

雨水花园水力传导度的衰减过程及其防治措施研究

党振国¹, 蒋春博^{1,2}, 李怀恩^{1,2}, 汤海川¹, 饶茂邳¹, 宋凯歌¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 雨水花园通过“植物-土壤-微生物”的综合作用来渗透、净化雨水径流,但随着运行时间的延长,雨水花园填料堵塞会造成水力传导度降低,从而导致其运行寿命的衰减。以运行 10 a 的实例入渗型雨水花园及其周围常规绿地作为研究对象,通过对比二者消纳的污染总负荷、填料下渗率以及不同埋深填料的颗粒级配,研究雨水花园水力传导度衰减的影响因素。结果表明:雨水花园主要污染物 SS、TN、TP、COD 入流总负荷量分别为 544.51、21.55、1.65 和 514.50 g/m²,是常规绿地的 7~34 倍;现阶段,常规绿地的稳定下渗率是雨水花园的近 10 倍。从时间尺度上对比,雨水花园运行 10 a 后的稳定下渗率为 23.24 mm/h,与建成初期相比衰减达 5.2 倍;与常规绿地在空间尺度上对比,雨水花园填料埋深 0~50 cm 以内黏粒和粉粒的含量相对较高,埋深 50~100 cm 范围内雨水花园和常规绿地颗粒级配基本一致,表明雨水花园堵塞主要发生在填料埋深 0~50 cm 范围内。最后,结合降水条件和运行机制,提出了雨水花园堵塞防治措施。

关键词: 雨水花园; 常规绿地; 水力传导度; 衰减过程; 下渗率; 颗粒级配

中图分类号: TU985.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)06-0137-08

Hydraulic conductivity attenuation process of rain garden and its control measures

DANG Zhenguo¹, JIANG Chunbo^{1,2}, LI Huaen^{1,2}, TANG Haichuan¹, RAO Maozhi¹, SONG Kaige¹

(1. School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The rain garden infiltrates and purifies rainfall runoff through the comprehensive effect of “plant-soil-microorganism”; however, the clogging of fillers leads to the decrease of its hydraulic conductivity with the extension of operation time, resulting in the attenuation of the rain garden operation life. Taking the rain garden of infiltration type which has been operating for ten years and its surrounding conventional green space in Xi'an University of Technology as the research objects, we studied the influencing factors of the hydraulic conductivity attenuation of the rain garden by comparing the total pollution load of these two facilities, the infiltration rate of the fillers and the particle size distribution of different layers. The results showed that the main pollutants in the rain garden are SS, TN, TP and COD, and the total inflow loads are about 544.51, 21.55, 1.65 and 514.50 g/m², which are 7~34 times of those in the conventional green space. At present, the steady infiltration rate of the conventional green space is nearly 10 times of that of the rain garden. From the temporal perspective, the steady infiltration rate of the rain garden after 10 years of operation is 23.24 mm/h, which is 5.2 times lower than that in the initial stage of establishment. Compared with the conventional green space on vertical spatial scale, the content of clay and powder particles in the rain garden fillers with the buried depth of 0~50 cm are relatively high; whereas the particle size distribution of the two facilities buried deeper than 50 cm are basically the same, indicating that the phenomenon of clogging mainly occurred in the fillers with the buried depth of

收稿日期: 2022-05-06; 修回日期: 2022-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(52000150、51879215)

作者简介: 党振国(1996-), 男, 陕西延安人, 硕士研究生, 研究方向为水环境保护。

通讯作者: 蒋春博(1990-), 男, 陕西西安人, 博士, 讲师, 研究方向为城市雨洪管理与利用。

0–50 cm. Finally, the prevention and control measures of clogging are put forward, according to the precipitation conditions and operation mechanism of the rain garden.

Key words: rain garden; conventional green space; hydraulic conductivity; attenuation process; infiltration rate; particle size distribution

1 研究背景

城市雨水径流具有随机性、非连续性、污染波动大、难控性强等特点。雨水花园作为一种典型的雨水源头减排技术,能够极大地削减径流峰值、控制径流总量和径流污染,可有效缓解城市内涝与水资源短缺的矛盾。随着雨水花园运行时间的延长,来水水力与污染负荷、介质类型和特性、运维管理水平等因素均会影响设施运行效能,其中,填料堵塞是导致雨水花园水力传导度降低,使其逐渐失去径流调控能力的主要原因^[1-2]。

