

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.07.019

改良型干植草沟对校园雨水径流污染的控制效果

付峥嵘¹, 姚家兴¹, 王冶², 胡润韬¹

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 深圳市粤通建设工程有限公司, 广东 深圳 518081)

摘要: 通过构建标准转输型植草沟(GS)和改良型干植草沟(MBS),结合羟基铝蛭石污泥颗粒填料,对植草沟在校园雨水径流污染控制方面的应用效果进行了实地监测和分析。结果显示,相比标准转输型植草沟,改良型干植草沟对雨水径流中TSS、COD、氮、磷等污染物的去除效果更显著;植草沟的出流位置不同,对污染物的去除效果和机制也不尽相同,上表面出流的GS与MBS对径流污染物的去除效果相当,净化机制主要为植被截留吸附和土壤下渗作用,而下渗管出流的MBS主要利用生物填料层的过滤、吸附、截留等作用去除径流污染物,去除效果更优。

关键词: 改良型干植草沟; 雨水径流; 脱氮除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0130-07

Performance of Modified Dry Grass Swale for Mitigating Campus Stormwater Runoff Pollution

FU Zheng-rong¹, YAO Jia-xing¹, WANG Ye², HU Run-tao¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;
2. Shenzhen Yuetong Construction Engineering Co. Ltd., Shenzhen 518081, China)

Abstract: In this study, the efficacy of grass swale in mitigating campus stormwater runoff pollution was systematically monitored and analyzed through establishing a standard transfer-type grass swale and a modified dry grass swale packing with hydroxy-aluminum vermiculite sludge particles. In comparison to the standard transfer-type grass swale, the modified dry grass swale demonstrated a markedly superior efficacy in removing total suspended solids (TSS), chemical oxygen demand (COD), nitrogen, phosphorus, and other pollutants from stormwater runoff. The pollutants removal performance and mechanism varied depending on the discharge positions within grass swale. The standard transfer-type grass swale and modified dry grass swale with upper surface outflow exhibited similar efficacy in mitigating runoff pollutants, primarily through vegetation adsorption and soil infiltration. Conversely, the modified dry grass swale with infiltration pipe outflow leveraged the capabilities such as filtration, adsorption, and interception of the biological packing layer to achieve superior pollutants removal performance.

Key words: modified dry grass swale; stormwater runoff; nitrogen and phosphorus removal

基金项目: 湖南省自然科学省市联合基金资助项目(2022JJ50060); 湖南省株洲市科技计划基金资助项目(2021-019、2020-022); 湖南省教育厅科研基金资助项目(20C0623)

通信作者: 王冶 E-mail: 1656489383@qq.com

植草沟作为一种重要的低影响开发(LID)措施,可以有效削减径流污染物,控制面源污染。目前已有研究者对植草沟的水质净化效能进行了较多研究^[1-4],但部分污染物的去除效果和一些举措还存在一定争论,影响植草沟水质净化效果的重要因素尚未形成广泛共识,不同构型的植草沟系统对不同污染物指标的去除效果也不尽相同。特别地,当进水负荷较低时,沉积在植草沟中的非结合性污染物通过再悬浮和流动过程汇入出水中,植草沟有成为污染物源头的潜在可能,同时需要注意,植草沟并不是一个封闭系统,外来污染进入也会影响其效能,因此进行有效的植草沟系统设计变得更具挑战性。笔者将羟基铝蛭石污泥颗粒填料与标准转输型植草沟相结合,下接下渗管,构建出改良型干植草沟,并以常规植草沟作为对照,构建台阶型生态植草沟系统,通过对不同构造的植草沟在不同降雨事件中的监测数据进行分析,比较其对TSS、COD、氮、磷等污染物的去除效果,进而探究不同构造植草沟的污染物去除效果与降雨特性之间的相关性,以及其对径流污染负荷的控制效果。

