999
	M5	0.084	2.63	0.989	0.997
	M6	0.122	6.92	0.959	0.994
	M8	0.052	-2.28	0.979	0.986
	M9	0.131	4.23	0.970	0.994

2.2 雨水径流水文调控效能

运用验证后的 HYDRUS-1D 模型,模拟生物滞留设施雨水径流水文调控效能。选取产流延迟时间 t_1 、峰现延迟时间 t_2 、径流总量削减率 E_1 和径流

峰值削减率 E_2 作为生物滞留设施雨水径流水文调控效能的评判指标。仅以重现期 0.5 a 和降雨时长 60 min 作为降雨条件,以汇流比 10:1、蓄水层高度 10 cm 和初始含水率 20% 的生物滞留设施为例,其设施径流水文调控过程如图 3 所示。由图 3 可见,在雨水进入生物滞留设施初期,雨水流量较小,设施蓄水层可以蓄存一部分雨水,同时通过基质的入渗未产生溢流;当蓄水达到一定高度后,通过溢流口排出,溢流出水时间即为 t_1 ;随后溢流流量快速增加,达到峰值后呈缓慢减小趋势,进水流量峰值时间与溢流量峰值时间差值即为 t_2 ;累积进水体积随着雨水径流的变化缓慢增加,在进水流量到达峰值时快速上升,然后随着进水流量的减小缓慢增大,溢流出水伊始累积溢流体积上升速度较快,而后逐渐趋于缓慢,累积进水与溢流体积差值表示径流总量削减量,其与累积进水体积的比值为 E_1 ;进水峰值流量与溢流峰值流量的差值为径流峰值削减量,其与进水峰值流量的比值为 E_2 。

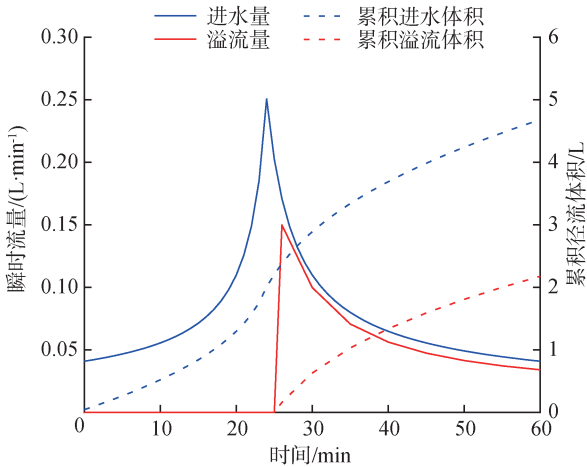


图3 生物滞留设施水文调控过程

Fig.3 Hydrological regulation process of bioretention facilities

2.3 影响因素

2.3.1 水力负荷

降雨重现期 P 、降雨时长 T_d 及汇流比 i 是影响进水负荷的重要因素,通过模拟芝加哥雨型,根据 3 种影响因素设置 10 种模拟情景进行单因素对比试验,对比分析不同条件下生物滞留设施水文调控过程,结果如表 3 所示。

a. 降雨重现期。根据表 3 对比情景 1、情景 2、情景 3 及情景 4 可知,在 T_d 、 i 一致的情况下,分析生物滞留设施水文调控效果,随着 P 不断增加, t_1 、 t_2 、 E_1 和 E_2 均逐渐减小。与 P 为 0.5 a 相比,生物滞留设施在 P 为 5 a 条件下, t_1 和 t_2 分别减少 9 min 和 2 min、 E_1 和 E_2 分别降低 28.48% 和 34.22%。这是由于随着

表 3 不同情景水文调控模拟结果

Table 3 Hydrological regulation simulation results in different scenarios

情景编号	影响因素			$E_1/\%$	$E_2/\%$	t_1/min	t_2/min
	P/a	T_d/min	i				
1	0.5	60	10:1	53.53	36.22	25	2
2	1	60	10:1	38.70	12.72	20	1
3	2	60	10:1	32.01	2.60	20	0
4	5	60	10:1	25.05	2.00	16	0
5	0.5	30	10:1	70.24	57.37	15	5
6	0.5	120	10:1	42.33	3.36	45	0
7	0.5	180	10:1	37.94	2.72	65	0
8	0.5	60	5:1	100	100	60	36
9	0.5	60	15:1	35.85	2.87	21	1
10	0.5	60	20:1	26.11	2.10	18	1