从宏观特性的变化来看,填料堵塞导致水力传导能力衰减的过程大致可以分为 3 个阶段:第 1 阶段渗透系数呈减小趋势,但与初始渗透系数相差不大;第 2 阶段堵塞物开始积累,渗透系数大幅减小;第 3 阶段出现明显堵塞现象,渗透系数的减小趋于平缓^[3]。引起雨水花园填料堵塞的原因比较复杂,植物、微生物、有机质含量等均会在不同程度上对其造成影响,在不同的水力负荷下,雨水花园的处理能力也不同。借鉴类似生态处理系统研究结果,熊佐芳等^[4]认为较大和较小的水力负荷不容易引起人工湿地填料的堵塞,原因是高负荷下冲刷作用增强,可以延缓生物膜的生长速度,而低负荷进水中污染物含量较少;Guan 等^[5]研究发现高水力负荷下,土壤渗滤系统堵塞的风险较低;叶超等^[6]认为在进水水力负荷合理的情况下,人工湿地堵塞主要是由进水中的固体悬浮物(suspended solid, SS)和有机物等引起;单蓓蓓等^[7]通过在不同水动力条件下进行回灌试验得出:渗流速度越大,悬浮物运移造成的堵塞范围也越大,且悬浮物颗粒主要在填料表层沉积,对深部填料的渗透系数影响较小;Chazarenc 等^[8]研究发现,在人工湿地运行未达到平衡时,生物降解能力较弱,填料孔隙中堆积了大量有机物,使填料中微生物的活性增强,其分泌的大量胞外聚合物形成生物膜而造成填料堵塞。不同填料之间的差异性也会导致堵塞的发生,从而影响填料的水力传导能力。孔令伟等^[9]发现填料为砂土的渗滤系统中细粒含量的大小对其渗透系数影响很大;牟春梅等^[10]发现当软土填料中有机质的含量为 1.74% 时,其渗透性能最好。另外,进水以及填料中的部分阴阳离子在

填料孔隙中发生化学反应产生沉淀和胶体,这些生成物进一步絮凝会形成堵塞;填料中的微生物在系统表层增殖会大大减小填料的渗透系数,且随着微生物自身的生长繁殖,填料中的孔隙体积逐渐被占据也会造成堵塞。目前关于植物对填料堵塞的影响还存在不同的观点,有学者认为植物能够延缓堵塞,植物的根部可以疏通填料,为水流提供更大的网状空间,并且入流雨水中的有机物被植物根系吸收后能够促进植物的生长^[11-12]。有研究发现,植物根系仅占填料孔隙的 3.07%~4.11%,但能使填料的孔隙率普遍提高 3%~44%^[13-14]。但是,植物残屑会导致填料表层堵塞,而且植物根部腐烂后会产生大量有机物导致堵塞。Hua 等^[15]认为,早期阶段植物的根系会限制水流,后期根系的生长又会在填料中打开新的孔隙提高渗透系数。

填料作为雨水花园和人工湿地最重要的组成部分,二者的共同点是植物的生长提供载体和营养物质,为微生物的生长提供稳定的生存环境,通过截留、吸附等理化作用去除污染物,其构成组分都是以土砂等天然材料为主,同时添加一定比例的改良剂。但两者之间也存在明显差异:在运行方式上,人工湿地长期处于水生状态,而雨水花园属于干湿交替运行;在来水水量和水质上,人工湿地主要处理生活污水、垃圾渗滤液等,水力负荷相对稳定但污染浓度大,而雨水花园用于源头雨水的径流调控,水力及污染负荷随机性强、波动性大;在设施结构上,人工湿地分为水平流、垂向流、复合流等,雨水花园一般为垂向流。因此,两者在填料配制、植物选择等方面存在明显差异,雨水花园主要选用一些孔隙率高、有利于雨水快速下渗的改良剂。目前对雨水花园的研究缺乏长期实际运行数据对其下渗能力的定量表征,本研究对已运行 10 a 的实例雨水花园及其周围常规绿地的来水负荷、水力传导度和纵向颗粒级配进行了测定和对比分析,旨在明确雨水花园水力传导度的衰减过程,从而制定有效的防治措施。

2 研究对象与方法

2.1 研究区域概况

研究区域位于黄河流域中部的关中盆地,属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,年平均气温

为 13.0 ~ 13.7 ℃,年降水量为 522.4 ~ 719.5 mm。研究对象为西安理工大学校内入渗型雨水花园,建成于 2011 年,花园内填充天然土壤,主要用于处理与其相邻的楼屋面径流雨水,以入渗为主。雨水花园种植土深度为 20 cm,面积为 30.24 m²,汇流面积为 604.7 m²,汇流比为 20:1。园内种植月季、南天竹、荷兰菊和三叶草等植物。周围平台为种植三叶草的常规绿地,面积约 39.8 m²,接收直接降雨。该雨水花园与周围常规绿地平面布置及雨水花园结构如图 1、2 所示。

