

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.19.022

改良型干植草沟的水文水质控制效果

袁绍春^{1,2}, 周 静^{1,3}, 杨孟颖^{1,3}, 刘小霞³, 吴 攀³, 杨清伟¹,
吕 波²

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆设计集团有限公司市政设计研究院, 重庆 401120; 3. 重庆交通大学 环境水利工程重庆市工程实验室, 重庆 400074)

摘 要: 干植草沟作为目前应用广泛的雨洪控制设施,能够有效控制降雨径流。通过构建带有淹没区的改良型干植草沟模型,研究其在0.5、1、3、5年降雨重现期下的水文水质控制效果,以及落干期出水污染物的变化规律。结果表明,在不同重现期下,改良型干植草沟在径流总量控制率、峰值流量削减率方面均优于传统干植草沟,并可延缓出流时间19~31 min;同时对径流中TSS、COD及氮和磷污染物的去除效果也有明显提升,在相同进水水质条件下,改良型干植草沟的 NO_3^- -N平均去除率为40.86%~61.26%,约为传统干植草沟的1.33倍。随着重现期的增加,受水力停留时间减小和径流冲刷强度增加的影响,改良型干植草沟的水文性能和污染物削减效果呈下降趋势。当落干期 ≤ 3 d时,COD和DO浓度出现明显下降,分别降至32.04、0.76 mg/L;当落干期 > 3 d时,两者的下降速率明显变缓并逐渐趋于稳定。

关键词: 改良型干植草沟; 水文性能; 水质净化; 淹没区; 落干期

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)19-0155-08

Hydrological and Water Quality Control Performance of Modified Dry Grass Swale

YUAN Shao-chun^{1,2}, ZHOU Jing^{1,3}, YANG Meng-ying^{1,3}, LIU Xiao-xia³, WU Pan³,
YANG Qing-wei¹, LÜ Bo²

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Design Group Co. Ltd. Municipal Design and Research Institute, Chongqing 401120, China; 3. Chongqing Engineering Laboratory of Environmental Hydraulic Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Dry grass swales, which are widely utilized as stormwater management facilities, have proven to be effective in controlling rainfall runoff. In this study, a modified dry grass swale model incorporating submerged zone was developed. The hydrological and water quality control performance under rainfall events with 0.5-year, 1-year, 3-year and 5-year recurrence periods was evaluated, along with the variation patterns of nitrogen and phosphorus concentrations in the effluent during drying periods.

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0200); 重庆交通大学研究生科创项目(2024S0061)

通信作者: 袁绍春 E-mail: yuansc@cqjtu.edu.cn

Under various recurrence periods, the modified dry grass swale demonstrated superior performance compared to traditional dry grass swale in terms of total runoff control rate and peak flow reduction rate. Additionally, it could delay the outflow time by 19 minutes to 31 minutes. Furthermore, the removal efficiencies of pollutants such as TSS, COD, nitrogen, and phosphorus in the runoff were significantly enhanced. Under identical influent quality conditions, the average removal efficiencies of NO_3^- -N in the modified dry grass swales ranged from 40.86% to 61.26%, which was 1.33 times higher than that of traditional dry grass swale. As the recurrence period gradually increased, the hydrological performance and pollutants removal efficiency of the modified dry grass swale exhibited a declining trend, primarily due to the reduced hydraulic retention time and the increased runoff erosion intensity. When the drying period was less than or equal to three days, COD and DO decreased significantly, reaching 32.04 mg/L and 0.76 mg/L, respectively. However, when the drying period exceeded three days, the rate of decline for both parameters slowed considerably and eventually stabilized.

Key words: modified dry grass swale; hydrological performance; water quality purification; submerged zone; drying period

近年来,由于城镇化过程中不透水铺装面积逐年攀升,减缓了雨水下渗速度,使得降雨径流的体积和峰值流量增加,同时地表积累的总悬浮固体(TSS)、营养物质、重金属等污染物在降雨的冲刷、淋溶作用下进入水体^[1],导致城市内涝和面源污染事件频发。干植草沟作为常见的低影响开发(LID)源头控制措施,主要收集路面等不透水表面的地表径流,通过渗透、储存等作用减少降雨径流总量,改善城市水文循环^[2],同时削减径流污染物,净化径流水质^[3]。干植草沟成本低、结构简单,目前我国海绵城市建设中得到了广泛应用。