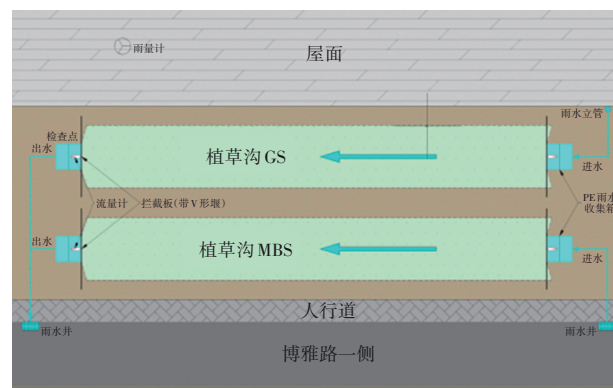
1 材料与方法

1.1 试验装置

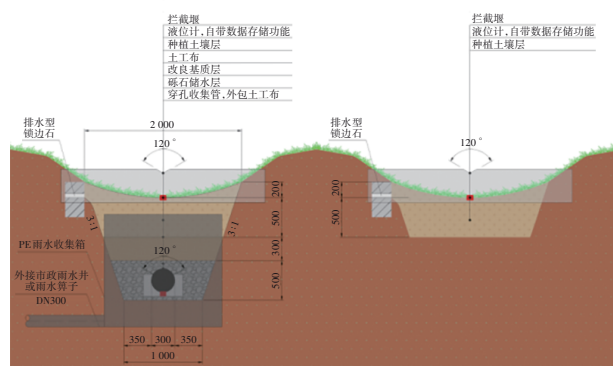
本研究中的标准转输型植草沟和改良型干植草沟(分别记作GS和MBS)位于湖南工业大学崇智楼与崇真楼之间,平面与断面概念图如图1所示。GS的汇水下垫面为博雅路混凝土路面,宽2 m、长15 m;MBS的汇水下垫面为崇真楼铺设防水卷材的混凝土屋面,宽10 m、长30 m。两者的服务面积均为300 m²,服务面积比均为6.7%。

两种植草沟沟体均采用梯形横断面形式,除了深度(GS和MBS的深度分别为0.3、1.5 m),其他尺寸基本一致:长度为10 m、顶部宽为2 m、底部宽为1 m、纵向坡度为1.38%、侧向坡比为3:1。两种植草沟系统均种植高羊茅、黑麦草和果岭草,每月定期清理沟中落叶并进行1次修剪,以保持植被层高度在10~30 cm之间。种植土壤层厚度为0.5 m,基质由原位土、营养土与细砂按照2:1:1的比例混合。GS未设置生物填料层与储水层,而MBS中增设了0.3 m厚的生物填料层,填充多层PU小球,PU小球内包裹有复合填料HAVSP(为羟基铝蛭石污泥颗粒)^[5],剩余空隙用木屑填满。此外,MBS在生物填

料层下设置0.5 m厚的砾石储水层,并配备直径为300 mm的排水管道,用于收集下渗雨水,开孔面积不低于5%的管表面积,管道外侧用透水土工布包裹以防止管孔堵塞。



a. 平面图



b. 断面图

图1 植草沟平面与断面概念图

Fig.1 Conceptual drawing of plan and section of swale

雨水径流经屋面的雨水立管和雨水井内建管道直接汇入植草沟,植草沟末端连接聚乙烯(PE)集水箱,作为植草沟出水口,并分别设置盒式溢流堰用于监测出水量和取水样。出水井外接市政雨水井或算子,过滤后的雨水可直接排入市政雨水管。

1.2 样品采集与检测

过程样:选取GS的进水口作为进水水质的监测点。同时,分别在GS的进水口、上出水口以及MBS的上、下出水口采集水样。降雨事件初期每隔5~10 min采集一次水样,后期采样时间间隔为30~60 min,具体间隔根据降雨强度大小而定。混合样:在单场降雨事件中,根据过程进、出水流量权重,以进、出水的过程水样配制得到进、出水混合样。监测指标中的重金属浓度由混合样测得。

水质分析指标包括:TSS、COD、TP、PO₄³⁻-P、溶

解性总磷(TDP)、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 等。其中,TSS采用0.45 μm 滤膜过滤法测定;COD采用快速消解分光光度法测定; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;TP和TDP采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用钼酸铵分光光度法测定。