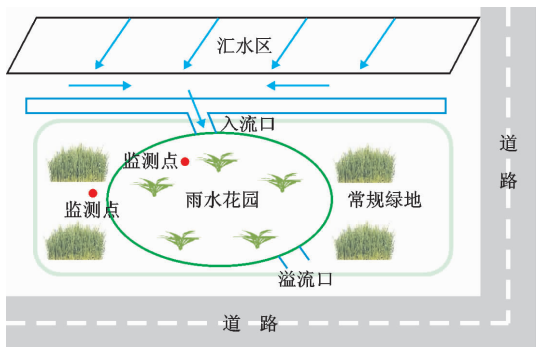


图 1 雨水花园与周围常规绿地平面布置示意图

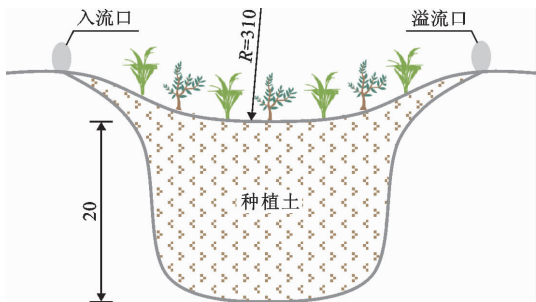


图 2 入渗型雨水花园结构示意图(单位:cm)

2.2 试验设备与研究方法

监测仪器主要有小型气象站、液位计、单环入渗仪等。本研究中,进水和溢流水量采用薄壁三角堰进行监测和计算,水量计算方法如公式(1)、(2)。

$$Q = \frac{8}{15}\mu \cdot \text{tg} \frac{\theta}{2} \cdot \sqrt{2gh}^{\frac{5}{2}} \tag{1}$$

$$V = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \Delta t_i \tag{2}$$

式中: Q 为三角堰流量, m³/s; μ 为流量系数,取值为 0.6; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; θ 为三角堰堰口夹角, (°); h 为三角堰的几何水头, m; V 为入流或溢流量, m³; Q_i 为第 i 时段的入流或溢流流量, m³/s; Δt_i 为第 i 监测时段的时长, s。

自三角堰产生入流开始采集第 1 个水质样品, 后续按照 5、5、10、10、30、30 min 的时间序列采集,

单个样品体积为 500 mL,于 4 ℃ 下保存,24 h 内检测完毕。水质常规监测及检测指标主要包括 TN、溶解性 TP、NO₃—N、NH₃—N、COD、SS 等。分析方法如表 1 所示。分别统计课题组前期监测和近期补充监测的降雨类型、入流雨量、溢流场次,以及雨水花园来水、常规绿地接收直接降雨的总污染负荷量。

表 1 水质样品检测分析方法

序号	指标	检测方法
1	TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)
2	TP	钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)
3	NO ₃ —N	紫外分光光度法(HJ/T 346—2007)
4	NH ₃ —N	纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)
5	COD	快速消解分光光度法(HJ/T 399—2007)
6	SS	重量法(GB 11901—89)

2021 年 8 月 27 日,采用改进的单环入渗仪对雨水花园和常规绿地下渗特性进行监测,改进的单环入渗仪可提高内环水流的稳定性和入渗水量对水位的敏感性,保护内环地面不受水流冲刷,保证了测量精度。监测时雨前干旱期为 7 d,雨水花园监测点选择入流口附近,常规绿地监测点选择与雨水花园相邻位置(图 1),每个测试点位监测 3 次,取其平均值。试验设备由单环入渗仪、马氏瓶、辅助设施组成,如图 3 所示。

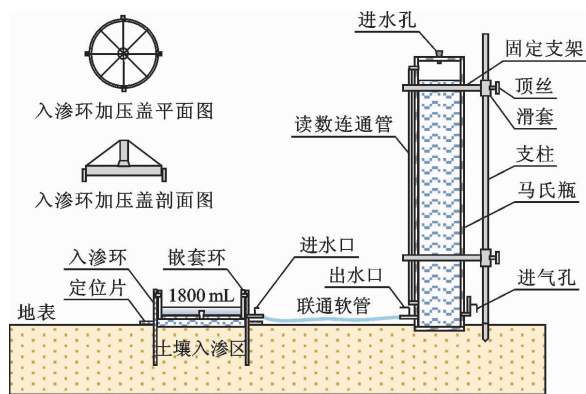


图 3 单环入渗仪示意图

入渗环内径、外径、环高分别为 28、30、20 cm,其中 10 cm 埋入地下,10 cm 露出地面。试验开始前,根据设定的人渗水头,计算得到内环所需要的初始水量。入渗开始时每 1 min 测读 1 次,10 min 后每 2 min 测读 1 次,1 h 后每 5 min 测读 1 次,当试验至马氏瓶中的单位时间供水量稳定不变时,试验停止。根据入渗时间以及马氏瓶水面的下降高度,采