重现期的增加,生物滞留设施瞬时进水量大于等于填料渗透量的临界点前移,其产流时间和峰现时间随之提前,进水不能及时下渗的降雨时段延长,溢流量也逐渐增大。Meng 等^[9]在对生物滞留设施的产流模拟中,设置了不同重现期下 24 h 降水量,径流削减率从 90.7% 下降至 25.8%,可见随着重现期的增加生物滞留设施对于雨水径流总量削减率不断下降。 $P \leq 1$ a 时,生物滞留设施的雨水径流峰值削减作用较为明显; $P > 1$ a 时, E_2 则由 12.72% 迅速下降至 2.60% 后又缓慢下降至 2.00%,表明生物滞留设施对 $P > 1$ a 的降雨径流峰值削减能力较差,且重现期越大,生物滞留设施对雨水径流峰值调控效果差异越小。

b. 降雨时长。对比情景 1、情景 5、情景 6 及情景 7 可知, T_d 取 30 ~ 180 min 之间时,生物滞留设施雨水径流的 t_1 、 t_2 分别为 15 ~ 65 min、0 ~ 5 min, E_1 、 E_2 分别为 37.94% ~ 70.24%、2.72% ~ 57.37%。随着 T_d 的增加,生物滞留设施对雨水径流调控效果的影响逐渐减小,当 $T_d > 120$ min 时其影响可忽略不计。这是由于随着 T_d 增加,进水总量不断增大,而生物滞留设施填料层存在一个饱和含水率状态,一旦填料层达到饱和含水率,生物滞留设施进水将处于稳定入渗状态,其渗透能力不再随 T_d 的延长而改变,进水量越大,其溢流量也相应增加。

c. 汇流比。 i 是指生物滞留设施表面积与整个汇水面积的比值,是生物滞留设施主要设计参数之一。对比情景 1、情景 8、情景 9 及情景 10 可知,在 i 为 5:1 ~ 20:1 时, $i = 20:1$ 的生物滞留设施相较于 $i = 5:1$ 的情况,其 E_1 、 E_2 分别降低 73.89%、97.90%, t_1 、 t_2 分别减少 42 min、35 min, E_1 、 E_2 、 t_1 、 t_2 随着 i 的增加先快速下降;当 $i > 10:1$ 后,其下降趋势趋于平缓。由于进水量的变化并不会影响土壤填料的下渗速率,整体上随着 i 的增加,进水流量不断增大,设施对于径流的调控能力呈下降趋势。

2.3.2 蓄水层高度

初始含水率 $m_0 = 20\%$ 的生物滞留设施在 $P = 0.5 a, T_d = 60 \text{ min}, i = 10:1$ 情况下,对不同蓄水层高度 H 的生物滞留设施进行产流模拟分析,选取 H 分别为 $0 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 15 \text{ cm}, 20 \text{ cm}, 25 \text{ cm}$,不同蓄水层高度生物滞留设施水文调控效应如图 4 所示。由图 4 可见,当进水流量一致时,随着 H 的增大,溢流量大大减少,并有溢流延迟现象发生。当 H 由 0 cm 变化至 25 cm 时,生物滞留设施的 E_1, E_2 分别为 $13.84\% \sim 100\%、3.26\% \sim 100\%$, t_1, t_2 分别为 $2.25 \sim 60 \text{ min}, 0 \sim 36 \text{ min}$ 。 H 为 25 cm 的生物滞留设施相较于 H 为 0 cm 的设施, E_1, E_2 分别提升了 $86.16\%、96.74\%$, t_1, t_2 分别提升了 $57.8 \text{ min}、36.0 \text{ min}$ 。并随着 H 的不断加, E_1, E_2, t_1, t_2 呈快速增长趋势。蓄水层高度越高,设施对于径流的调控效益越显著,与涂安国等^[22]的研究结果类似。这是由于雨水径流进入生物滞留设施以后,一部分通过填料层下渗,另一部分蓄存在设施蓄水层内,当蓄存雨水超过蓄水层高度后,以溢流形式排出形成雨水径流。蓄水层高度越高,设施能够蓄积的雨水径流越多,对于雨水径流的调蓄能力越大。此外,虽然增大蓄水层高度可以显著地提高雨水径流调控能力,但也会使得积水时间大大延长,影响设施中植物的生长且导致蚊蝇滋生破坏环境,因此,设计生物滞留设施蓄水层高度时,需综合考虑多方面因素限制以使效益最大化。