1.3 数据分析方法

本研究中所有水质指标均通过对过程样的监测获得单场降雨事件的污染物事件平均浓度(EMC)。由于在经济和技术上均不可能实现连续水量、水质监测,实际的径流量和污染物浓度均为离散数据,通常污染物的EMC值采用下式计算:

$$\text{EMC} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i \Delta t}{\sum_{i=1}^n Q_i \Delta t} \quad (1)$$

式中: n 为整场降雨的采样次数; C_i 为第 i 次采样的污染物浓度, mg/L ; Q_i 为第 i 次采样的径流流量, L/s ; Δt 为采样时间间隔, s 。

2 结果与分析

2.1 对TSS和COD的去除效果

2.1.1 对TSS的去除效果

不同降雨事件中植草沟进水与出水TSS的EMC分布和去除效果如图2所示。可知,进水TSS浓度范围波动大,大体分布在70~400 mg/L 之间;GS与MBS上出水口的TSS浓度范围相似,大体分布在15~75 mg/L 之间;相比上出水口,MBS下出水口的TSS浓度范围大幅降低,分布在5~20 mg/L 之间。在上出水口,GS和MBS对TSS的去除率中值分别为71.92%和78.73%,平均去除率分别为68.21%和70.68%;而在MBS的下出水口,TSS去除率中值为94.13%,平均去除率为93.77%。

在上出水口,GS与MBS对TSS的去除率相当,这是因为两者对TSS的去除机制均为植被根茎、叶片的过滤与拦截作用以及颗粒物在沟体中的沉淀作用,上出水口设置的拦截堰起到了拦截坝的作用,延长了TSS在植草沟中的停留时间,上出水口的监测结果与已有研究结果接近^[6]。在下出水口,MBS表现出更高的TSS去除率,与GS出水口相比提升了15%~20%,原因是MBS中的部分出流通过下渗被双层结构吸附和过滤后,经外包透水土工布的