用公式(3)、(4)计算进入土壤的水量以及近似的饱和导水率,可获得雨水花园和常规绿地的初始、稳定下渗率,通过与运行初期下渗率对比可直观反映雨水花园水力传导能力的衰减程度。

$$Q_t = \pi R^2 (H_0 - H_t) \quad (3)$$

$$K = \frac{Q}{A\Delta t} \quad (4)$$

式中: Q_t 为 t 分钟内进入内环土壤的水量, cm^3 ; K 为下渗速率, cm/min ; R 为马氏瓶半径, cm ; H_0 为初始马氏瓶水面读数, cm ; H_t 为各时间间隔马氏瓶的水面读数, cm ; Δt 为入渗时段, min ; A 为内环的横截面积, cm^2 。

雨前干旱期在雨水花园汇流区域 $1\text{ m} \times 6\text{ m}$ 范围内收集堵塞颗粒物,充分混匀,作为雨水汇集区的代表样品。其具体步骤为:使用荷兰钻原装土壤采样器对雨水花园以及常规绿地从上到下 10 cm 等间隔进行垂向取样,取样总深度为 100 cm 。共取 10 个土样。土样风干后平摊去除杂质,轻轻碾压后过 2 mm 筛,用马尔文 MS2000 激光粒度分析仪湿法测量土样粒径,根据国际制土壤粒级划分标准比较不同土样中黏粒、粉粒、砂粒的含量百分比,探求堵塞主要发生的深度。

3 结果分析与讨论

3.1 污染总负荷量累积统计分析

根据研究区 2011–2021 年的 85 场降雨和入流数据以及西安市净雨数据^[16],统计出雨水花园和常规绿地该 10 年间小雨、中雨、大雨、暴雨的场次分别为 25、32、24、4,年平均降雨量为 648.1 mm ,其中雨水花园产生溢流的共 9 场次,该 9 场次降雨的特征值见表 2(统计年限为 2011 年 5 月至 2021 年 9 月)。雨水花园入流雨水水质监测主要以自产生入流 2 h 内的初期径流雨水为主,降雨总量前 20% 的初期雨水,可削减污染物总量的 40%~60%^[17],因此根据初期雨水的水质水量特征及其变化规律,推算雨水花园收纳的污染负荷总量。而常规绿地接收直接降雨,水质污染波动不大,因此根据净雨水水质特征确定其收纳的污染负荷总量。各水质指标特征值如表 3 所示。

由表 2 可知,2011–2021 年小雨、中雨、大雨分布较均匀,极端降雨比较罕见。雨水花园运行 10 a 期间共发生 9 次短暂溢流,平均径流削减率为 97.8%,主要原因为本文中雨水花园的填料为西北地区典型黄土土质,具有发育良好的管状空隙,孔隙

度较高,当 60 min 最大雨强 $\geq 11\text{ mm}$ 时,才有可能发生溢流^[18]。对比表 3 中雨水花园和常规绿地单位面积收纳的污染总负荷统计结果可以看出,雨水花园运行 10 年收纳的各类污染物质均大于常规绿地,其中主要污染物:COD 相差 25 倍,TN 相差 7 倍,TP 相差 24 倍,SS 相差 34 倍。这是由于研究区降雨高峰期多集中在 7–9 月份,且多为短历时强降雨,干旱期间,雨水花园汇流区域污染物不断累积,降雨时,累积污染物随着径流被冲入雨水花园。而常规绿地仅接收直接降雨,且校园周边无工业区,降雨水质较好,因此造成雨水花园收纳的污染负荷总量远大于常规绿地。长时间运行下,大量污染物在填料中不断累积造成堵塞,因此导致雨水花园填料水力传导能力的衰减程度大于常规绿地。

表 2 2011–2021 年研究区雨水花园产生溢流的 9 场降雨特征值

降雨日期	降雨量/mm	60 min 最大雨强(mm/h)
2013-05-28	36.4	13.8
2013-06-08	47.8	21.0
2013-07-28	35.2	31.8
2014-07-22	44.6	30.6
2016-06-23	39.9	11.0
2016-07-24	55.5	46.8
2017-08-07	36.6	18.0
2018-08-09	33.2	30.0
2019-08-26	36.8	18.4

3.2 下渗率监测结果对比分析

对于填料而言,下渗率能直观地反映其水力传导能力以及堵塞程度。根据单环入渗仪监测数据计算出雨水花园和常规绿地不同时刻的填料入渗量以及下渗率,绘制填料入渗量及下渗率与时间的关系曲线,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,雨水花园和常规绿地的填料入渗量和下渗速率的变化趋势基本相同。入渗开始时,雨水花园与常规绿地的填料入渗量和下渗速率相差很小,但雨水花园的填料入渗量和下渗速率在短时间内大幅减小,而常规绿地的填料入渗量和下渗速率减幅较小,随后二者的填料入渗量和下渗速率开始缓慢衰减,入渗 30 min 后雨水花园和常规绿地的下渗速率基本稳定,其平均值分别为 23.24 和 $216.64\text{ mm}/\text{h}$,二者相差近 10 倍。出现这种现象是因为入渗初始阶段,二者填料表层都比较干燥,此阶