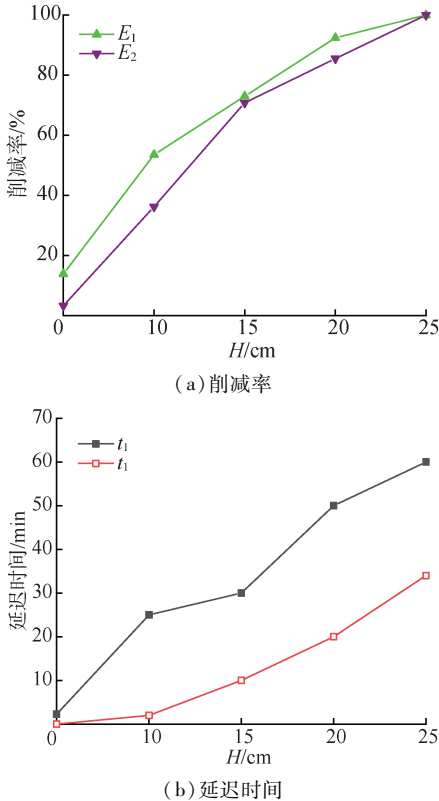


图 4 不同蓄水层高度生物滞留设施水文调控效应
Fig. 4 Hydrological regulation effect of bioretention under different aquifer heights

2.3.3 初始含水率

m_0 与前期干旱天数相关,前期干旱天数增加导致土壤水分通过蒸发不断减少。分别对 $H = 10 \text{ cm}$ 的生物滞留设施在 $P = 0.5 a, T_d = 60 \text{ min}, i = 10:1$ 情况下,不同 m_0 的生物滞留设施进行产流模拟分析,选取 m_0 分别为 $15\%、20\%、25\%、30\%$,生物滞留设施水文调控效应如图 5 所示。由图 5 可见,当 m_0 由 15% 变化至 30% 时,生物滞留设施 E_1, E_2 分别为 $49.32\% \sim 54.11\%、22.84\% \sim 45.37\%$, t_1, t_2 分别为 $24.1 \sim 25.0 \text{ min}, 1.0 \sim 2.5 \text{ min}$ 。随着生物滞留设施 m_0 的不断加, E_1 变化不大,而 E_2 变化较为明显,当 $m_0 > 25\%$ 后峰值削减率出现拐点,整体呈先快后慢的下降趋势; t_1, t_2 整体变化趋势不大。相同降雨条件下, m_0 越低,生物滞留设施对于雨水径流的调控效应越好,与郭瀛莉等^[23]通过分析土壤前期含水率对下凹式绿地径流调控效应的影响得到的结论基本一致。这是因为土壤前期含水量较低时,土壤颗粒间的结合力很小,贮存雨水径流的有效孔隙体积变大,提高了土壤的入渗能力,导致稳定入渗阶段所需的时间也较长,从而减少地表径流,达到调控径流的作用。

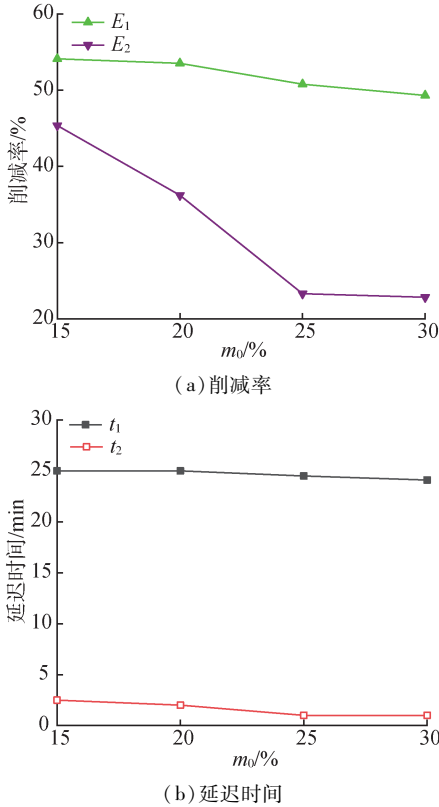


图 5 不同初始含水率生物滞留设施水文调控效应
Fig. 5 Hydrological regulation effect of bioretention under different initial moisture contents