下渗管过滤后排出,TSS浓度会大幅度降低^[7],同时还避免了上排水口可能出现的沉淀颗粒物受径流冲刷再悬浮的问题。

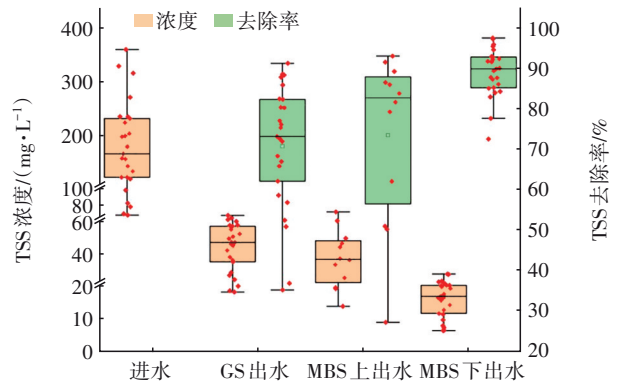


图2 进、出水中TSS的EMC和去除率分布

Fig.2 Distribution of EMC and removal rate of TSS in inflow and outflow

2.1.2 对COD的去除效果

不同降雨事件中植草沟进水与出水COD的EMC分布和去除效果如图3所示。

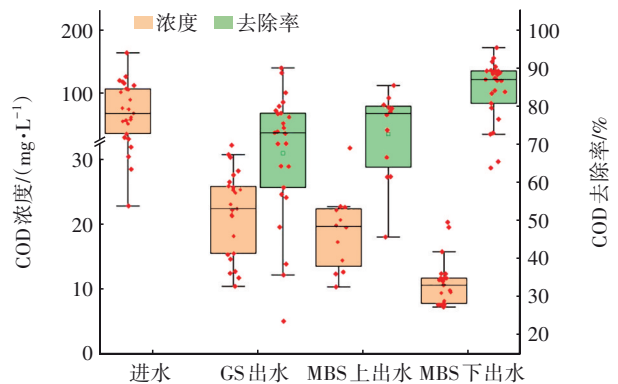


图3 进、出水中COD的EMC和去除率分布

Fig.3 Distribution of EMC and removal rate of COD in inflow and outflow

由图3可知,植草沟进水COD浓度范围为22~166 mg/L ,在上出水口,GS与MBS的COD浓度范围相似,基本在10~45 mg/L 之间,而在MBS的下出水口,COD浓度范围大幅降低,为6~20 mg/L 。在上出水口,GS与MBS对COD的去除效果并无显著差异,平均去除率分别为67.81%、73.74%,去除率中值分别为73.22%、78.55%;在下出水口,MBS对COD的平均去除率为84.98%,去除率中值为87.67%,表现出更优的去除效果。MBS下出水口COD能被较高效率地去除,是因为雨水在上出水口通过植被根茎、叶片的过滤与拦截作用以及颗粒物在植草沟中

的沉淀作用后,滞留在MBS的雨水又经过下渗和介质层的过滤,颗粒物中的COD被截留在MBS的种植土壤层中,下方改良基质层的PU球延长了水力停留时间,PU球包裹的改性污泥颗粒也能够吸附COD组分,从而实现了COD的高效去除。

雨水径流中TSS与COD之间的相关关系如图4所示。可知,对于监测到的降雨事件,雨水径流中的TSS与COD存在较为明显的正相关性($R^2=0.59$),说明径流中的COD较大部分以颗粒态形式存在。另外GS和MBS的(上、下)出流中,TSS与COD并不存在明显的正相关性,这是因为颗粒态的COD经植草沟的过滤与拦截作用后大幅减少,从而减弱了出水中TSS与COD的相关关系。

