

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.020

# 生物滞留设施水文要素精细化监测与水量平衡分析

欧阳友<sup>1,2</sup>, 潘兴瑶<sup>2</sup>, 杨默远<sup>2</sup>, 和继军<sup>1</sup>, 王 赫<sup>1,2</sup>, 徐晋轩<sup>2,3</sup>,  
黎光和<sup>2,4</sup>

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 4. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 生物滞留设施因与景观融合度高、径流控制效果好而被广泛运用。为了准确分析生物滞留设施的蓄水层蓄水、土壤水分变化、蒸散发、砾石层出流、深层渗漏等水文过程,利用蒸渗仪等实验监测手段,开展了生物滞留设施水文要素的精细化监测。结果表明,生物滞留设施在监测时段内的深层渗漏量、蒸散发量和砾石层出流量占水分损失的比例分别为35.33%、64.65%和0.02%,可认为生物滞留设施的降雨损失主要为蒸散发。此外,生物滞留设施的径流削减效果较好,仅在日降雨量为44 mm事件中发生了砾石层出流。根据土壤含水量的监测结果,可认为生物滞留设施渗透性能较好,且土壤含水量变化具有显著的分层效应,种植土层和填料层的土壤含水量对降雨的响应较敏感,而原状土层的土壤含水量基本稳定在饱和状态。

**关键词:** 生物滞留设施; 蒸渗仪; 水量平衡; 土壤含水量; 蒸散发; 深层渗漏

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0127-05

## Refined Monitoring of Hydrological Elements and Analysis of Water Balance in Bioretention Facility

OUYANG You<sup>1,2</sup>, PAN Xing-yao<sup>2</sup>, YANG Mo-yuan<sup>2</sup>, HE Ji-jun<sup>1</sup>, WANG He<sup>1,2</sup>,  
XU Jin-xuan<sup>2,3</sup>, LI Guang-he<sup>2,4</sup>

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Water Science & Technology Institute, Beijing 100048, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Bioretention facility is widely used because of its high integration with landscape and good runoff control performance. To accurately analyze hydrological processes such as aquifer impoundment, soil water change, evapotranspiration, gravel outflow and deep seepage of bioretention facility, the refined monitoring of hydrological elements of bioretention facility was carried out by experimental monitoring means such as lysimeter. During the monitoring period, the proportion of deep seepage, evapotranspiration and gravel outflow in the water loss of bioretention facility was 35.33%, 64.65% and 0.02%, respectively, indicating that the rainfall loss of bioretention facility was mainly evapotranspiration. In addition, the runoff reduction performance of the bioretention facility was better,

and gravel outflow only occurred in the event of a daily rainfall of 44 mm. According to the monitoring results of soil moisture, the infiltration performance of bioretention facility was good, and the soil moisture change had significant stratification. The soil moisture of the planting soil layer and the filling layer was more sensitive to rainfall, while the soil moisture of the raw soil layer was basically in a saturated state.

**Key words:** bioretention facility; lysimeter; water balance; soil moisture; evapotranspiration; deep seepage

“海绵城市”是我国现阶段城市雨洪管理的发展方向,即指城市像海绵一样,具有良好的“弹性”,下雨时渗水、滞水、蓄水、净水,需要时将存储的水排放并加以利用,起到减控城市洪涝灾害、缓解城市热岛效应的作用。城市建设强调优先利用植草沟、生物滞留设施、下沉式绿地等“绿色”措施来组织排水,其中生物滞留设施是分散式雨水处理及利用的代表性生态技术,指在地势较低的区域,通过植物、土壤和微生物系统蓄滞、净化径流雨水的设施。生物滞留设施因具有形式多样、适用区域广、易与景观结合、径流控制效果好、建设与维护费用低等特点被广泛运用于海绵城市建设。