段起主要作用的是填料吸力;另一方面,可利用的填料孔隙在初始阶段较多。入渗稳定以后,填料吸力作用消失,可利用的填料孔隙减少,并且由于雨水花园收纳的污染负荷总量远大于常规绿地,污染物在填料中大量累积形成堵塞,造成雨水花园和常规绿地的稳定下渗速率出现很大的差别。2011 - 2015 年,唐双成^[19]对本文所研究的雨水花园的下渗率进行了长序列监测,得出 2011 - 2015 年每年的下渗率均值分别为 97.8、92.4、102.6、93.6、94.8 mm/h,可见该雨水花园运行前 5 a 的下渗率较为稳定,运行效果良好。但雨水花园运行 10 a 后的下渗率与建

成初期相比衰减达 5.2 倍。综合目前雨水花园下渗能力与其建成初期和常规绿地的对比结果可以发现,该入渗型雨水花园已经发生较为严重的堵塞。

3.3 土壤分层颗粒级配分析

造成雨水花园填料水力传导能力衰减的物理原因主要是入流雨水携带大量颗粒污染物进入雨水花园而造成堵塞,颗粒污染物粒径的大小对堵塞的形成有直接影响。通过马尔文 MS2000 激光粒度分析仪对样品分析后得到汇流区域颗粒物的砂粒含量占比在 70% 以上,对雨水花园和常规绿地不同深度的填料颗粒级配进行统计对比,结果如图 5 所示。

表 3 雨水花园和常规绿地入流雨水监测各水质指标特征值

监测对象	特征值	COD	TN	TP	SS	NO ₃ ⁻ —N	NH ₄ ⁺ —N
雨水花园	最小值/(mg·L ⁻¹)	15.90	0.75	0.13	24.30	0.40	0.45
	最大值/(mg·L ⁻¹)	169.90	9.12	0.63	260.80	2.39	7.94
	平均值/(mg·L ⁻¹)	96.90	3.80	0.31	103.20	1.25	1.33
	总负荷量/(g·m ⁻²)	514.50	21.55	1.65	544.51	6.48	7.95
常规绿地	最小值/(mg·L ⁻¹)	22.51	1.43	0.03	3.58		1.23
	最大值/(mg·L ⁻¹)	45.07	7.40	0.15	18.26		3.43
	平均值/(mg·L ⁻¹)	31.30	4.76	0.11	24.50		2.72
	总负荷量/(g·m ⁻²)	20.30	3.09	0.07	15.88		1.76

