

典型屋面初期雨水径流污染特征及 生物控制中试研究

杨双林^{1,2}, 邓征宇³, 罗桢^{1,2}, 涂智^{1,2,3}, 罗鑫^{1,2}, 包正铎³, 贺卫宁³, 陈宏^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙410114; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南长沙410114; 3. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南长沙410007)

摘要:为加强城市面源污染控制和推动生物滞留设施的实际应用,通过在线和人工监测方法考察了长沙市典型屋面雨水径流污染的变化规律及装配式高位花坛对污染物的去除性能,并采用Illumina高通量测序手段探究了设施介质中微生物群落的结构组成。结果表明:长沙市屋面初期雨水径流中COD和SS峰值浓度分别为22.9~153.0 mg/L和58.4~294.4 mg/L,具有一定的污染性且二者呈现正相关趋势;污染物浓度峰值出现在降雨开始后的30 min内且随着降雨历时的增加逐渐下降并趋于稳定;降雨量、降雨强度和降雨间隔时间的增加会加剧初期冲刷现象从而进一步恶化屋面径流水质;装配式高位花坛对COD、SS和NH₃-N的平均去除率分别为58.3%、85.3%和66.2%,屋面径流经过净化后水质明显改善;介质中的主要优势菌门为变形菌门、放线菌门、酸杆菌门和绿弯菌门,其中变形菌门相对丰度为30.0%~46.6%;反硝化过程更容易在出水端发生。

关键词:屋面初期雨水径流;生物滞留设施;装配式高位花坛;微生物群落结构;中试研究
中图分类号:X506 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2023)02-0091-08

A pilot study on pollution characteristics and biological control of initial runoff on typical roof

YANG Shuanglin^{1,2}, DENG Zhengyu³, LUO Zhen^{1,2}, TU Zhi^{1,2,3}, LUO Xin^{1,2},
BAO Zhengduo³, HE Weining³, CHEN Hong^{1,2}

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: To enhance urban surface source pollution control and promote the practical application of bioretention facilities, we investigated the change patterns of typical roof rainfall runoff pollution and the pollutant removal performance of assembled high-level parterre in Changsha by online and manual monitoring methods, and explored the structural composition of microbial communities in the facility medium by Illumina high-throughput sequencing. The results showed that the concentrations of COD and SS in the initial roof rainfall runoff of Changsha were 22.9 – 153.0 mg/L and 58.4 – 294.4 mg/L, respectively, indicating that the initial runoff was highly polluted, and the COD and SS showed a trend of positive correlation. The peak concentration of pollutants occurred within 30 min after the start of rainfall and gradually decreased and stabilized with the increase of rainfall duration. The increase of rainfall volume, rainfall intensity and rainfall interval would aggravate the initial flush and further deteriorate the water quality of roof rainfall runoff. The removal rates of COD, SS and NH₃-N in the assembled high-level parterre were 58.3%, 85.3% and 66.2% and above, respectively, and the water quality of the roof rainfall runoff was significantly improved after purification. The main dominant phyla in the medium of high-level

收稿日期:2022-07-19; 修回日期:2022-11-06

基金项目:中国机械工业集团有限公司重大科技专项(SINOMAST-ZDZX-2017-07);湖南省重点研发计划项目(2022SK2091);湖南省水利科技计划项目(XSKJ2022068-27)

作者简介:杨双林(1999—),男,广东韶关人,硕士研究生,研究方向为海绵城市建设关键技术研究。

通讯作者:陈宏(1983—),男,湖南衡阳人,博士,教授,硕士生导师,研究方向为水处理、水环境治理与水环境修复。

parterre were *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Acidobacteria* and *Chloroflexi*, among which the relative abundance of *Proteobacteria* accounted for 30.0%–46.6%. Furthermore, the denitrification process was more likely to occur at the effluent end.

Key words: initial roof rainfall runoff; bioretention facility; assembled high-level parterre; microbial community structure; pilot study

1 研究背景

随着现代化城镇的快速发展,越来越多的自然绿地被不透水表面取代,这会显著减少土壤入渗量并增加地表径流量,同时使汇流时间减短、径流洪峰提前,从而进一步引发城市内涝和面源污染等问题,给城市水环境和人类生活甚至生命安全造成严重危害^[1]。人类活动与自然过程中产生的各种污染物聚集在不同下垫面(屋面、路面、绿地及停车场等),当城市降雨发生时,污染物总固体悬浮物(total suspended solid, TSS)、氮(nitrogen, N)、磷(phosphorous, P)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、重金属及病原微生物等不断被雨水径流冲刷,若不加处理直接排放到污水管道或地表水体中,不仅会加重市政管网负担,还会造成水体富营养化、产生黑臭水体等现象^[2-3]。许多研究表明,虽然城市屋面径流对受纳水体的威胁程度较低,但屋面径流仍存在较强的污染性^[4-6],因此城市雨水资源化中必须重视对屋面径流污染物的控制,这与合理利用雨水资源以及城市可持续发展建设直接相关。近年来我国海绵城市建设成为热点,基于LID(low impact development)理念的生物滞留设施作为雨洪控制与管理的关键技术,能稳定高效削减降雨径流并改善水质^[7-8],同时对径流中携带的病原微生物具有一定的去除效果^[9]。生物滞留设施通过植物的吸收转化和介质的过滤、截留吸附以及微生物的降解作用来有效去除雨水径流中的污染物,其中介质更是影响生物滞留设施性能的关键因素^[10],因此研究者们通过改良介质来提升其对污染物的吸附和滞留能力,以改善设施的水质净化效果。虽然大量研究表明改良介质确实可以提高去除污染物的能力^[11-13],但这些研究都是基于实验室规模的生物滞留柱并采用合成雨水为进水条件,与实际应用存在一定差异,不能完全反映出生物滞留设施的真实性能。