国内外有关生物滞留设施的水文效应研究较多<sup>[1-8]</sup>,例如:黄静岩等<sup>[1]</sup>对道路生物滞留设施进行雨水径流监测实验,发现当降雨总量为3.30~76.70 mm、平均雨强为0.03~0.67 mm/min时,生物滞留设施对道路雨水径流的场次径流总量削减率为50%~100%,峰值流量削减率为53%~100%,滞峰时间可以达到2 min以上;Olszewski等<sup>[6]</sup>对某停车场的生物滞留设施的运行效果进行监测,结果表明其对径流总量和径流峰值削减率分别达到83%和79%;许目瑶等<sup>[8]</sup>研究了生物滞留设施入渗对土壤含水量的影响,结果表明中小型降雨入渗雨水花园后仅增加了非饱和区土壤含水量,土壤湿润层深度约为1 m,雨强大、历时长降雨入渗后,埋深2.3 m处土壤含水量升高至雨前的2.4倍。

目前对生物滞留设施的水文效应多集中在单场降雨尺度和单个水文过程的研究,缺乏生物滞留设施在自然状态连续运行下的水循环过程的系统监测与分析,尤其对生物滞留设施的蒸散发和土壤水这两个关键水位要素的关注较少。因此,有必要开展对生物滞留设施水文要素的连续性精细化监测,准确分析生物滞留设施降雨、产流、入渗、蒸散发等水文过程,量化评估其水文效应,以期海绵

城市建设中生物滞留设施的规划设计和推广应用提供参考。

## 1 材料与方

### 1.1 实验方案

研究区域位于北京市西郊雨洪调蓄工程海绵实验场,北京夏季高温多雨、冬季寒冷干燥,属暖温带半湿润半干旱季风气候,降雨主要集中在6月—8月。为了精准分析生物滞留设施的蒸散发过程,将其布设在方形蒸渗仪称重铁箱中。根据《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》,实验所设计的生物滞留设施垂直结构为:200 mm蓄水层(含50 mm树皮覆盖层)、600 mm换土层(300 mm种植土层、300 mm填料层)、隔离层(透水土工布)、300 mm砾石层(含 $\phi 110$  mm PVC管)。为了获取可靠的生物滞留设施底部的深层渗漏量,依据实际的生物滞留设施布设环境,将其下方厚度为400 mm的原状土层也纳入实验监测对象,生物滞留设施的剖面结构见图1。

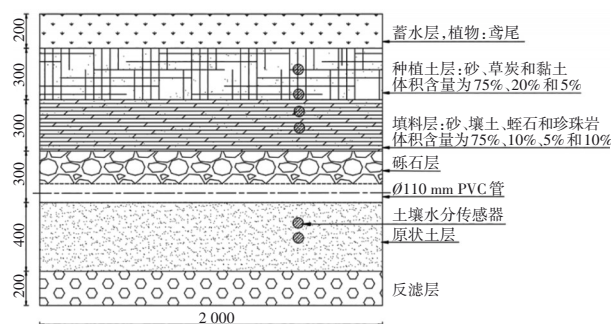


图1 生物滞留设施剖面结构

Fig.1 Section structure of bioretention facility

该生物滞留设施收集旁边面积为21 m<sup>2</sup>凉亭屋面的雨水径流,由于生物滞留设施面积过小可能会导致蒸渗仪称重箱存在明显的边界效应,干扰正常的土壤水分运移路径,从而影响监测精度。故综合考虑后,最终确定布设于蒸渗仪上的生物滞留设施的面积为4 m<sup>2</sup>。

1.2 水文过程监测

生物滞留设施需监测的水文要素包括:降雨、蓄水层蓄水、砾石层出流、土壤水、深层渗漏。其中,降雨通过 HOBO RX3003 小型气象站监测,气象站由数据采集器和气象传感器组成,能实现对降雨、风速、温度、湿度等气象要素的监测;在生物滞留设施的蓄水层安放一个压力式水位计用于监测蓄水过程,水位计不受外界气压变化及气象要素变化的影响,能对水位与温度进行测量;土壤含水量通过蒸渗仪的称重系统进行监测,为充分反映土壤水变化过程,识别土壤层含水量变化规律,在距离土面 100、250、350、450、1 000 和 1 100 mm 处均布设一个 5TE 传感器监测土壤含水量,此外,传感器还可用于测定电导率和温度;砾石层出流和深层渗漏均通过翻斗流量计测量。在砾石层安装一根穿孔管,使得砾石层的水可以从铁箱的开孔流出,并通过管道与翻斗相连(翻斗翻转一次,形成一次脉冲,电脑记录一次数据);同理,在铁箱反滤层底部也开了一个孔,通过管道与翻斗相连,使得深层渗漏的水排出并进行记录。