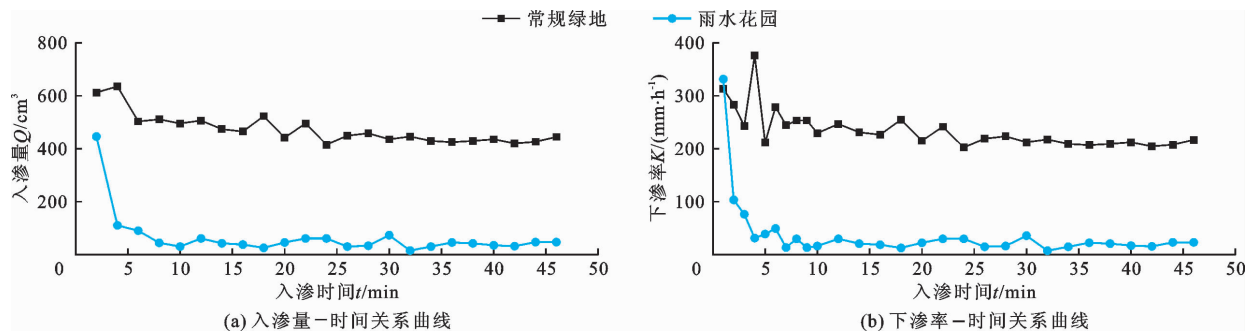


图 4 雨水花园和常规绿地的填料入渗量、下渗率与时间的关系曲线

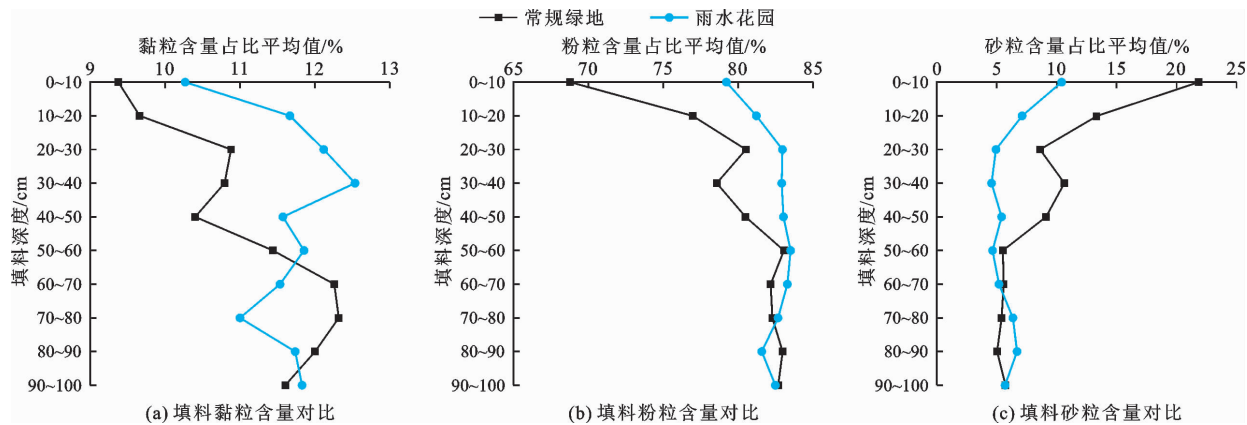


图 5 雨水花园与常规绿地不同深度填料各组颗粒含量对比

由图 5 可以看出,在填料埋深 0 ~ 50 cm 范围内,雨水花园黏粒和粉粒含量占比的平均值均大于常规绿地,而砂粒含量占比的平均值小于常规绿地。这可能是因为雨水花园中种植着根系发达的万寿菊等植物,其根系深度可达 30 ~ 40 cm,对填料的渗透性能有明显的改善作用^[20]。在降雨初期,汇流区域的大颗粒污染物被径流雨水冲入雨水花园并在填料孔隙和植物根系孔隙中迁移,由于填料上层含有大量溶解氧,微生物生命活动能力强,使大颗粒污染物被分解,造成雨水花园填料黏粒和粉粒含量较大,并且微生物分泌的胞外聚合物形成生物膜附着在填料表面,造成填料孔隙减少;常规绿地的表层是较为稀疏的草地,无根系发达的植物,大颗粒污染物累积在填料表面,从而导致常规绿地上层砂粒含量占比大于雨水花园。在填料埋深 50 ~ 100 cm 范围内,雨水花园和常规绿地黏、粉、砂粒含量占比平均值基本一致。

对雨水花园不同埋深的填料颗粒级配结果进行

对比分析可知,在埋深 0 ~ 40 cm 范围内,雨水花园填料的黏粒和粉粒含量在逐渐增加,砂粒含量在逐渐减少。这与上述分析的微生物生命活动以及根系结构有密切关系。填料埋深 40 cm 以下,由于植物根系无法继续延伸,溶解氧含量减少,基本处于缺氧状态,微生物生命活动变弱^[21],颗粒污染物随着水流迁移的能力也在减弱,因此这部分填料中各组分颗粒含量保持稳定。由此可以得出,颗粒污染物对深层填料的影响较小,雨水花园堵塞主要发生在埋深 0 ~ 50 cm 范围内。

3.4 填料堵塞机理及防治措施

目前国内外学者根据填料堵塞的原因将堵塞类型大致分为物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞 3 大类,但针对雨水花园填料堵塞的防治措施研究的较少,因此根据雨水花园自身的特点,结合人工湿地以及地下水回灌填料堵塞防治措施,提出一些针对雨水花园堵塞的防治措施,如表 4 所示。