干植草沟对Pb、Cu、Zn等重金属,以及TSS、COD等均具有较好的去除效果^[4-5],但对氮、磷污染物去除率波动较大,甚至会出现营养盐淋出问题^[6-7]。为进一步提升干植草沟的水质净化效果,目前大多学者采用在基质层添加有机质^[8]、更改土壤层填料比例^[9]等改良措施,以提高脱氮除磷稳定性。研究表明,缺氧环境的形成有助于反硝化脱氮反应^[10],与干植草沟相似,同为常见雨洪控制设施的生物滞留池在设置淹没区后,系统脱氮能力显著增强^[11]。但目前将淹没区应用于干植草沟的相关研究较少。

鉴于此,笔者构建带有排水管上弯构造的改良型干植草沟模型,以此在底部形成淹没区,通过人工模拟降雨实验,考察不同降雨条件下其对道路雨水径流的水文控制效果,研究在保障TSS去除率的

基础上如何提升溶解性污染物去除效果,以期干植草沟的优化设计提供参考。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

干植草沟模型置于阳光棚内,既可避免天然降雨的影响,又可与当地实际气候环境保持一致,具体构造详见图1。

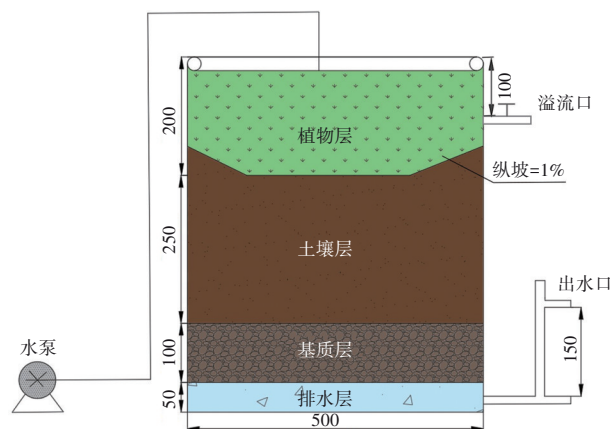


图1 改良型干植草沟结构

Fig.1 Structure diagram of modified dry grass swale

模型采用砖砌结构,尺寸为 $L \times B \times H = 2.0 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$,从上到下依次为植物层(200 mm)、土壤层(250 mm)、基质层(100 mm)和排水层(50 mm)。土壤层由河砂与重庆本地紫色土按7:3(质量比)混合组成,基质层由沸石、砾石与粗砂以1:1:1(质量比)混合组成,各层间铺设透水土工布。在模型侧墙设置高150 mm的上弯排水管,使底部形成淹没区,在

距土壤层上方100 mm处设置溢流口,并于排水管顶端和模型底端分别设置出水口,顶端出水时为带有淹没区的改良型干植草沟,底端出水时为传统干植草沟。

1.2 实验设计

模拟降雨由重庆市南岸区暴雨强度公式得到,雨型采用芝加哥雨型,考虑到当地降雨急促、雨峰靠前的特征,雨峰系数取0.3,汇水面积比为1:10,径流系数为0.85,降雨历时为1 h,降雨过程线如图2所示。每个重现期(P)重复实验3次,并以传统干植草沟作为对比。

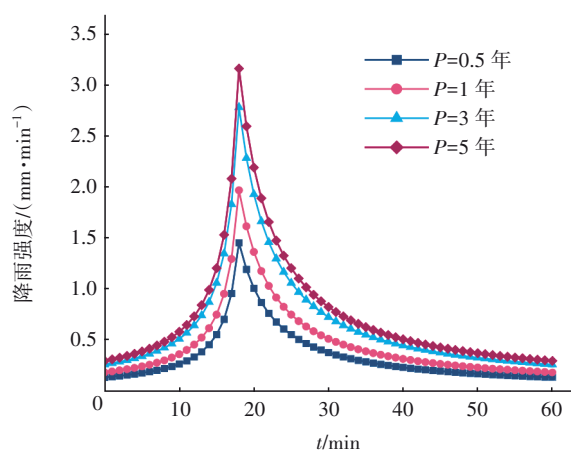


图2 降雨过程线

Fig.2 Rainfall process line

模拟降雨采用水平布置的PVC穿孔管(孔径为2 mm)进水,通过调节水泵流量改变降雨强度,进水时间为1 h,降雨间隔为7 d。根据1961年—2012年重庆市降雨事件的平均降雨强度、最大降雨强度、降雨量以及降雨持续时间分布特征^[12],实验模拟的4种降雨强度分别为20(中雨)、30(大雨)、45(大雨)、50(暴雨) mm/h,进水总量分别为201、287、424、488 L,能够满足7 d落干期的取样要求。