长沙市为长江中游地区重要的中心城市,属亚热带季风气候,雨量充沛,雨热同期,其初期雨水径流具有代表性,因而研究长沙市屋面初期雨水径流污染特征及其净化技术具有重要意义。目前多数研究聚焦于实验室规模的生物滞留系统污染物的去除性能,缺乏对改良介质生物滞留设施长期水质净化效果的考

察,本研究利用新型装配式高位花坛进行中试试验,以长沙市某轻钢踩板屋面为对象,通过在线监测和人工取样分析雨水径流水质,采用Illumina高通量测序技术检测不同介质深度微生物群落结构,探究长沙市屋面初期雨水径流污染特征及装配式高位花坛对污染物的去除性能,为有效缓解城市屋面初期雨水径流污染问题提供理论依据和实践基础。

2 试验装置与方法

2.1 试验装置

试验场地位于长沙市,地理坐标为113.01°E, 28.07°N。建筑屋面材料为轻钢踩板,汇水面积为136.5 m²。如图1所示,在装配式高位花坛集水槽前安装在线流量监测设备,包括SA-9传感器和LDG-600L电磁流量计,通过GDC控制器获得流量、COD和SS分钟级监测数据。坛体由预制混凝土板拼装而成,结构简单可拆卸,净空尺寸为2.0 m × 1.0 m × 1.05 m(长 × 宽 × 高),花坛内自上而下分别为蓄水层、覆盖层、介质层、细碎石层、中碎石层、集水管和粗碎石层,底部排水管连接弯头。介质层组分为90%生物滞留介质(60%粗砂 + 15%细砂 + 25%种植土) + 5%沸石 + 5%椰糠。选择耐涝耐旱、根系发达的金森女贞(*Ligustrum japonicum* var. *Howardii*)作为设施植物。

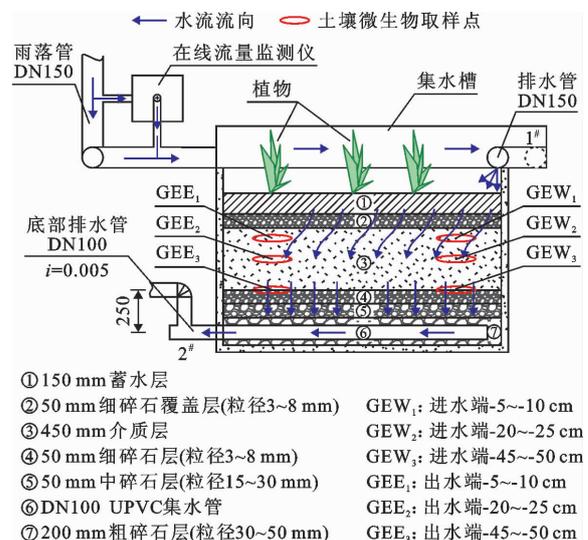


图1 装配式高位花坛试验装置示意图(单位:mm)

2.2 试验方法

2021年3—8月期间,每次降雨发生时用200 mL聚乙烯塑料瓶于高位花坛1#进水口和2#排水管处收集水样。考虑到初期冲刷效应,降雨前期污染物浓度变化较快,取样遵循前密后疏原则,从径流形成开始计时,前15 min,每隔5 min取样一次;15~60 min,每隔15 min取样一次;60 min以后,每隔30 min取样一次。取样完成后随即在实验室分别采用快速消解分光光度法、重量法、纳氏试剂分光光度法测定COD(化学需氧量)、SS(固体悬浮物)和NH₃-N(氨氮)的浓度。

在高位花坛进水端和出水端分别设置微生物取样点,于2021年6月按表层-5~-10 cm、中间层-20~-25 cm和底层-45~-50 cm每个深度收集土壤样品3~5 g。根据《土壤质量 土壤采样技术指南》(GB/T 36197—2018)将收集的新鲜土壤样品进行简单预处理,剔除小石子及落叶后封装于玻璃瓶中,置于-20℃冰箱内保存待用。

2.3 数据分析方法

污染物去除率的计算公式如下:

$$R_c = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_{in} 为污染物进水浓度,mg/L; C_{out} 为污染物出水浓度,mg/L。

采用Origin 2021软件进行数据处理和图形绘制。

2.4 土壤微生物分析方法

总DNA(deoxyribonucleic acid)抽提、浓度和纯度检测及质量提取按照E. Z. N. A. ® soil试剂盒(Omega Bio-tek, Norcross, GA, U. S.)说明书进行。聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)使