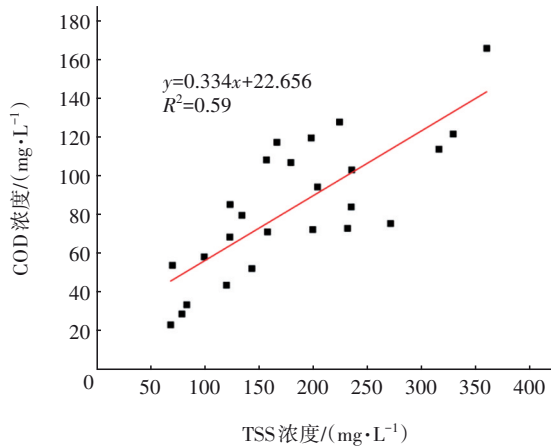


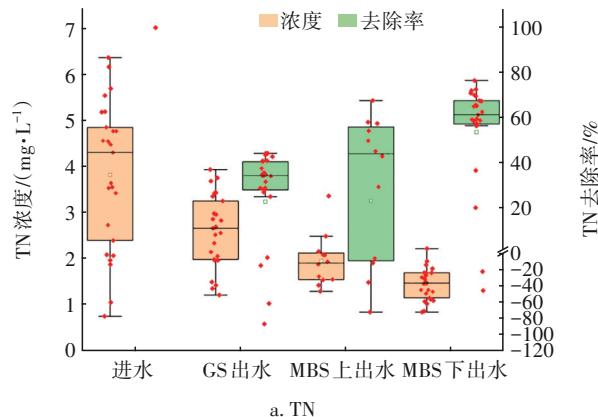
图4 雨水径流中TSS与COD的相关性

Fig.4 Correlation between TSS and COD in stormwater runoff

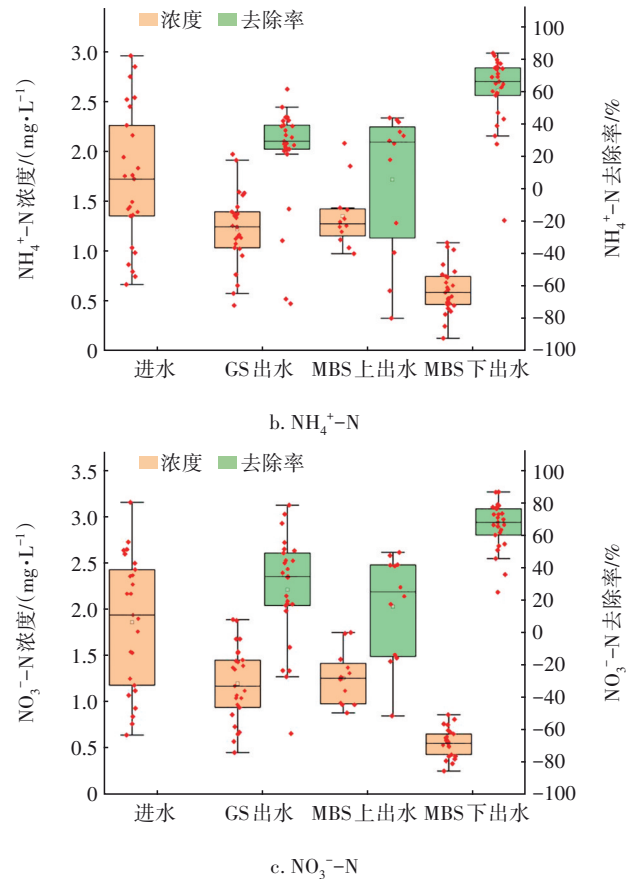
2.2 对氮、磷的去除效果

2.2.1 对氮的去除效果

在不同降雨事件中,两种植草沟对雨水径流中氮污染物的去除效果如图5所示。



a. TN



b. NH_4^+-N

c. NO_3^--N

图5 进、出水中氮污染物的EMC和去除率分布

Fig.5 Distribution of EMC and removal rate of nitrogen pollutants in inflow and outflow

由图5可知,植草沟进水TN浓度波动较大,为0.5~6.5 mg/L, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度范围相似,基本在0.5~3.5 mg/L之间。MBS下出水口中TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的EMC范围均最小,整体去除效果最好,GS与MBS的上出水口中TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的EMC范围相似。GS对TN的去除率均值为33.57%,去除率中值为36.09%。MBS上出水口的TN平均去除率比GS略高,为40.23%,去除率中值为46.83%,较GS更为优异,这是因为两者均在植草沟上部出水,污染物去除机理虽然大体相同,但MBS上排水口仅在历时较长、降雨量较大的降雨事件中产生出水,且出水发生在降雨中后期,出水中计算得到TN的EMC值整体偏低,去除率相应偏高,这种现象在 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和TP指标中均存在。MBS下出水口的TN平均去除率为70.13%,去除率中值为74.29%,MBS上、下出水口的TN去除效果相差较大,下出水口的TN去除效果显著提升。这是因为悬浮物中的非溶解态氮虽然能通过植草沟植

被根茎、叶片的过滤与拦截以及悬浮物沉淀作用得以去除,但非溶解态氮占比较少,而溶解态氮(NH_4^+-N 、 NO_3^--N)主要依赖土壤或生物填料中的硝化与反硝化作用得以去除。MBS中生物填料层与储水层的存在为反硝化过程提供了厌氧场所,具体体现在单个PU小球填入若干复合填料后,在降雨过程中形成了若干水封空间的厌氧环境,同时相邻PU小球间空隙填有的木屑也为反硝化菌提供了足够的碳源^[8-9],确保了硝化与反硝化反应进程,提高了反硝化效率。

由图5(b)和(c)可知,GS和MBS(上、下出水口)对 NO_3^--N 的去除率均值分别为29.46%、32.40%、73.13%,去除率中值分别为39.25%、41.95%、74.35%;对 NH_4^+-N 的去除率均值分别为21.89%、24.92%、64.04%,去除率中值分别为29.38%、36.69%、62.47%。整体而言,植草沟GS与MBS上出水口对 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的去除效果远低于MBS下出水口。

相关研究表明,传统转输型植草沟主要依靠渗透、植物吸收及生物化学作用去除径流中的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N ^[10]。由于径流在GS中的水力停留时间较短, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 无法在短时间内通过一系列生物化学作用被去除,导致去除效果受限;而MBS上出水口的出水为超过植草沟渗透能力后无法消纳的雨水,水质波动大,去除机制与GS相似,故 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的去除率也较低。在MBS中,雨水径流主要通过下渗进入储水层,生物填料层的过滤、吸附作用是 NH_4^+-N 的主要去除机制^[8],生物填料层中的改性污泥颗粒能够较好地吸附雨水径流中的 NH_4^+-N 。