3 结 论

a. 利用实测生物滞留设施物模试验数据率定

HYDRUS-1D 模型参数, RMSE 为 0.038 ~ 0.134, RE 为 -2.28% ~ 7.59%, NSE 为 0.849 ~ 0.999, R^2 为 0.894 ~ 0.999, 验证了模型的可靠性, 可以用于分析生物滞留设施雨水径流水文效应。

b. 水力负荷的变化对生物滞留设施水文调控起着重要的作用,降雨重现期从 0.5 a 变至 5 a, 径流总量和峰值削减率及产流和峰现延迟时间分别降低 28.48%、34.22%、9 min、2 min; 降雨时长从 30 min 变至 180 min, 径流总量和峰值削减率分别降低 32.30% 和 54.65%, 产流延迟时间增加 50 min, 峰现延迟时间减少 5 min; 随着汇流比的增加, 设施径流总量和峰值削减率及产流和峰现延迟时间先快速下降, 当汇流比大于 10:1 后, 其下降趋势趋于平缓, 整体上分别降低 73.89%、97.90%、42 min、35 min。

c. 蓄水层高度的增加显著提升了生物滞留设施水文调控效能,蓄水层高由 0 cm 增加到 25 cm 时, 径流总量和峰值削减率及产流和峰现延迟时间分别提升了 86.16%、96.74%、57.8 min、36.0 min, 并且呈快速增长趋势; 初始含水率从 15% 增加到 30% 时, 其径流总量和峰值削减率分别降低 4.79% 和 22.53%, 当初始含水率大于 25% 后峰值削减率出现拐点, 整体下降趋势先快后慢, 产流和峰现延迟时间分别降低 0.9 min 和 1.5 min, 整体变化趋势不大。

参考文献:

- [1] 翟慧敏, 程启先, 李书覃, 等. 海绵城市理念演变的知识图谱可视化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 34-40. (ZHAI Huimin, CHENG Qixian, LI Shuqin, et al. Visual analysis of knowledge map of sponge city concept evolution [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 34-40. (in Chinese))
- [2] YIN Jie, YE Mingwu, YIN Zhang, et al. A review of advances in urban flood risk analysis over China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(3): 1063-1070.
- [3] 李家科, 张兆鑫, 蒋春博, 等. 海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 1-8. (LI Jiake, ZHANG Zhaoxin, JIANG Chunbo, et al. Research progress on key technologies of bioretention facilities for sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 1-8. (in Chinese))
- [4] PAUS K H, MUTHANNA T M, BRASKERUD B C. The hydrological performance of bioretention cells in regions with cold climates: seasonal variation and implications for design [J]. hydrology Research, 2016, 47 (2): 291-304.
- [5] WINSTON R J, DORSEY J D, HUNT W F. Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three

- bioretention cells in clay soils in northeast Ohio [J]. Science of the Total Environment, 2016, 553: 83-95.
- [6] KONSTANTINOS X S, JOHN D V, NIKOLAOS N, et al. Simulation of green roof runoff under different substrate depths and vegetation covers by coupling a simple conceptual and a physically based hydrological model [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 200: 434-445.
- [7] 唐双成, 罗纨, 许青, 等. 基于 DRAINMOD 模型的雨水花园运行效果影响因素[J]. 水科学进展, 2018, 29 (3): 407-414. (TANG Shuangcheng, LUO Wan, XU Qing, et al. Factors affecting rain garden operation based on DRAINMOD simulations [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 407-414. (in Chinese))
- [8] GAO Jianping, PAN Junkui, HU Ning, et al. Hydrologic performance of bioretention in an expressway service area [J]. Water Science and Technology, 2018, 77 (7): 1829-1837.
- [9] MENG Yingying, WANG Huixiao, CHEN Jiangang, et al. Modelling hydrology of a single bioretention system with HYDRUS-1D [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2: 1047-1055.
- [10] QIN Huapeng, PENG Yuenuan, TANG Qiaoling, et al. A HYDRUS model for irrigation management of green roofs with a water storage layer [J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 399-408.
- [11] BOUZOUIDJA R, SERE G, CLAVERIE R, et al. Green roof aging: quantifying the impact of substrate evolution on hydraulic performances at the lab-scale [J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 416-423.
- [12] 殷瑞雪, 孟莹莹, 张书函, 等. 生物滞留池的产流规律模拟研究[J]. 水文, 2015, 35 (2): 28-32. (YIN Ruixue, MENG Yingying, ZHANG Shuhan, et al. Study on runoff of bioretention by model simulation [J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35 (2): 28-32. (in Chinese))
- [13] 李家科, 赵瑞松, 李亚娇. 基于 HYDRUS-1D 模型的不同生物滞留池中水分及溶质运移特征模拟[J]. 环境科学学报, 2017, 37 (11): 4150-4159. (LI Jiake, ZHAO Ruisong, LI Yajiao. Simulation of water and solute transport characteristics in different bioretention tanks using HYDRUS-1D model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37 (11): 4150-4159. (in Chinese))
- [14] ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 587-600.
- [15] 李玮, 何江涛, 刘丽雅, 等. Hydrus-1D 软件在地下水污染风险评价中的应用[J]. 中国环境科学, 2013, 33 (4): 639-647. (LI Wei, HE Jiangtao, LIU Liya, et al.