用细菌通用引物338F和806R,引物序列分别为5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3'和5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3',类型为16S rRNA,扩增区间为V3~V4区。混合来自相同样品的PCR产物并使用2%琼脂糖凝胶回收后进行纯化、检测和定量,每个样本的PCR产物在利用Illumina MiSeq PE300平台测序之前需使用Nextflex Rapid DNA-Seq试剂盒构建PE 2*300文库。最后在美吉生信云平台(<http://www.i-sanger.com>)进行OTU(operational taxonomic units)聚类分析、物种组成分析等。

2.5 屋面初期雨水径流和降雨特征设定

国内外对初期雨水的定义尚无统一界定,本研究根据径流污染物浓度随降雨历时趋于稳定将降雨过程中前30 min内的雨水径流定义为屋面初期径流^[14]。降雨特征包括降雨量(mm)、降雨历时(h)、雨量等级、降雨强度(mm/h)和降雨间隔时间(d)。雨量等级划分为小雨(12 h降水总量<4.9 mm)、中雨(12 h降水总量为5.0~14.9 mm)、大雨(12 h降水总量为15.0~29.9 mm)、暴雨(12 h降水总量为30.0~69.9 mm)和大暴雨(12 h降水总量为70.0~139.9 mm)。

3 试验结果分析与讨论

3.1 屋面初期雨水污染特征及变化

试验期间共监测到41场降雨事件,降雨主要集中在6—8月,中、小雨占总降雨场数的60%以上。本研究挑选数据完整且具有代表性的6场降雨事件进行分析。表1总结了6场降雨事件的降雨特征和屋面径流污染物峰值浓度,其中雨量等级根据12 h降水总量划分。

表1 6场次降雨事件降雨特征和屋面径流污染物峰值浓度

编号	降雨日期	雨量等级	场次降雨量/mm	场次降雨历时/h	150min内降雨强度/(mm·h ⁻¹)	降雨间隔时间/d	COD峰值浓度/(mg·L ⁻¹)	SS峰值浓度/(mg·L ⁻¹)
A	4月5日	小雨	3.6	2.50	1.44	0	49.9	58.4
B	4月18日	中雨	3.9	4.58	1.16	3	41.4	76.5
C	8月17日	中雨	8.6	3.67	2.64	2	22.9	159.2
D	7月18日	大雨	23.3	4.08	8.76	13	130.7	178.1
E	3月16日	大雨	11.6	4.58	4.24	0	32.8	87.4
F	6月28日	大暴雨	136.8	12.08	27.72	6	153.0	294.4

由于在线设备监测到的径流污染物为COD和SS,因此仅分析降雨径流中COD和SS的浓度变化趋势。从表1可以看出,6场降雨事件的COD峰值

浓度为22.9~153.0 mg/L,SS峰值浓度为58.4~294.4 mg/L,远超《湖南省城镇污水厂排放标准》(DB43/T 1546—2018)规定的Ⅱ级水质标准。因

此,长沙市屋面初期雨水径流中的 COD 和 SS 具有高污染性,这与谢尚宇等^[15]的研究结果一致,并且降雨后期的屋面径流水质仍不能满足Ⅱ级水质标准,不能作为一般回用水处理,所以屋面初期雨水径流不能直接排入接纳水体,否则将造成地表水体和