GS和MBS上出水口对 NO_3^--N 的去除效果均较差,而MBS下出水口对 NO_3^--N 的去除效果较好。原因是带负电荷的土壤对 NO_3^--N 的吸附作用微弱,较短的水力停留时间不利于植物吸收作用和微生物生化反应,沟体表面无法形成去除 NO_3^--N 所需的厌氧空间;MBS下出水口出水水质较好,是因为MBS结合了生物滞留设施的滞留特性与厌氧环境,具体表现为30 cm厚的生物填料层添加了若干整齐排列的PU空心小球,小球中心添加有自主研发的改性污泥颗粒,小球间的空隙填有木屑,雨水径流在途径生物填料层中紧密排列的若干PU小球时,会形成一系列水封小室,创造出满足反硝化所需的

厌氧环境,生物填料层下方为50 cm的储水层,提供了雨水滞留空间,但MBS并未达到生物滞留设施较高的脱氮效率。

2.2.2 对磷的去除效果

不同降雨事件中植草沟进水与出水TP的EMC分布和去除效果如图6所示。可知,进水TP浓度范围为0.1~1.5 mg/L,GS与MBS上出水口的TP浓度范围大体相似,为0.1~0.4 mg/L,而MBS下出水口的TP浓度大幅降低,最高值仅为0.11 mg/L。GS和MBS(上、下出水口)对TP的去除率均值分别为23.80%、24.87%和71.76%,去除率中值分别为26.51%、25.63%和84.39%。两种植草沟对TP的去除率波动均较大,雨水径流中偏低的TP浓度在一定程度上影响了植草沟对TP的去除效果。

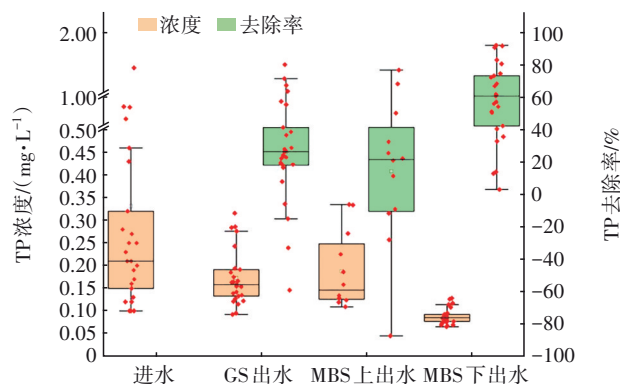


图6 进、出水中TP的EMC和去除率分布

Fig.6 Distribution of EMC and removal rate of TP in inflow and outflow

MBS下出水口的TP去除效果最优,这是因为TP主要以颗粒态的形式存在, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 等溶解态磷所占比例较小,磷的去除以填料吸附及物理沉淀为主,MBS下出水口的TP经过了双重去除过程,生物填料层提供的厌氧环境也有利于聚磷菌的生长繁殖,故TP去除效果明显优于GS和MBS上出水口。

另外发现,GS和MBS对TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和TP的去除率均出现了负值的情况,表明植草沟中氮、磷污染物出现了淋失现象。对出水中TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和TP的释放情况进行统计,具体对应5次历时较长、降雨量较大的强降雨事件,2种植草沟中氮、磷污染物的释放情况见表1。可以看出,在GS和MBS的上出水口分别出现了5次和3次磷淋失现象,磷的进水浓度对植草沟去除TP的效果存在明显影响。由图6可知,进水TP浓度越低,越容易出现