根据重庆市雨季道路径流水质特征,采用 NH_4Cl 、 KNO_3 、 KH_2PO_4 、葡萄糖等试剂配制模拟雨水径流,TSS、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TP、COD浓度分别为 (600 ± 50) 、 (8 ± 1) 、 (4 ± 0.4) 、 (4 ± 0.5) 、 (0.6 ± 0.1) 、 (250 ± 10) mg/L。以出水口第一次出水时刻为初始采样时间,以后每隔10 min取样一次,直至停止出水。TSS采用重量法测定,TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法测定, NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定,COD采用重铬酸盐法测

定,溶解氧(DO)浓度采用便携式多参数水质分析仪测定。

1.3 分析方法

为分析两种干植草沟的水文水质性能,以径流总量控制率(R_v)、峰值流量削减率(R_p)、峰值延迟时间(T_d)代表水文性能,以污染物去除率(R_c)代表水质性能,具体计算公式如下:

$$R_v = \frac{V_{\text{入}} - V_{\text{出}}}{V_{\text{入}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_p = \frac{Q_{\text{入}} - Q_{\text{出}}}{Q_{\text{入}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$T_d = T_{\text{出}} - T_{\text{入}} \quad (3)$$

$$R_c = \frac{C_{\text{入}} - C_{\text{出}}}{C_{\text{入}}} \times 100\% \quad (4)$$

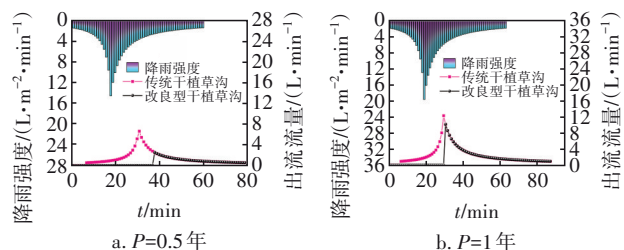
式中: $V_{\text{入}}$ 和 $V_{\text{出}}$ 分别为进水和出水总体积,L; $Q_{\text{入}}$ 和 $Q_{\text{出}}$ 分别为进水和出水峰值流量,L/min; $T_{\text{入}}$ 和 $T_{\text{出}}$ 分别为进水和出水峰值时间,min; $C_{\text{入}}$ 和 $C_{\text{出}}$ 分别为进水和出水污染物浓度,mg/L。

采用皮尔逊相关系数法对各指标进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 水文控制效果

实验开始前,干植草沟底部无径流积存。改良型干植草沟与传统干植草沟在0.5、1、3、5年重现期下的出流流量随时间的变化如图3所示。在4种重现期条件下,二者的出流时间和峰值流量均存在一定差异,其中,传统干植草沟分别于7、5、3、2 min时开始出流,峰值流量分别为6.64、12.33、19.77、27.80 L/min;改良型干植草沟分别于38、29、24、21 min时开始出流,峰值流量分别为2.54、10.18、19.77、27.80 L/min。可见,随着重现期的增大,两种干植草沟的出流时间均越来越早、峰值流量均呈现增加趋势;但与传统干植草沟相比,改良型干植草沟的出流时间明显更晚、峰值流量也略低。在不超过5年一遇重现期降雨条件下,改良型干植草沟可延迟出流时间19~31 min。