水源地的冲击污染,影响水资源的可持续利用。

图2为所选6场次降雨事件开始形成径流后150 min内的屋面径流污染物浓度及降雨量的变化,其中降雨量、SS和COD浓度数据均由在线仪器监测所得。

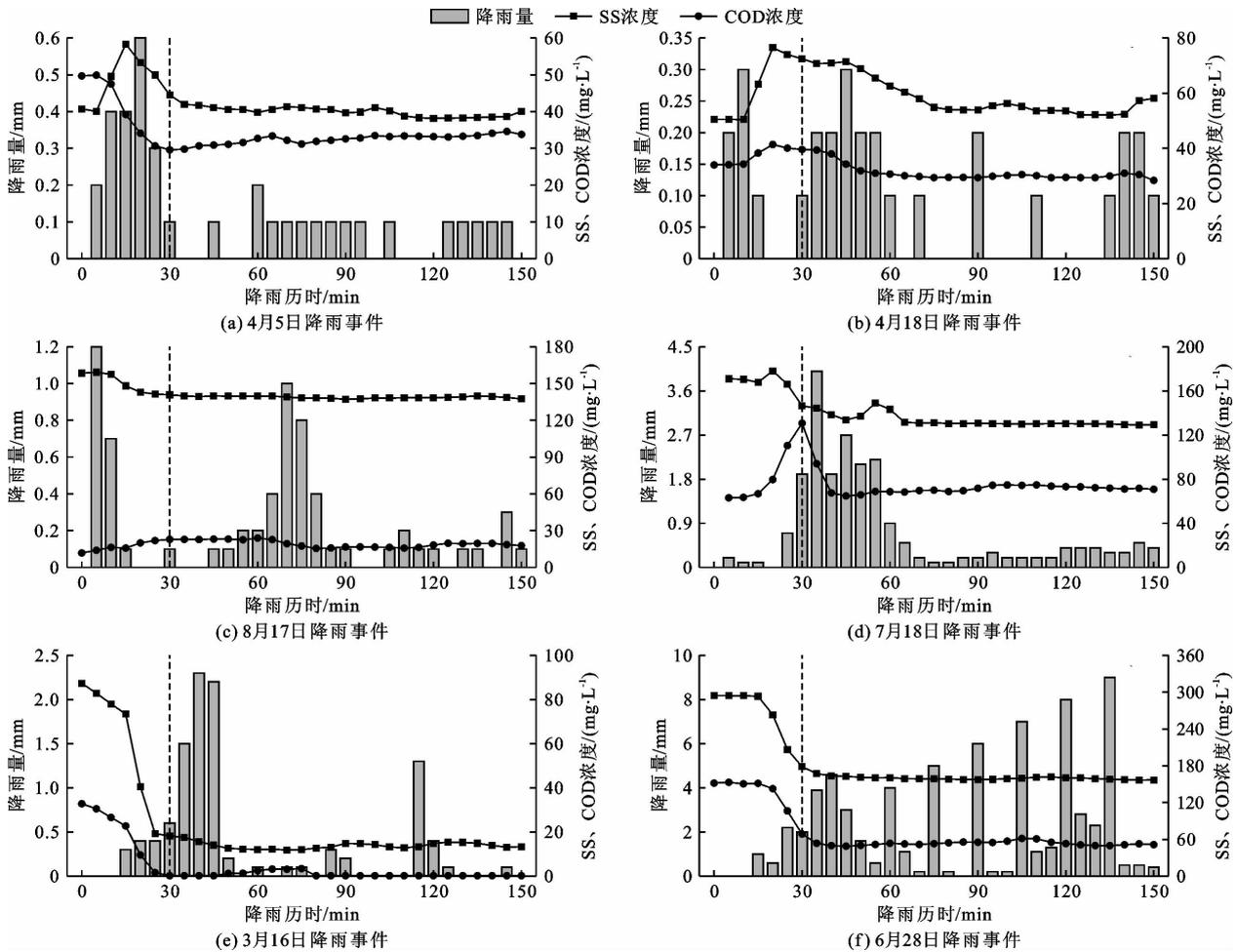


图2 6场次降雨事件形成径流后150 min内屋面径流污染物浓度及降雨量变化

如图2所示,屋面初期雨水径流污染物浓度明显高于降雨事件后期,说明存在浓度初期冲刷现象^[16]。朱甜甜等^[17]建立SWMM(storm water management model)水质模型模拟了径流污染物SS的浓度变化,发现不同重现期和不同土地利用类型下径流污染物浓度均在30~60 min达到最大值随后减小并稳定在某一数值附近,本研究中屋面径流COD、SS浓度峰值均出现在降雨过程的前30 min,30 min后浓度缓慢下降并趋于稳定,这也反映出研究区域存在一定的屋面初期雨水径流污染效应。由图2(d)、2(f)结合表1可知,7月18日和6月28日降雨事件中屋面初期径流COD和SS峰值浓度远高于其他降雨事件,COD峰值浓度分别为130.7、153.0 mg/L,SS峰值浓度分别为178.1、294.4 mg/L。分析其原因,首先是这两次降

雨事件分别与前期降雨事件的间隔时间较长,有更多的大气气溶胶和灰尘等污染物在屋面聚集^[18],其次是降雨强度较大,雨水径流对屋面的冲刷作用增强,这两个因素导致降雨发生时产生的屋面初期径流携带的污染物量增多,污染物浓度大幅增加。李俊奇等^[19]研究发现,降雨强度、降雨时间间隔对初期雨水径流水质有显著影响,在不考虑其他因素的情况下,降雨强度越大、降雨间隔时间越长,径流污染物浓度越高,初期冲刷现象越明显。

雨量等级也是初期冲刷现象的影响因素,本研究不同雨量等级下初期冲刷现象明显程度排序为大暴雨>大雨>中雨>小雨。不同等级的降雨量不同,降雨量越大,则越多的污染物被冲刷,屋面初期雨水径流水质越差^[20]。

图3为6场次降雨事件屋面径流中COD与SS浓度相关程度的线性拟合结果。图3中的拟合结果表明,3月16日和6月28日降雨事件中COD和SS的皮尔逊相关性系数 P 值及拟合优度 R^2 均接近1,即两者正相关性显著且线性拟合程度较高,其余多数场次降雨事件屋面径流中COD和SS的皮尔逊相