TP的淋失,随着进水TP浓度的增加,GS与MBS对TP的去除效果均有所提高。MBS的下出水口未检测到TP淋失现象,这是因为该出水口的出水已通过

前期沉淀作用和生物填料层的吸附截留作用对TP进行了有效去除,相关研究表明,生物填料层对雨水径流中颗粒态磷具有良好的过滤截留作用^[11]。

表1 植草沟中氮、磷污染物的释放情况

Tab.1 Release of nitrogen and phosphorus pollutants from swales

时间	降雨量/mm	降雨历时/h	进水体积/L	出现氮、磷释放的植草沟			
				TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP
2021-07-17	180.34	10.0	53 916.1	GS、MBS上	GS、MBS上	GS、MBS上	GS、MBS上
2021-08-08	27.48	11.6	8 210.2	MBS上	GS、MBS上	GS、MBS上	GS
2022-04-01	14.31	10.2	4 272.5	GS	GS、MBS上	GS、MBS上	GS、MBS上
2022-04-07	58.93	9.1	17 618.1	GS	GS、MBS上	GS、MBS上	GS、MBS上
2022-12-26	15.69	22.6	4 688.0	—	—	GS	GS

出现淋失现象一部分是因为长时间的降雨降低了进水污染物EMC值,导致污染物去除率降低甚至出现负值,另一部分是因为试验区域地处绿化区,长历时降雨过程中,植草沟中未及时清理的落叶可能成为氮元素的潜在释放源^[12]。由表1可知,这些出现氮、磷释放现象的降雨事件的降雨量均大于14 mm,降雨历时均超过9 h,植草沟进水量均超过4 000 L。较大的降雨量产生的径流量也大,对道路表面累积污染物的冲刷和稀释作用较为充分,使得降雨事件后期氮、磷污染物的进水浓度较低,降低了整场降雨事件进水污染物的EMC值。

选择8场两种植草沟均产生出流的降雨事件,对植草沟进出水中的颗粒态磷、TDP、PO₄³⁻-P浓度进行了测定。颗粒态磷浓度由TP浓度减去TDP浓度得到,除了PO₄³⁻-P之外的TDP记作TDDP,由TDP浓度减去PO₄³⁻-P浓度得到。结果表明,雨水径流中的TP主要以颗粒态的形式存在,PO₄³⁻-P等溶解态磷所占的比例较小。在植草沟进水中,颗粒态磷、TDDP、PO₄³⁻-P所占比例的平均值分别为71.8%、16.0%、12.2%,中值分别为76.2%、13.5%、14.3%。GS和MBS出水口中颗粒态磷所占比例与进水相比均有下降。GS出水口中颗粒态磷、TDDP、PO₄³⁻-P所占比例的平均值分别为56.5%、18.1%、25.4%,MBS上出水口中颗粒态磷、TDDP、PO₄³⁻-P所占比例的平均值分别为46.5%、37.0%、16.5%,MBS下出水口中颗粒态磷、TDDP、PO₄³⁻-P所占比例的平均值分别为21.1%、25.5%、53.3%。可以看出,GS和MBS上出水口中颗粒态磷所占比例降低的程度较小,溶解态磷所占比例略有提升;而MBS下出水口中颗粒态磷所占比例出现了明显的下降,使得溶解

态磷成为出水TP的主要存在形式。这说明MBS中的生态填料层对雨水径流中颗粒态磷具有较好的去除作用,使得MBS对TP的去除效果优于GS。

3 结论

① 监测期间,雨水径流中TSS、COD、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TP的EMC值分别为180.26、82.87、3.87、1.86、1.72、0.33 mg/L。植草沟GS和MBS对径流中TSS、COD均具有较高的去除率,GS对TSS和COD去除率的中值分别为71.92%和73.22%,MBS上出水口对TSS和COD的去除率中值分别为78.73%和78.55%,下出水口对TSS和COD的去除率中值分别为94.13%和87.67%。

② 植草沟GS和MBS上出水口对氮污染物的去除率波动较大,部分降雨事件中出现氮释放现象。GS对TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N的去除率中值分别为36.09%、29.38%、39.35%,MBS上出水口对TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N的去除率中值分别为46.83%、36.69%、41.95%;MBS下出水口的脱氮效果显著,对TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N的去除率中值分别为74.29%、62.47%、74.35%,原因是MBS中的生物填料层为硝化和反硝化过程提供了碳源和适宜的环境。