表 4 雨水花园填料不同堵塞类型的形成机理及相应的防治措施

堵塞类型与机理	评估方法	预防措施	修复措施
物理堵塞:入流雨水中大于 50 μm 的悬浮物颗粒经絮凝吸附后形成大颗粒堵塞填料孔隙;长期浸水下,颗粒污染物分解变成黏土粒子形成水膜,堵塞填料 ^[22-23] 。	通过单环/双环入渗仪监测雨水花园不同运行阶段的下渗率,根据下渗率的衰减程度评估填料堵塞程度。	在雨水花园入口处设置沉淀槽、植草沟、截污挂篮等预处理设施。	定期更换表层填料或耙松填料表面,改善通透性 ^[31] 。
化学堵塞:阴阳离子在填料孔隙中发生反应产生沉淀和胶体,这些生成物进一步絮凝形成堵塞 ^[24] 。	运用数学模型 BIO - PORE 并基于系统的特点和运行条件,在不同的模拟中比较不同的模拟输出结果,评估堵塞程度 ^[27] 。	定期展开预防性检修和维修,如对进水出口进行清淤、及时补种或收割植物、清除植物残体。	投加营腐生生物,增大填料的孔隙度并分解有机物,恢复基质的渗透系数 ^[32-33] 。
生物堵塞:在环境的影响下,填料中微生物(以细菌为主)分泌过量的胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS),形成生物膜堵塞填料孔隙 ^[25-26] 。	向无膜微生物燃料电池中施加污泥负荷模拟堵塞,根据电子转移量的多少评估堵塞程度 ^[28] 。 运用时域诱发极化法将现场数据得到的三维归一化电荷层析图转换为堵塞百分比的三维分布,用来识别堵塞在过滤器中积聚的区域 ^[29] 。 采用高密度电阻法三维探测基质堵塞的垂向特征,识别堵塞发生的位置 ^[30] 。	选择比表面积大、通透性好、吸附能力强的改良剂(如堆肥、木屑、粉煤灰、建筑垃圾、给水厂污泥、生物炭等)添加到填料中,以优化填料的级配。 选择种植抗逆性强、耐粗放管理、净化效果好、美观且成活率高的植物。	投加助溶效果好的化学试剂抑制和溶解微生物产生的 EPS,缓解填料生物堵塞 ^[34-35] 。 采用电化学降解法,即利用微生物燃料电池电极表面富集的电化学活性菌对 EPS 进行降解以控制堵塞,将 EPS 作为双室 MFC 的阳极底物实现能源回收 ^[36] 。 利用超声处理,打破堵塞物质的疏松结构,减小颗粒物的粒径,减少堵塞物质的集中累积,增加堵塞物质中有机物的溶出 ^[30] 。 在填料中添加轻质材料,利用轻质材料自身的浮动性来缓解填料的堵塞 ^[37] 。

由于人工湿地长期处于水生状态,因此针对人工湿地填料堵塞的修复还包括停机轮换和曝气措施,这些方法能够加快系统复氧,提高好氧微生物的活性,加速降解有机物,恢复填料通透性,但会耗费大量时间^[38]。雨水花园为干湿交替运行,形成天然的停机轮换,无需耗费大量的人力及物力。曝气主要是向来水中增加溶解氧,而雨水花园接收雨水具有不确定性,因此曝气方法不适用于雨水花园。目前,雨水花园研究中缓解堵塞的一个主要方法是向填料中添加改良剂,改良剂混合填料相比于纯土填料能够缓解基质的堵塞,延长雨水花园的使用寿命。

4 结论与展望

本研究通过监测雨水花园和常规绿地现阶段的填料下渗率,得到常规绿地的稳定下渗率是雨水花园的近10倍。对比雨水花园现阶段和建成初期的填料下渗率,发现现阶段下渗率相较建成初期衰减了5倍以上,这主要是由于雨水花园收纳汇流区域的雨水中含有大量污染物,其污染负荷总量远大于常规绿地收纳的污染负荷总量,长期运行下,填料不断吸附累积污染物造成堵塞,导致水力传导能力下降和下渗率减小。分析雨水花园和常规绿地填料不同埋深的颗粒级配,发现雨水花园埋深0~50 cm填料中黏粒和粉粒含量大于常规绿地,埋深50~100 cm填料中各组分颗粒含量基本相同,并且雨水花园埋深40 cm以内填料中黏粒和粉粒的含量在随深度逐渐增加,埋深40 cm以外各组分颗粒含量基本稳定,说明堵塞主要发生在埋深0~50 cm范围内。

本研究主要从填料的污染负荷总量、下渗率和颗粒级配3个方面进行分析,明确了雨水花园的堵塞程度及水力传导能力衰减的原因,后续还有待于进一步研究填料、微生物、植物等综合因素对系统堵塞影响的交互作用,并基于资源消耗、污染物释放和运行效益等指标,建立雨水花园全生命运行周期评估的量化方法。

参考文献:

- [1] 郭超,李家科,马越,等.雨水花园运行寿命分析与价值估算[J].环境科学学报,2018,38(11):4391-4399.
- [2] 赵亚乾,杨永哲,BABATUNDE A,等.以给水厂铝污泥为基质的人工湿地研发概述[J].中国给水排水,2015,31(11):124-130.
- [3] 张正.生物滞留系统堵塞成因分析及控制研究[D].南京:东南大学,2019.
- [4] 熊佐芳,周云新,洗萍,等.水力负荷对垂直流人工湿地堵塞影响研究[J].水处理技术,2011,37(7):34-36+44.
- [5] GUAN Yidong, ZHANG Yuan, ZHONG Chunni, et al. Effect of operating factors on the contaminants removal of a soil filter: Multi-soil-layering system [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 2679-2686.
- [6] 叶超,叶建锋,冯骞,等.人工湿地堵塞问题的机理探讨[J].净水技术,2012,31(4):43-48.
- [7] 单蓓蓓,郑西来,乔振基,等.人工回灌过程中含水介质物理堵塞的试验研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(10):97-101.
- [8] CHAZARENC F, MALTAIS - LANDRY G, TROESCH S, et al. Effect of loading rate on performance of constructed wetlands treating an anaerobic supernatant [J]. Water Science & Technology, 2007, 56(3): 23-29.
- [9] 孔令伟,李新明,田湖南.砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J].岩土力学,2011,32(S2):21-26+41.
- [10] 牟春梅,李佰锋.有机质含量对软土力学性质影响效应分析[J].水文地质工程地质,2008(3):42-46.
- [11] READ J, WEVILL T, FLETCHER T, et al. Variation among plant species in pollutant removal from stormwater in biofiltration systems [J]. Water Research, 2008, 42(4-5): 893-902.
- [12] KNOWLES P, DOTRO G, NIVALA J, et al. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(2): 99-112.
- [13] 王晟,徐祖信,李怀正,等.植物根系对垂直流人工湿地水力条件的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(4):519-524.
- [14] TEIXEIRA D L, DE MATOS A T, DE MATOS M P, et al. The influence of plant roots on the clogging process and the extractive capacity of nutrients/pollutants in horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2018, 120: 54-60.
- [15] HUA Guofen, ZHAO Zhiwei, KONG Jun, et al. Effects of plant roots on the hydraulic performance during the clogging process in mesocosm vertical flow constructed wetlands [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(22): 13017-13026.
- [16] 董雯,李怀恩,李家科.城市雨水径流水质演变过程监测与分析[J].环境科学,2013,34(2):561-569.
- [17] 冯伟,王建龙,车伍.不同地表雨水径流冲刷特性分析[J].环境工程学报,2012,6(3):817-822.
- [18] 郭超.雨水花园集中入渗对土壤和地下水影响的试验研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [19] 唐双成.海绵城市建设中小型绿色基础设施对雨洪径流的调控作用研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [20] 郝岩.基于生物滞留设施植物生理的生态性和基质堵塞影响研究[J].水处理技术,2011,37(7):34-36+44.

- 塞规律的功能性研究[D]. 北京:北京建筑大学,2020.
- [21] 袁瑜蔓. 城市雨水生物滞留池优化设计研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [22] WINTER K J, GOETZ D. The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands [J]. *Water Science & Technology*, 2003, 48(5): 9-14.
- [23] 张建, 邵长飞, 黄霞, 等. 污水土地处理工艺中的土壤堵塞问题[J]. *中国给水排水*, 2003, 19(3): 17-20.
- [24] NIVALA J, HOOS M B, CROSS C, et al. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1-3): 19-27.
- [25] CORBELLA C, GARCIA J, PUIGAGUT J. Microbial fuel cells for clogging assessment in constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569-570: 1060-1063.
- [26] BOANO F, RIZZO A, SAMSÓR, et al. Changes in bacteria composition and efficiency of constructed wetlands under sustained overloads: A modeling experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 1480-1487.
- [27] GARCIA - ARTIGAS R, HIMI M, REVIL A, et al. Time-domain induced polarization as a tool to image clogging in treatment wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138189.
- [28] DUFOUR D, LEUNG V, LÉVESQUE C M. Bacterial biofilm: Structure, function, and antimicrobial resistance [J]. *Endodontic Topics*, 2010, 22(1): 2-16.
- [29] TURON C, COMAS J, POCH M. Constructed wetland clogging: A proposal for the integration and reuse of existing knowledge [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(12): 1710-1718.
- [30] 刘华清. 人工湿地基质堵塞形成机制、作用效能及防治技术研究[D]. 济南:山东大学,2019.
- [31] 尚文, 杨永兴, 韩大勇, 等. 人工湿地基质堵塞问题及防治新技术研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(28): 13945-13947.
- [32] REN Yongzheng, GONG Qilong, ZHANG Tian, et al. Wavy subsurface flow and vertical flow constructed wetlands: Effects of aeration and wastewater composition on wetland clogging[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2015, 141(9): 04015018.
- [33] 衣学文. 蚯蚓在垂直流人工湿地中的防堵塞作用及其机制研究[D]. 上海:上海大学,2019.
- [34] LI Huaizheng Z, WANG Sheng, YE Jianfeng F, et al. A practical method for the restoration of clogged rural vertical subsurface flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment using earthworm[J]. *Water Science & Technology*, 2011, 63(2): 283-290.
- [35] CAO Yuan, LI Yue, REN Ling, et al. Bio-clogging mitigation in vertical subsurface flow constructed wetlands using rhamnolipids-citric acid compound [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426: 131278.
- [36] 李昂, 艾鹏, 林莉莉, 等. 人工湿地-微生物燃料电池耦合系统缓解生物堵塞试验研究[J]. *水生生物学报*, 2021, 45(1): 190-196.
- [37] 蔡梦. 浮动式垂直流人工湿地基质堵塞及解除模式研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.
- [38] 邵留, 徐祖信, 王晟, 等. 新型反硝化固体碳源释碳性能研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(8): 2323-2327.