关性系数 P 值也都大于0,说明两者存在一定的正相关性,这与张仪等^[21]的研究结果一致。

因此雨水径流中的COD可能多以颗粒态形式存在或附着在固体颗粒物上,在收集处理屋面雨水径流时可采取过滤、拦截等措施削减SS以有效去除径流中的COD。

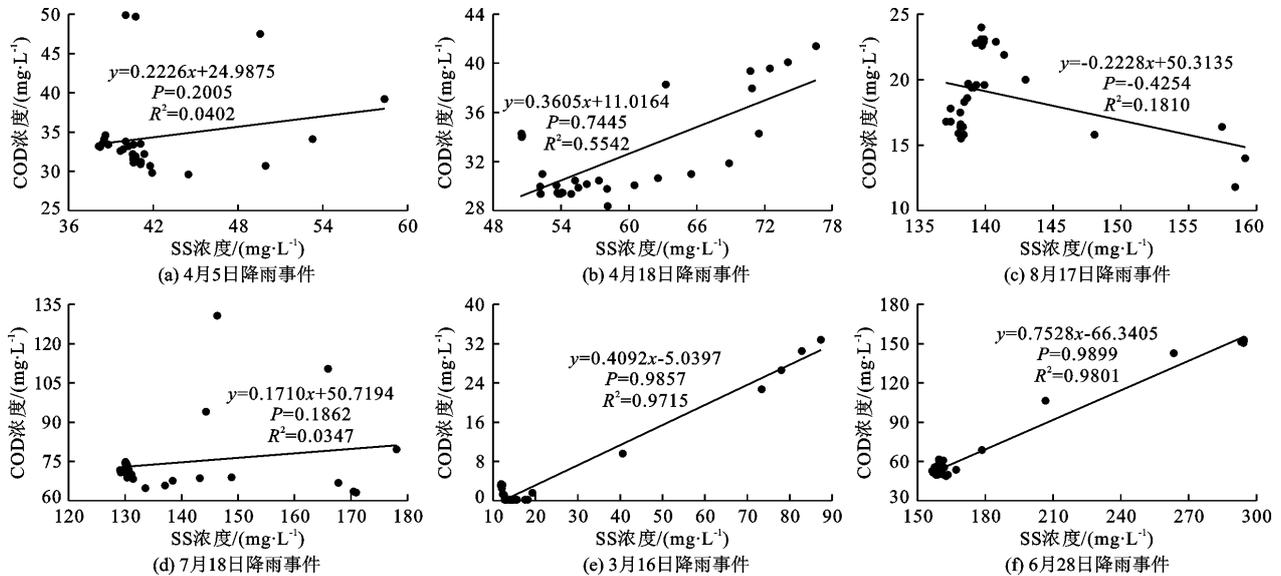


图3 6场次降雨事件屋面径流中COD与SS浓度皮尔逊相关性分析

3.2 屋面初期雨水污染物去除性能

选取试验期间不同月份及降雨特征的若干场次降雨事件,根据屋面径流水质检测结果,分析装配式高位花坛对屋面径流污染物SS、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和COD的去除效果,如图4所示。

由图4(a)可以看出,装配式高位花坛对屋面径流中SS的去除率为60.2%~96.3%,平均去除率为85.3%,出水SS浓度多在20.0 mg/L以下,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) I级B标准。生物滞留设施通过沉淀和过滤作用可有效去除SS^[22],屋面径流中的大颗粒固体通过覆盖层的碎石被截留,细小悬浮物不断被介质层吸附并且沉积,但介质层颗粒间隙也随之减小,因此长期运行会导致介质堵塞和其渗透系数的降低从而影响其处理效果^[23]。而本次试验的装配式高位花坛采用60%粗砂+15%细砂作为介质组分,特定的介质组分保证了良好的渗透性能,同时金森女贞发达的植物根系可以通过扩张和伸展在土壤中形成孔隙来保持土壤的渗透性^[24]。该装置的SS去除效果在试验后期仍维持在较高水平,说明渗透性良好的介质和发达的植物根系在缓解介质堵塞的同时还能保证设施的污染物去除性能。

生物滞留系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除主要依靠离子交换、介质吸附和微生物硝化作用。沸石孔隙度高、比表面积大且离子交换性好,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 具有较好的吸附效果^[25],同时带有正电荷的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 容易被土壤、砂和椰糠吸附^[26],因此装置的介质层组分有利于保持较好的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果;其次装置底部排水管末端安装有弯头,由此产生的内部蓄水區可以创造缺氧环境以促进脱氮效率^[27]。图4(b)表明,高位花坛对屋面径流中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率为29.4%~96.6%,平均去除率为66.2%,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度均符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II类水质标准。高位花坛对屋面雨水径流中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率大致与进水浓度呈正相关趋势,这与张海江等^[26]的研究结论一致,即生物滞留设施对雨水径流中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的削减率随进水浓度的增大而增大。

雨水径流中的COD以颗粒态和溶解态形式存在,颗粒态COD在径流下渗过程中被过滤并在干燥期被微生物分解为溶解态;溶解态COD首先被介质吸附,然后通过微生物降解被去除。图4(c)表明,高位花坛对屋面径流中COD的去除率为29.6%~90.3%,平均去除率为58.3%,平均出水COD浓度

为 22.5 mg/L 且多数低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) II 类水质标准。图 4(c) 中有 3 场次降雨事件高位花坛的出水 COD 浓度高于进水浓度,可能是介质中含有椰糠,腐烂的有机物被进水淋溶带出^[22];并且由于这 3 场次降雨事件的降雨间隔天数均为 0,连续进水条件下导致介质中的部分溶解性 COD 被淋洗出来,同时土壤入渗率增大导致水

力停留时间减少,与介质接触不充分也是 COD 去除效果降低的原因之一^[28]。

相关研究表明,介质的渗透系数是影响生物滞留系统去除 COD 效果的主要因素^[29],由于高位花坛在运行过程中会出现 COD 淋出现象,因此在今后的研究中需要对生物滞留介质进行优化以提高 COD 的去除效果。