1.3 监测数据处理

1.3.1 降雨量

降雨是生物滞留设施水循环过程的主要输入项。HOBO RX3003 小型气象站每间隔 30 min 记录一次数据,为便于进行设施的水量平衡分析,降雨量采用日降雨量进行统计。

1.3.2 砾石层出流和深层渗漏

砾石层出流和深层渗漏均通过翻斗流量计监测,翻斗的容积为 0.08 L,砾石层出流量和深层渗漏量的计算公式为:

$$h_{出流} = n_1 V / S \tag{1}$$

$$h_{渗漏} = n_2 V / S \tag{2}$$

式中: $h_{出流}$ 、 $h_{渗漏}$  分别为砾石层出流量、深层渗漏量,mm; $n_1$ 、 $n_2$  分别为监测砾石层出流、深层渗漏的翻斗流量计翻转次数; $V$  为翻斗容积,L; $S$  为生物滞留设施面积,m<sup>2</sup>。

1.3.3 土壤水分

土壤水分通过蒸渗仪的称重系统测得,称重系统每 0.5 h 记录一次数据。计算公式为:

$$d = 1\,000 (W_t - W_{t_0}) / (S \times \rho) \tag{3}$$

式中: $d$  为土壤水分,mm; $W_t$ 、 $W_{t_0}$  分别为最后和

初始时刻的土体水分质量,kg; $S$  为透水铺装面积,m<sup>2</sup>; $\rho$  为水的密度,kg/m<sup>3</sup>。

2 结果与讨论

2.1 降雨与入流数据分析

监测时间段为 2020 年 5 月 1 日—7 月 30 日,共 91 d。其间有效降雨天数为 24 d,降雨总量为 191.60 mm,生物滞留设施的降雨参数见表 1。根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012),以 24 h 划分,大雨 2 场、中雨 4 场、小雨 22 场。按月份划分,5 月降雨量为 38.60 mm,包括小雨 5 场、中雨 2 场;6 月降雨量为 18.40 mm,包括 6 场小雨;7 月降雨量为 68.80 mm,包括小雨 7 场、中雨和大雨各 1 场。

表 1 生物滞留设施监测时间段的降雨参数

Tab.1 Rainfall parameters of bioretention facility during monitoring period

项 目	降雨量/ mm	汇水面入 流量/mm	设施入流 总量/mm	降雨等 级
2020-05-04	0.40	1.89	2.29	小雨
2020-05-08	10.00	47.25	57.25	中雨
2020-05-20	7.20	34.02	41.22	小雨
2020-05-21	13.80	65.21	79.01	中雨
2020-05-23	2.40	11.34	13.74	小雨
2020-05-25	1.00	4.73	5.73	小雨
2020-05-31	3.80	17.96	21.76	小雨
2020-06-01	0.60	2.84	3.44	小雨
2020-06-10	1.40	6.62	8.02	小雨
2020-06-18	0.40	1.89	2.29	小雨
2020-06-23	0.20	0.95	1.15	小雨
2020-06-24	9.00	42.53	51.53	小雨
2020-06-25	6.80	32.13	38.93	小雨
2020-07-02	7.60	35.91	43.51	小雨
2020-07-03	21.80	103.01	124.81	中雨
2020-07-06	0.20	0.95	1.15	小雨
2020-07-09	26.00	122.85	148.85	大雨
2020-07-10	2.60	12.29	14.89	小雨
2020-07-12	44.00	207.90	251.90	大雨
2020-07-13	0.20	0.95	1.15	小雨
2020-07-17	17.00	80.33	97.33	中雨
2020-07-18	8.00	37.80	45.80	小雨
2020-07-26	4.60	21.74	26.34	小雨
2020-07-27	2.60	12.29	14.89	小雨
合计	191.60	905.38	1 096.98	