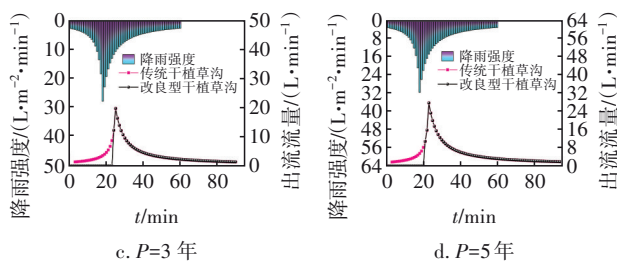


图3 不同重现期下出流流量变化曲线

Fig.3 Variation curves of outflow rate under different recurrence periods

两种干植草沟在不同重现期下的水文控制效果见图4。可知,随着降雨重现期的增大,两种干植草沟的径流总量控制率、峰值流量削减率、峰值延迟时间等均呈现逐渐降低的趋势。

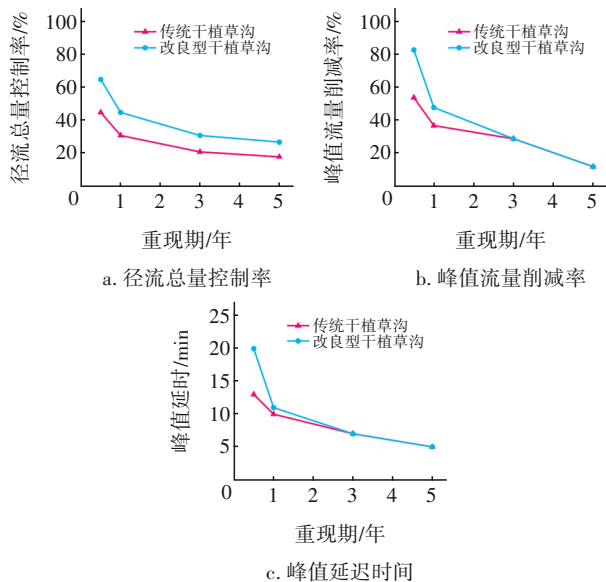


图4 不同重现期下的水文控制效果

Fig.4 Hydrological control effect under different recurrence periods

在低重现期下(0.5~1年),改良型干植草沟对雨水径流有明显的峰值流量削减和峰值延迟作用,与传统干植草沟相比, $P=0.5$ 年时改良型干植草沟的 R_p 、 R_d 、 T_d 分别提升了44.4%、53.7%、53.8%;在高重现期下(3~5年),随着进水量的增加,两种干植草沟的水文控制效果差距逐渐缩小,改良型干植草沟对水文控制效果的提升变得不明显,当 $P=5$ 年时,其 R_p 、 T_d 指标与传统干植草沟相同,这与Shafique等^[13]通过田间实验得到的结论一致。可以看出,与传统干植草沟相比,在相同低重现期下,改良型干植草沟在控制雨水径流总量、削减峰值流量、延迟峰值时间等方面效果更好,说明设置淹没区能有效提升

干植草沟的水文控制性能。

2.2 水质净化效果

2.2.1 TSS的去除效果

在不同重现期下,改良型干植草沟和传统植草沟对TSS的去除效果如图5所示。二者的TSS平均去除率分别为51.40%~61.80%、46.40%~58.40%,说明二者均可有效去除地表径流中的TSS,且在相同重现期条件下,前者的去除率高于后者。将TSS去除率与重现期进行皮尔逊曲线拟合,结果表明,TSS去除率与重现期呈负相关关系($r=-0.76$, $p<0.05$),即随着重现期的增加,两种干植草沟的TSS去除率均呈下降趋势。干植草沟对TSS的去除机制主要包括沉降、介质吸附、过滤和植被层的截留作用;Fletcher等^[14]认为,干植草沟去除TSS属于物理吸附过程,主要依靠颗粒物的沉降作用,随着重现期的增加,降雨峰值、径流总量及径流流速增大,使得颗粒物沉降时间缩短、雨水冲刷强度增加,进而导致出水TSS浓度增大。

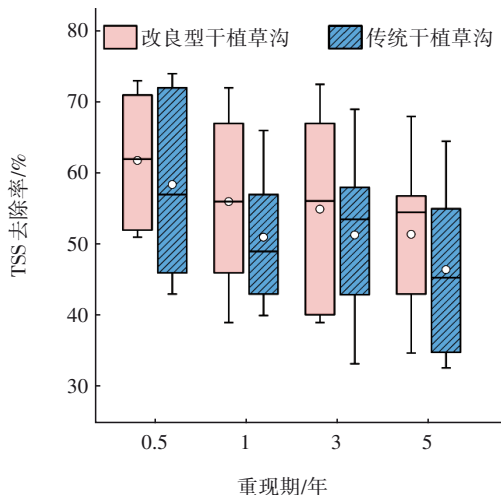


图5 干植草沟对TSS的去除效果

Fig.5 TSS removal effect in dry grass swale

2.2.2 COD的去除效果

在不同重现期下,两种干植草沟对COD的去除效果如图6所示。改良型干植草沟对COD的平均去除率为62.66%~70.46%,约为传统干植草沟的1.1倍,随着重现期的增加,改良型干植草沟对COD的平均去除率始终高于传统干植草沟。可见,设置淹没区能够增强干植草沟对降雨径流中COD的去除效果,这是因为淹没区的存在有利于植草沟内部缺氧环境的形成,适合反硝化细菌等异养厌氧菌的生