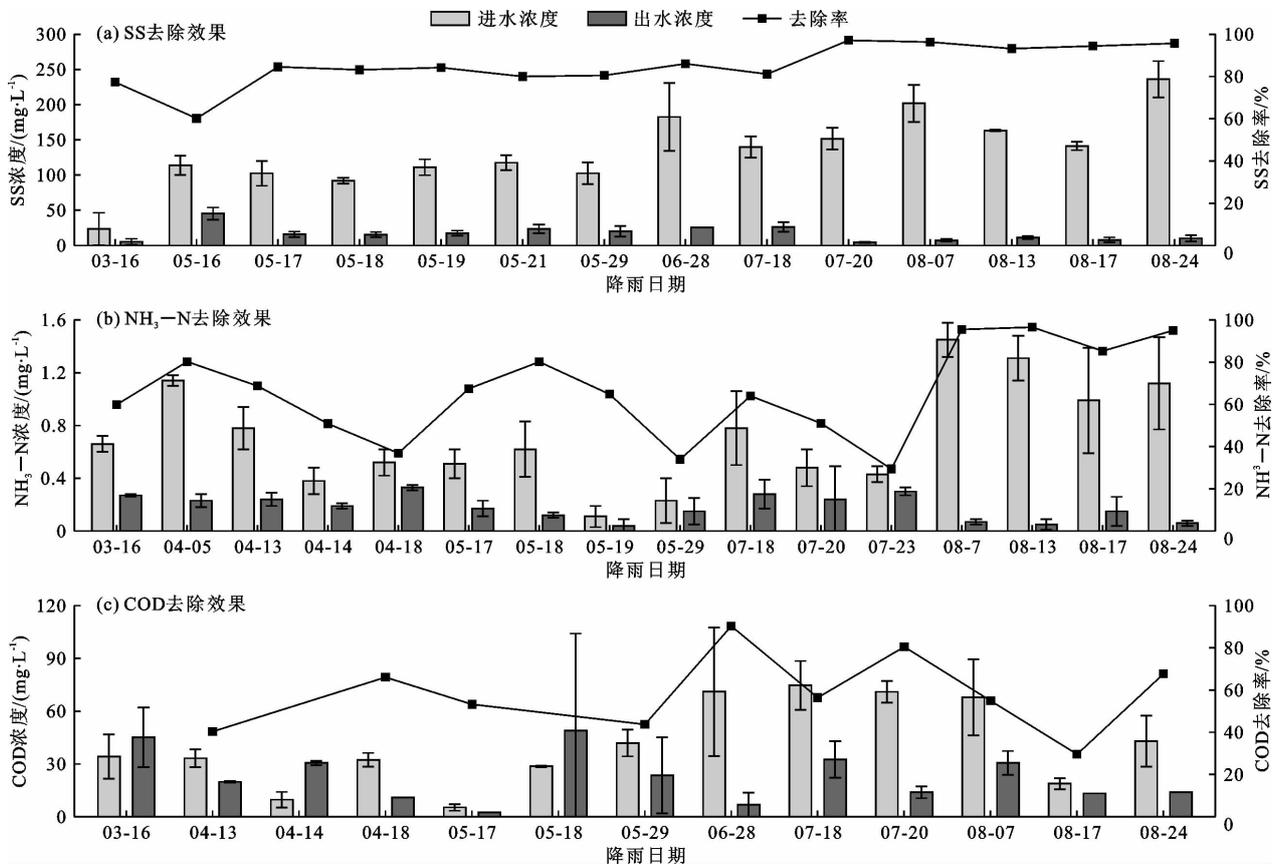


图4 试验期间若干场次降雨事件中高位花坛对屋面径流污染物的去除效果

3.3 微生物群落结构分析

将相对丰度占比低于前6的门类细菌合并为其他菌门,得到门水平细菌种群结构如图5所示。分析图5可知,高位花坛进、出水端6个土壤样品中细菌群落结构组成总体相似,但相对丰度有所差异,相对丰度排名前4的菌门为变形菌门、放线菌门、酸杆菌门和绿弯菌门,其总相对丰度占群落的75.2%~86.2%。

变形菌门是高位花坛土壤中的绝对优势菌门,相对丰度占比为30.0%~46.6%,该菌门含有亚硝化单胞菌属并且在脱氮、除磷及有机物降解过程中起重要作用^[30]。屋面径流多从进水端进入高位花坛,因此进水端污染物含量较高,而相关研究表明污染物的累积对土壤内部微生态系统有一定的影响^[31],污染物累积对放线菌门起促进作用,但会抑

制变形菌门、酸杆菌门和绿弯菌门的生长,污染物累积较少的出水端更有利于变形菌门的生存,因此变形菌门在出水端占比相对较高。放线菌门下的节杆菌属能够从植物根际获取营养物质促进植物生长且具有一定的硝化作用^[32],部分酸杆菌门可以降解纤维素及促进光合作用^[33],大量污染物在进水端被放线菌门和酸杆菌门降解利用并且促进植物的生长。虽然进水端的进水量和污染物负荷较大,但同时也为植物的生长提供了必要条件,发达的植物根系可以增加泌氧能力以激发好氧微生物如某些硝化菌群的活性^[34],并且由于底部排水管的设置,水分在进水端的扩散速度相对于出水端来说更高,水分扩散造成的水流势能可以不断运移土壤中的氧气而营造出适合硝化细菌生存的氧环境^[35],因此具有硝化功