生物滞留设施的水量输入项为直接落在设施内的降雨量和汇水面入流量,两项之和为设施的入流总量(为便于进行设施的水量平衡分析,入流总



量换算为生物滞留设施单位面积径流深度)。根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006),屋面的径流系数为 0.85~0.95,本研究取 0.90。因此,监测时段内设施的入流总量为 1 096.98 mm,包括直接落在设施内的降雨量 191.60 mm 与汇水面入流量 905.38 mm。

2.2 水量平衡分析

基于监测数据,监测时段内生物滞留设施入流总量为 1 096.98 mm,深层渗漏总量为 390.04 mm,土壤水分减少 7.04 mm,砾石层出流量为 0.20 mm,蒸散发总量为 713.72 mm。因此,生物滞留设施在监测时段内的深层渗漏量、蒸散发量、砾石层出流量占水分损失总量的比例分别为 35.33%、64.65%和 0.02%。

按月进一步分析,各月水量平衡分析如表 2 所示。5 月份生物滞留设施的深层渗漏量和蒸散发量占水分损失总量的比例分别为 26.65%、73.35%。6 月份进入汛期,即使有适量降雨,但降雨仍较少,同时受到气温升高、蒸散发量显著增加的影响,土壤水分呈明显减少趋势,因此,6 月份生物滞留设施的深层渗漏量和蒸散发量占水分损失总量的比例分别为 4.64%和 95.36%。7 月份降雨量较大,入流总量达到 770.59 mm,生物滞留设施的深层渗漏量、蒸散发量和砾石层出流量占水分损失总量的比例分别为 43.15%、56.82%和 0.03%。这是由于 7 月份气温较高,生物滞留设施的蒸散发能力强,同时充足的水分条件使得实际蒸散发量显著增加。

表 2 水量平衡分析  
Tab.2 Water balance analysis mm

项目	降雨量	入流量	深层渗漏量	砾石层出流量	蓄水层蓄水量	土体水分变化量	蒸散发量	日均蒸散发量
5 月	38.60	182.40	56.78	0	0	7.90	156.31	5.04
6 月	18.40	86.96	6.16	0	0	-27.46	126.64	4.22
7 月	134.60	636.02	327.10	0.20	0	12.52	430.77	14.36
合计	191.60	905.38	390.04	0.20	0	-7.04	713.72	7.84

2.3 土壤含水量变化过程分析

生物滞留设施种植土层、填料层和原状土层的土壤含水量分别介于 0.081~0.388、0.104~0.316、0.139~0.315 之间。种植土层的土壤含水量最大值出现在 7 月 3 日,对应降雨量为 21.80 mm;填料层与原状土层的土壤含水量最大值出现在 7 月 12 日,对

应的降雨量为 44.00 mm。监测时段土壤含水量的变化情况如图 2 和表 3 所示。

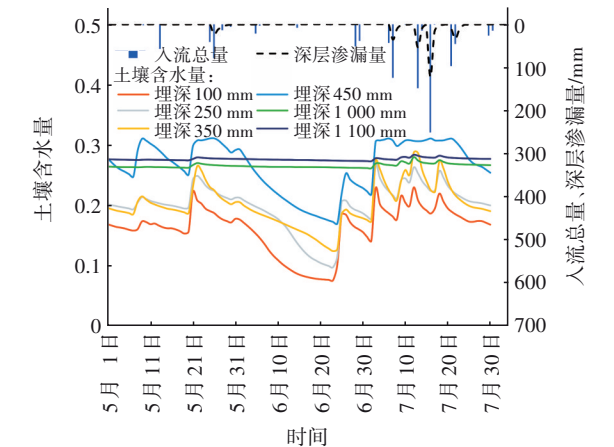


图 2 土壤含水量变化过程  
Fig.2 Change process of soil moisture content

表 3 各月各层土壤含水量特征值  
Tab.3 Characteristic values of soil moisture content in each layer of each month