长和繁殖,强化了设施内部的反硝化作用,同时提升了COD的去除效果。

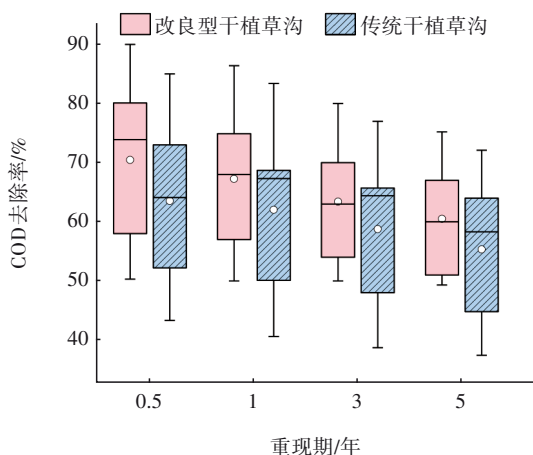


图6 干植草沟对COD的去除效果

Fig.6 COD removal effect in dry grass swale

2.2.3 TP的去除效果

在不同重现期下,两种干植草沟对TP的去除效果如图7所示,二者对TP的去除效果比较稳定,平均去除率均维持在50%以上。其中,在 $P=0.5$ 年时,改良型干植草沟对TP的最高去除率为66%,是传统干植草沟的1.04倍。

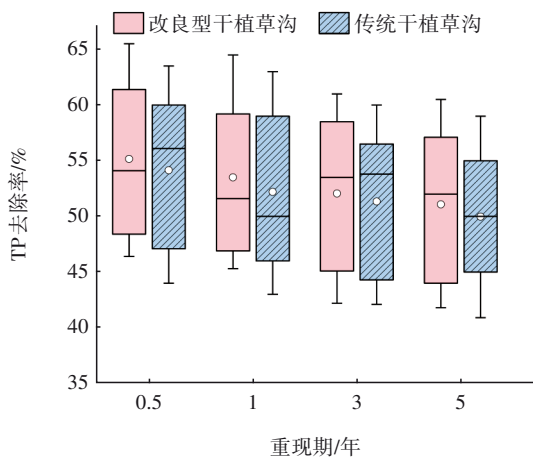


图7 干植草沟对TP的去除效果

Fig.7 TP removal effect in dry grass swale

本实验模拟径流中的TP包括颗粒态磷(PP)和溶解态磷(DP),PP是附着于悬浮颗粒物表面的磷,主要通过沉降、介质层过滤及吸附作用去除,而DP主要依靠微生物的代谢作用去除。一般情况下,雨水径流中DP含量占比较少,故TP的去除以介质层过滤、吸附为主要途径。改良型干植草沟底部淹没区的存在会形成缺氧和厌氧环境,所以由表层至底部形成了好氧、厌氧交替的环境条件,这有利于聚

磷菌等微生物的生长繁殖,进而提升TP去除效果。

2.2.4 氮的去除效果

在不同重现期下,两种干植草沟对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和TN的去除效果如图8所示。

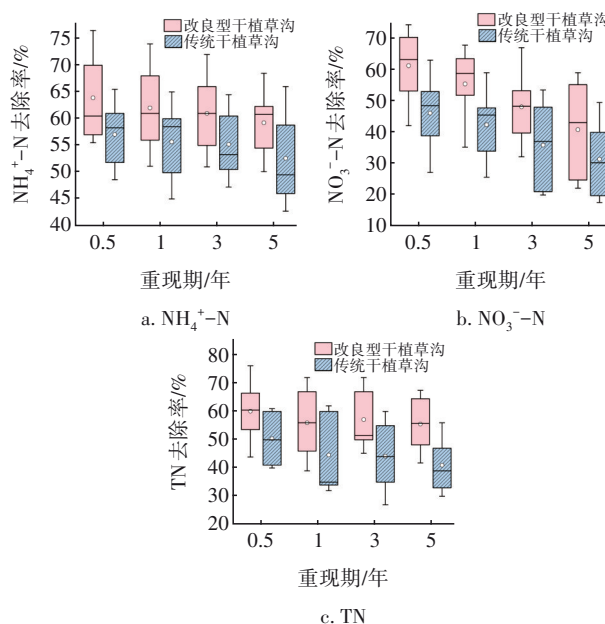


图8 干植草沟对氮的去除效果

Fig.8 Nitrogen removal effect in dry grass swale

图8(a)显示,改良型干植草沟对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率为59.24%~63.90%,是传统干植草沟的1.13倍,相同重现期下,改良型干植草沟对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率始终高于传统干植草沟。随着重现期的增大,两种干植草沟对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率均呈现下降趋势。由于降雨径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要以颗粒态存在,易于被土壤介质拦截,故 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在干植草沟中的去除主要依靠介质吸附和离子交换作用^[15]。有研究表明,土壤吸附 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能力与其黏粒含量呈正相关^[16],本研究在两种植草沟的土壤层添加了一部分重庆本地的紫色黏壤土,对带正电荷的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有良好的吸附效果^[17],同时,基质层中沸石的阳离子也可与水中铵离子进行离子交换,进一步提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果。但随着降雨重现期的增加,径流冲刷作用增强,影响了氨氮的稳定吸附,导致去除率下降。