能的放线菌门在进水端相对丰度高于出水端。绿弯菌门和厚壁菌门常被发现于厌氧废水处理系统中,且对反硝化过程至关重要^[36-37],两者在 GEW₁ 和 GEE₂ 样品中的相对丰度远高于其他样品,而反硝化作用需要的碳源来自雨水径流,结合变形菌门的分布情况,侧面说明不同的进水条件下径流污染物更多被截留在出水端中间层和进水端表层,在后续研究中需注意介质层的更换厚度。

本试验中生物滞留设施涉及氮素循环的主要细菌为变形菌门、放线菌门、绿弯菌门和厚壁菌门,变形菌门作为占比最高的优势菌门,不仅是氮转化过程的重要细菌,还和酸杆菌门共同参与有机物降解过程,在去除 COD 方面发挥作用;放线菌门和酸杆菌门是维持植物正常生长的必要细菌。微生物是生物滞留系统控制径流水质不可缺少的一环,对系统中微生物的探究有利于了解植物、介质和微生物在去除污染物过程中的协同机制,为介质组分的优化及构建高性能生物滞留系统提供理论参考。

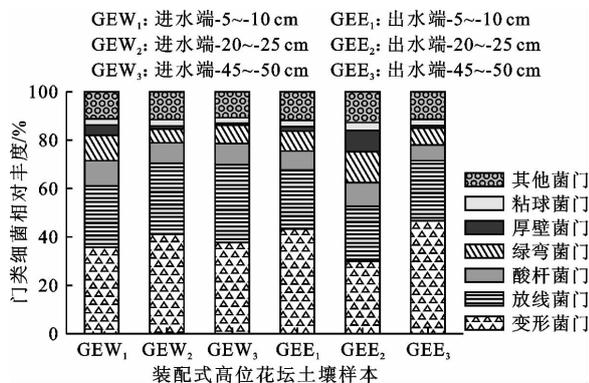


图5 高位花坛细菌门水平群落结构

4 结论与展望

(1)在不同的雨量等级下,长沙市屋面初期雨水径流中 COD 和 SS 的峰值浓度分别为 22.9 ~ 153.0 mg/L 和 58.4 ~ 294.4 mg/L,存在较严重的初期径流污染效应,该两种污染物浓度随着降雨历时的增加而缓慢下降并趋于稳定,降雨量、降雨强度和降雨间隔时间的增加会加剧初期径流污染。屋面初期径流中 COD 和 SS 浓度具有一定的正相关性。

(2)屋面径流经装配式高位花坛净化后,COD、SS 和 NH₃-N 的平均去除率分别为 58.3%、85.3% 和 66.2%,特定的介质组分能够使高位花坛保持较好的污染物去除性能。

(3)变形菌门、放线菌门、酸杆菌门和绿弯菌门是高位花坛介质内的主要优势菌门,总相对丰度占

群落的 75.2% ~ 86.2%;作为绝对优势菌种的变形菌门在污染物去除方面发挥着重要作用,介质出水端更适合反硝化细菌(如厚壁菌门)的生存。

(4)改良介质的生物滞留设施对于屋面径流污染物有明显的去除效果,但本研究仅考察了装配式高位花坛在春夏季对 COD、SS 和 NH₃-N 3 种污染物的去除效果,下一阶段的研究重点为关键因子(如季节变化)对高位花坛长期运行性能的影响及其对其他污染物的去除效果。

参考文献:

- [1] HOU Jingwei, MAO Hongxin, LI Jianping, et al. Spatial simulation of the ecological processes of stormwater for sponge cities [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 574 - 583.
- [2] LOPEZ - PONNADA E V, LYNN T J, ERGAS S J, et al. Long-term field performance of a conventional and modified bioretention system for removing dissolved nitrogen species in stormwater runoff [J]. Water Research, 2020, 170: 115336.
- [3] 钟登杰,张湖川,李林澄,等.城市初期雨水污染及处理措施综述[J].环境污染与防治,2019,41(2):224 - 230.
- [4] 张瀚文,张志勇,郭文景,等.典型城市居民集中区初期降雨径流污染特征和生物炭对其氮磷去除效果研究[J].安全与环境工程,2022,29(2):120 - 131 + 150.
- [5] 岳桢铎,李一平,周玉璇,等.南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析[J].环境科学,2022,43(4):2018 - 2029.
- [6] 席玥,郭婧,陶蕾,等.北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析[J].环境科学,2022,43(6):3177 - 3186.
- [7] KONG Zheng, SHAO Zhiyu, SHEN Yue, et al. Comprehensive evaluation of stormwater pollutants characteristics, purification process and environmental impact after low impact development practices [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123509.
- [8] JIANG Chunbo, LI Jiake, LI Huaien, et al. Field performance of bioretention systems for runoff quantity regulation and pollutant removal [J]. Water Air and Soil Pollution, 2017, 228: 468.
- [9] 李亚娇,赵凌志,李家科,等.生物滞留系统对城市降雨径流病原微生物的去除效果及机理研究进展[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):14 - 22.
- [10] 姜登岭,张丹荣,何连生,等.生物滞留设施净化城市面源污染研究进展[J].环境工程技术学报,2019,9(1):96 - 102.
- [11] HE Weining, LIN Xiao, SHI Zhou, et al. Nutrient removal performance and microbial community analysis of amended bioretention column for rainwater runoff treatment [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 374: 133974.