③ 植草沟GS和MBS对TP的去除均受进水浓度的影响,在低进水浓度下出现了磷释放现象,随着进水TP浓度的增加,GS和MBS对TP的去除效果有所提高。整个监测期间,GS和MBS上出水口对TP的平均去除率分别为23.80%和24.87%,而MBS下出水口对TP的平均去除率为71.76%,去除效果显著,这与MBS中生物填料层的吸附、储水层的厌氧环境以及下渗管密切相关。

④ 植草沟的出流位置不同,对污染物的去除机制也不尽相同。上表面出流的植草沟GS与MBS对径流中各污染物的去除效果相似,净化机制主要为植被截留吸附和土壤下渗作用,下渗管出流的MBS主要利用生物填料层的过滤、吸附、截留等作用去除径流污染物。

参考文献:

- [1] 戈鑫,杨云安,管运涛,等. 植草沟对苏南地区面源污染控制的案例研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(19): 134-138.
GE Xin, YANG Yun'an, GUAN Yuntao, *et al.* A case study on control of non-point source pollution by grassed swales in South Jiangsu [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 134-138 (in Chinese).
- [2] 张瑞斌. 2种生态植草沟对路面径流净化效果的对比[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 493-498.
ZHANG Ruibin. Comparison of the effect of two kinds of ecological grass swales on road runoff purification [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 493-498 (in Chinese).
- [3] 余鑫. 强化干式植草沟土壤基质层对道路雨水径流渗透净化作用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
YU Xin. Study on Infiltration and Purification of Road Rainwater Runoff by Strengthening Soil Substrate of Dry Grass Swales [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022(in Chinese).
- [4] 张佳炜,李田,张庭秀. 浅基质层干植草沟运行效果的现场实验[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4105-4112.
ZHANG Jiawei, LI Tian, ZHANG Tingxiu. Performance assessment of field-scale dry grass swale with shallow substrate layer[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4105-4112 (in Chinese).
- [5] 冉阳,付峥嵘,唐宁远,等. 羟基铝蛭石污泥对雨水中磷的吸附特性与机制[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(10): 113-120.
RAN Yang, FU Zhengrong, TANG Ningyuan, *et al.* Adsorption characteristics and mechanism of hydroxy aluminum vermiculite sludge on phosphorus in rainwater [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(10): 113-120 (in Chinese).
- [6] FARDEL A, PEYNEAU P E, BÉCHET B, *et al.* Analysis of swale factors implicated in pollutant removal efficiency using a swale database [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(2): 1287-1302.
- [7] SHETTY N H, HU R, MAILLOUX B J, *et al.* Studying the effect of bioswales on nutrient pollution in urban combined sewer systems [J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 944-958.
- [8] 冉阳,付峥嵘,马满英,等. 改良填料折流式生物滞留系统对雨水中氮磷削减的效果[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(5): 1484-1491.
RAN Yang, FU Zhengrong, MA Manying, *et al.* Effect of amended filler fold-flow bioretention system on nitrogen and phosphorus reduction in rainwater [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(5): 1484-1491 (in Chinese).
- [9] 冉阳,付峥嵘,唐宁远,等. 改良生物滞留系统强化对雨水径流中氮磷的去除[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(9): 49-57.
RAN Yang, FU Zhengrong, TANG Ningyuan, *et al.* Enhanced bioretention systems for nutrients removal from rain-runoff [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(9): 49-57 (in Chinese).
- [10] YU C, YE X, LI Y, *et al.* Capture of colloidal fine suspended particle by aquatic vegetation under rainfall [J]. Science of the Total Environment, 2023, 892: 164427.
- [11] RAN Y, FU Z Y, MA M Y, *et al.* Enhancing nitrate and phosphorus removal from stormwater in a fold-flow bioretention system with saturated zones [J]. Water Science and Technology, 2021, 84(8): 2079-2092.
- [12] STAGGE J H, DAVIS A P. Water quality benefits of grass swales in managing highway runoff [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2006 (6): 5518-5527.

作者简介:付峥嵘(1974—),男,湖南安化人,博士,副教授,主要研究方向为绿色建筑、海绵城市生物滞留技术。

E-mail:441680332@qq.com

收稿日期:2024-10-28

修回日期:2025-01-14

(编辑:刘贵春)