在相同条件下,改良型干植草沟和传统干植草沟出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别为1.5~2.3、2.2~2.7 mg/L,改良型干植草沟的平均去除率为40.86%~61.26% [见图8(b)],约为传统干植草沟的1.33倍;在 $P=0.5$ 年时,改良型干植草沟的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均去除率提

升了32.8%,可见设置淹没区能够提高干植草沟对 NO_3^- -N的去除效果。在改良型干植草沟中,表层土壤淋失的有机物能够为微生物提供基本的碳源,底部淹没区则提供了反硝化反应所必需的缺氧环境;同时设置淹没区能够延缓出流时间,这在一定程度上增加了污染物与微生物的接触时间,有利于系统内反硝化反应的稳定进行。将改良型干植草沟的 NO_3^- -N去除率与重现期进行皮尔逊曲线拟合,结果显示, NO_3^- -N去除率与重现期呈显著负相关($r=-0.72, p<0.05$),即 NO_3^- -N去除率随重现期的增加而快速下降。究其原因,在较高强度的降雨过程中,单位时间内流入干植草沟的径流体积增多,使得水力停留时间缩短,不利于反硝化反应的进行,导致出水 NO_3^- -N浓度升高^[18]。可以看出,设置淹没区有利于促进干植草沟内的反硝化反应,进而减少相应地块雨水径流的氮输出量。因此,在水体氮容量较低的区域,可以考虑通过增加土壤层和淹没区深度^[19]、优化渗透速率^[20]、种植高密度的深根性植物^[21]等措施强化LID设施的脱氮能力,减少受纳水体的氮通量。

由图8(c)可知,改良型干植草沟对TN的平均去除率为55.56%~60.14%,约为传统干植草沟的1.36倍。在相同重现期条件下改良型干植草沟的TN去除率始终高于传统干植草沟,这是因为前者基质层的沸石、紫色黏壤土增加了对 NH_4^+ -N的吸附效果,同时基质表层提供的碳源和淹没区的缺氧环境加强了反硝化作用,提升了 NO_3^- -N的去除效果。随着重现期的增加,二者对TN的去除率整体呈降低趋势,这可能是因为较高的降雨量使得径流冲刷作用加强,导致 NH_4^+ -N吸附不稳定以及 NO_3^- -N的反硝化作用降低,从而使TN去除率下降。

2.3 落干期出水污染物的变化规律

在重现期为0.5年、落干期为7d条件下,改良型干植草沟出水中各类污染物和DO浓度的变化如图9所示。当落干期 ≤ 3 d时,COD和DO浓度出现明显下降,分别降至32.04、0.76 mg/L;当落干期 > 3 d时,两者下降速率明显变缓并逐渐趋于稳定。出水氮浓度的变化总体可分为3个阶段:第一阶段是落干期为0~1d时,出水 NO_3^- -N浓度升至1.78 mg/L,此阶段改良型干植草沟上部基质层逐渐复氧,DO浓度最高,可达到3.7 mg/L,适于进行氨化和硝化反应,土壤层中 NH_4^+ -N经好氧硝化细菌转化为 NO_3^- -N,

并随着滞留雨水逐渐下渗到淹没区中^[22],使得出水 NH_4^+ -N浓度显著降低;第二阶段是落干期为1~3d时,出水 NO_3^- -N浓度下降至1.03 mg/L,DO浓度明显下降,此时设施逐渐变为缺氧环境,在缺氧条件下,底部淹没区可以发生稳定的反硝化作用, NO_3^- -N在反硝化细菌的作用下转化为 N_2 从系统中去除;第三阶段是落干期为3~7d时,随着时间的延长,此阶段设施内DO浓度降到最低值,出水TN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N浓度基本保持稳定,出水 NO_3^- -N浓度维持在1.0 mg/L,此时设施底部淹没区COD降至20 mg/L,可能是由于没有外加碳源,反硝化进程受阻。