项 目		埋深/mm					
		100	250	350	450	1 000	1 100
5 月	最小值	0.145	0.191	0.184	0.245	0.260	0.272
	平均值	0.171	0.209	0.205	0.284	0.264	0.275
	最大值	0.329	0.301	0.291	0.311	0.289	0.287
6 月	最小值	0.073	0.093	0.118	0.167	0.261	0.272
	平均值	0.121	0.161	0.167	0.218	0.262	0.274
	最大值	0.254	0.219	0.207	0.295	0.264	0.276
7 月	最小值	0.137	0.175	0.171	0.216	0.260	0.271
	平均值	0.188	0.224	0.227	0.291	0.268	0.277
	最大值	0.431	0.328	0.293	0.311	0.307	0.292

监测结果表明,土壤含水量的分层效果明显。位于种植土层和填料层的 4 层土壤含水量变化趋势大致相同,分别介于 0.073~0.431、0.093~0.328、0.118~0.293 和 0.167~0.311 之间,这主要由于填料入渗性能好,土壤含水量与降雨的相关性显著。位于原状土层的 2 层土壤含水量变化不大,且土壤含水量变化趋势一致,分别介于 0.260~0.307 和 0.272~0.292 之间,这主要是由于该层埋深较大且砂石含量较高,其入渗能力较好。由于生物滞留设施入渗量显著增加,土壤含水量随着埋深的增加而增加;而当埋深较大时,土壤含水量对地面降雨的相应敏感度迅速降低,底部原状土层(距生物滞留设施土面 1 000 mm 和 1 100 mm)的土壤含水量基本保持稳定,随降雨变化不明显,基本处于饱和状态。

### 3 结论

① 根据水文监测结果,生物滞留设施在监测时段内的深层渗漏量、蒸散发量和砾石层出流量占水分损失总量的比例分别为35.33%、64.65%和0.02%,可认为生物滞留设施的水分损失主要为蒸散发,生物滞留设施经包气带渗漏的水可补给地下水 and 有效减少降雨产流,起到削减径流、缓解城市热岛效应的作用。

② 根据土壤含水量的监测结果,生物滞留设施的渗透性能较好,土壤含水量分层效果明显。种植土层和填料层的土壤含水量变化趋势较一致,且与降雨过程一致性较好,而原状土层的土壤含水量随降雨变化不明显,基本处于饱和状态。

### 参考文献:

- [1] 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).
- [2] 潘俊奎,刘燕,屈昱安,等. 复合填料生物滞留设施对径流污染物去除效果[J]. 人民黄河, 2020, 42(8): 93-99.  
PAN Junkui, LIU Yan, QU Yu'an, *et al.* Removal effect of runoff pollutants by bioretention of composite filler [J]. Yellow River, 2020, 42(8): 93-99 (in Chinese).
- [3] 赵倩,许仕荣,周永潮,等. 生物质炭改良生物滞留系统去除氮素的试验研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(1): 96-101.  
ZHAO Qian, XU Shirong, ZHOU Yongchao, *et al.* Nitrogen removal by bioretention system modified with biochar [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(1): 96-101 (in Chinese).
- [4] 潘国艳,夏军,张翔,等. 生物滞留池水文效应的模拟试验研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 13-15.  
PAN Guoyan, XIA Jun, ZHANG Xiang, *et al.* Research on simulation test of hydrological effect of bio-retention units [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(5): 13-15 (in Chinese).
- [5] DAVIS A P. Field performance of bioretention: hydrology impacts [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(2): 90-95.
- [6] OLSZEWSKI J M, DAVIS A P. Comparing the hydrologic performance of a bioretention cell with predevelopment values [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2013, 139(2): 124-130.
- [7] 郭娉婷. 生物滞留设施生态水文效应研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2015.  
GUO Pingting. Eco-hydrological Effects of Bioretention Facility [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2015 (in Chinese).
- [8] 许目瑶,罗纨,贾忠华,等. 雨水花园集中入渗对非饱和土壤含水量和地下水的影响[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2020, 23(2): 63-68.  
XU Muyao, LUO Wan, JIA Zhonghua, *et al.* Influence of rainwater garden infiltration on water content in unsaturated soil and groundwater [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2020, 23(2): 63-68 (in Chinese).

作者简介:欧阳友(1997-),男,湖南郴州人,硕士研究生,研究方向为城市水文学。

E-mail:565737810@qq.com

收稿日期:2021-05-07

修回日期:2021-08-05

(编辑:刘贵春)