- Application of Hydrus-1D software in groundwater contamination risk assessment [J]. China Environmental Science, 2013, 33(4): 639-647. (in Chinese))
- [16] 王睿垠, 魏永霞, 刘慧, 等. 生物炭对东北草甸黑土水分运动参数的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 186-194. (WANG Ruiyin, WEI Yongxia, LIU Hui, et al. Influences of biochar on hydrodynamic parameters of meadow black soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 186-194. (in Chinese))
- [17] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227-241. (WU Kening, ZHAO Rui. Soil texture classification and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 227-241. (in Chinese))
- [18] 高源原, 卢金锁, 苏拥军, 等. 道路下凹绿地渗水过程模拟与防护措施分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(7): 118-123. (GAO Yuanyuan, LU Jinsuo, SU Yongjun, et al. Simulation of rainwater infiltration process in roadside sunken-lawn and analysis of protective measures [J]. China Water and Wastewater, 2018, 34(7): 118-123. (in Chinese))
- [19] 欧淑芳, 叶兴成, 王飞, 等. P&C 雨型在城市排水计算中的适用性分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(2): 32-35. (OU Shufang, YE Xingcheng, WANG Fei, et al. Applicability of Pilgrim & Cordery rainstorm pattern in urban drainage calculation [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(2): 32-35. (in Chinese))
- [20] BRUNETTI G, ŠIM · NEK J, PIRO P. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement [J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 1146-1161.
- [21] PALLA A, GNECCO I, LANZA L G. Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(1): 73-84.
- [22] 涂安国, 李英, 莫明浩, 等. 基于 RECARGA 模型生物滞留池设计参数的水文效应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 149-153. (TU Anguo, LI Ying, MO Minghao, et al. Hydrological effects of design parameters optimization of bioretention facility based on RECARGA model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 149-153. (in Chinese))
- [23] 郭瀛莉, 张守红, 陈明秀, 等. 北京西山砂壤土绿地雨水断接径流调控效应试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(6): 111-119. (GUO Yingli, ZHANG Shouhong, CHEN Mingxiu, et al. Experimental study on runoff control performances for impervious area disconnection system of sandy loam soil green space in West Mountains of Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(6): 111-119. (in Chinese))

(收稿日期:2021-03-23 编辑:王芳)

· 征订启事 ·

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV)是教育部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊,针对我国水资源短缺、水污染严重、水环境恶化等突出问题,探讨水资源保护工作中的基础研究、宏观管理及水环境治理、水生态修复等问题,主要栏目有“特约专家论坛”“水资源”“水环境”“水生态”等。

《水资源保护》1985年创刊,经过30多年的努力,《水资源保护》办刊成绩斐然,目前是美国《工程索引》(EI)收录期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国权威学术期刊、中国精品科技期刊、中国高校百佳科技期刊、华东地区优秀期刊,同时被荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、美国《化学文摘》(CA)、波兰《哥白尼索引》(IC)等数据库收录。

《水资源保护》长期以来一直都是水利界和环保界备受关注的重点期刊,是国内较有影响的水利期刊之一,主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科技人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊,30元/册,全年共计180元,每逢单月20日出版。邮发代号:28-298。

地址:210098 南京市西康路1号 电话:(025)83786642

电子信箱:bh1985@vip.163.com;bh@hhu.edu.cn