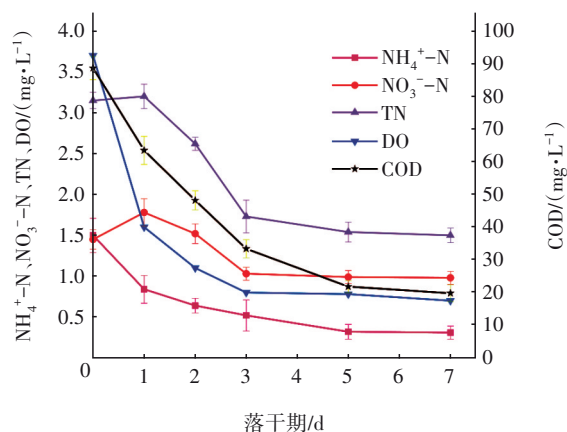


图9 污染物浓度随落干期的变化

Fig.9 Change in pollutants concentration with drying period

综上所述,较之传统干植草沟,改良型干植草沟在不同重现期下对TSS、COD、TN、TP等的去除率均有提升,但在长落干期条件下,其出水TN浓度依然相对较高。一方面,可以通过优化设施结构和材料营造稳定的缺氧环境,提高氨氮的吸附、转化效率;另一方面,可以考虑在基质层中添加适量的废纸^[23]、木屑^[24]、秸秆^[25]等有机物为反硝化反应提供充足的电子供体,减少因反硝化不完全而导致的亚硝态氮累积,进一步提高设施在落干期的脱氮性能。

3 结论

① 在重现期为0.5~5年时,两种干植草沟的水文性能呈现相似的变化规律,二者的 R_v 、 R_p 、 T_d 均随重现期的增加而逐渐降低。较之传统干植草沟,改良型干植草沟可延迟出流时间19~31 min,在 $P=0.5$ 年时,其 R_v 、 R_p 、 T_d 分别提升了44.4%、53.7%、53.8%;但在 $P=5$ 年时,二者的水文性能无明显差

异。因此,在小雨、中雨事件中,设置淹没区能够有效提升干植草沟的水文性能。

② 两种干植草沟对TSS、COD、TN、TP等的去除率均随重现期的增加而呈现降低趋势。在重现期为0.5~5年时,改良型干植草沟的水质控制效果优于传统干植草沟,对TSS、COD、TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率分别为51.40%~61.80%、62.66%~70.46%、55.56%~60.14%、51.08%~55.16%、59.24%~63.90%、40.86%~61.26%;尤其对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率提升明显,在 $P=0.5$ 年时, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除率较之传统干植草沟提升32.8%。在落干期为0~3 d时,改良型干植草沟出水污染物浓度快速下降;在落干期为3~7 d时,由于有机物被消耗,COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度逐渐趋于稳定。

参考文献:

- [1] 张庭秀,李田. 浅基质层干植草沟对道路径流中PAHs的去除效果[J]. 中国给水排水, 2021, 37(11): 96-103.
ZHANG Tingxiu, LI Tian. Removal efficiency of polycyclic aromatic hydrocarbons in road runoff by dry grass swale with shallow substrate layer [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(11): 96-103 (in Chinese).
- [2] DAVIS A P, STAGGE D H, JAMIL E, *et al.* Hydraulic performance of grass swales for managing highway runoff [J]. Water Research, 2012, 46(20): 6775-6786.
- [3] 李海燕,魏鹏,黄延,等. 暴雨情况下传输型植被浅沟的净化效果研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(1): 99-103.
LI Haiyan, WEI Peng, HUANG Yan, *et al.* Research of purification effect of conveyance swale under heavy rain [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(1): 99-103 (in Chinese).
- [4] LI H, LI K, ZHANG X. Performance evaluation of grassed swales for stormwater pollution control [J]. Procedia Engineering, 2016, 154: 898-910.
- [5] GAVRIC S, LARM T, ÖSTERLUND H, *et al.* Measurement and conceptual modelling of retention of metals (Cu, Pb, Zn) in soils of three grass swales [J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 1053-1061.
- [6] 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).
- [7] 张佳伟,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).
- [8] 段进凯,李田,张佳伟. 强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2715-2721.
DUAN Jinkai, LI Tian, ZHANG Jiawei. Nitrogen removal efficiencies from road runoff by dry grass swales with a shallow substrate layer [J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2715-2721 (in Chinese).
- [9] 夏治坤,朱木兰. 植草沟对农村污水水质净化效果的研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(4): 35-38.
XIA Zhikun, ZHU Mulan. The effect of grass planting ditch on rural sewage purification [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(4): 35-38 (in Chinese).
- [10] PETERSON I J, IGIELSKI S, DAVIS A P. Enhanced denitrification in bioretention using woodchips as an organic carbon source [J]. Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 2015. DOI: 10.1061/jswbay.0000800.
- [11] LI H, LIU Z, TAN C, *et al.* Efficient nitrogen removal from stormwater runoff by bioretention system: the construction of plant carbon source-based heterotrophic and sulfur autotrophic denitrification process [J]. Bioresource Technology, 2022, 349: 126803.
- [12] 张倩倩,李艳,王志福,等. 1961—2012年重庆市的降水特征分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2016, 8(3): 215-225.
ZHANG Qianqian, LI Yan, WANG Zhifu, *et al.* Precipitation characteristics in Chongqing during 1961-2012 [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 8(3): 215-225 (in Chinese).
- [13] SHAFIQUE M, KIM R, KYUNG-HO K. Evaluating the capability of grass swale for the rainfall runoff reduction from an urban parking lot, Seoul, Korea [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(3): 537.

- [14] FLETCHER T D, PELIO L, FIELDING J, *et al.* The performance of vegetated swales for urban stormwater pollution control [J]. *Global Solutions for Urban Drainage*, 2002. DOI: 10.1061/40644(2002)51.
- [15] KONG Z, SONG Y, SHAO Z, *et al.* Biochar-pyrite bi-layer bioretention system for dissolved nutrient treatment and by-product generation control under various stormwater conditions [J]. *Water Research*, 2021, 206: 117737.
- [16] 姜桂华. 铵态氮在土壤中吸附性能探讨[J]. 长安大学学报(建筑与环境科学版), 2004, 21(2): 32-34, 38. JIANG Guihua. Discussion about $\text{NH}_4^+\text{-N}$ adsorptive ability in soils [J]. *Journal of Chang'an University (Architecture & Environmental Science Edition)*, 2004, 21(2): 32-34, 38 (in Chinese).
- [17] 王春燕, 郭劲松, 王飞, 等. 紫色土构建快渗系统对污水氮去除性能的影响 [J]. 重庆大学学报, 2008, 31(6): 688-693. WANG Chunyan, GUO Jinsong, WANG Fei, *et al.* Influence study of constructed rapid infiltration system constructed by purple soil on sewage nitrogen removal performance [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(6): 688-693 (in Chinese).
- [18] 刘靖文. 带有淹没区的生物滞留池优化设计与运行研究[D]. 南京: 东南大学, 2016. LIU Jingwen. The Design and Operation of the Bioretention with Submerged Area Zone [D]. Nanjing: Southeast University, 2016 (in Chinese).
- [19] 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, 17. 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, 17 (in Chinese).
- [20] HUNT W F, DAVIS A P, TRAVER R G. Meeting hydrologic and water quality goals through targeted bioretention design [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2012, 138(6): 698-707.
- [21] LUCAS W C, GREENWAY M. Nutrient retention in vegetated and nonvegetated bioretention mesocosms [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2008, 134(5): 613-623.
- [22] 仇付国, 代一帆, 付昆明, 等. 生物滞留系统设置内部淹没区对径流污染物去除的影响 [J]. 环境工程, 2017, 35(7): 7-12. QIU Fuguo, DAI Yifan, FU Kunming, *et al.* Impact of a submerged zone on pollutants removal in WTR-modified bioretention [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(7): 7-12 (in Chinese).
- [23] STANDER E K, BORST M. Hydraulic test of a bioretention media carbon amendment [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2010, 15(6): 531-536.
- [24] SALILING W J B, WESTERMAN P W, LOSORDO T M. Wood chips and wheat straw as alternative biofilter media for denitrification reactors treating aquaculture and other wastewaters with high nitrate concentrations [J]. *Aquacultural Engineering*, 2007, 37(3): 222-233.
- [25] 王书敏, 何强, 徐强, 等. 生物滞留系统去除地表径流中的氮素研究评述 [J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 140-150. WANG Shumin, HE Qiang, XU Qiang, *et al.* Summary of nitrogen removal in surface runoff by bioretention system [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 140-150 (in Chinese).

作者简介:袁绍春(1984-),男,重庆人,博士,副教授,主要从事城市雨洪管理、废水处理及资源化技术研究。

E-mail:yuanasc@cqjtu.edu.cn

收稿日期:2024-07-17

修回日期:2024-08-16

(编辑:刘贵春)