- [12] JIANG Chunbo, LI Jiake, LI Huaien, et al. Nitrogen retention and purification efficiency from rainfall runoff via retrofitted bioretention cells [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 220: 25 – 32.
- [13] 赵凡, 王洪浩, 李京玲, 等. 改良黄土填料对生物滞留系统雨水径流氮素的去除效果 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40(9): 74 – 78.
- [14] 陈望, 陈莹, 赵剑强, 等. 雨水斗截污装置对屋面初期雨水净化规律及关键参数设计 [J]. *环境工程学报*, 2020, 14(7): 1799 – 1807.
- [15] 谢尚宇, 邱春生, 赵晓佳, 等. 天津市居民区不同材质屋面降雨径流污染特征分析 [J]. *环境工程*, 2022, 40(1): 38 – 45.
- [16] 车伍, 张伟, 李俊奇. 城市初期雨水和初期冲刷问题剖析 [J]. *中国给水排水*, 2011, 27(14): 9 – 14.
- [17] 朱甜甜, 于增知, 于晗, 等. 基于不同土地利用类型下的初期雨水径流污染特征分析与LID措施研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(3): 8 – 14.
- [18] FRIEDLER E, GILBOA Y, MUKLADA H. Quality of roof-harvested rainwater as a function of environmental and air pollution factors in a coastal mediterranean city (Haifa, Israel) [J]. *Water*, 2017, 9(11): 896.
- [19] 李俊奇, 戚海军, 宫永伟, 等. 降雨特征和下垫面特征对径流污染的影响分析 [J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(9): 47 – 52 + 59.
- [20] 张伟, 罗乙兹, 钟兴, 等. 北京市中心城区某沥青屋面和金属屋面径流污染特征 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(23): 358 – 365.
- [21] 张仪, 姜应和, 程静, 等. 基于水质水量监测的武汉市雨水径流污染特征分析 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40(1): 52 – 55.
- [22] 仇付国, 陈丽霞. 雨水生物滞留系统控制径流污染物研究进展 [J]. *环境工程学报*, 2016, 10(4): 1593 – 1602.
- [23] COUSTOMER S L, FLETCHER T D, DELETIC A, et al. The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: a large-scale column study [J]. *Water Research*, 2012, 46(20): 6743 – 6752.
- [24] SZATANIK – KLOC A, HORN R, LIPIEC J, et al. Initial growth and root surface properties of dicotyledonous plants in structurally intact field soil and compacted headland soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104387.
- [25] 王金丽, 孙永利, 郑华清, 等. 基于径流污染控制的生物滞留设施填料优化研究 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(1): 110 – 116.
- [26] 张海江, 陈研, 杨天宇, 等. 生物滞留设施处理地表径流污染物的试验研究 [J]. *森林工程*, 2020, 36(3): 112 – 118.
- [27] LIU Jia, SAMPLE D J, BELL C, et al. Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater [J]. *Water*, 2014, 6(4): 1069 – 1099.
- [28] 刘芳, 侯立柱. 土壤渗滤介质系统去除雨水径流污染物 [J]. *环境工程学报*, 2012, 6(12): 4294 – 4298.
- [29] 胡爱兵, 李子富, 张书函, 等. 模拟生物滞留池净化城市机动车道路雨水径流 [J]. *中国给水排水*, 2012, 28(13): 75 – 79.
- [30] ZHANG Huanjun, WANG Lei, LI Yi, et al. Background nutrients and bacterial community evolution determine $^{13}\text{C} - 17\beta - \text{estradiol}$ mineralization in lake sediment microcosms [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651 (Part 2): 2304 – 2311.
- [31] ZHANG Zhaoxin, LI Jiake, LI Yajiao, et al. Assessment on the cumulative effect of pollutants and the evolution of micro – ecosystems in bioretention systems with different media [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 228: 112957.
- [32] CAMPOS M, PERRUCHON C, KARAS P A, et al. Bioaugmentation and rhizosphere-assisted biodegradation as strategies for optimization of the dissipation capacity of biobeds [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 187: 103 – 110.
- [33] EICHORST S A, KUSKE C R, SCHMIDT T M. Influence of plant polymers on the distribution and cultivation of bacteria in the phylum *Acidobacteria* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, 77(2): 586 – 596.
- [34] 罗敏, 黄佳芳, 刘育全, 等. 根系活动对湿地植物根际铁异化还原的影响及机制研究进展 [J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 156 – 166.
- [35] 陈垚, 程启洪, 郑爽, 等. 干湿交替对生物滞留系统中氮素功能微生物群落的影响 [J]. *微生物学报*, 2020, 60(3): 533 – 544.
- [36] 刘珂, 吴莎, 陈婧, 等. 新型单级强化自养脱氮系统关键因子优化研究 [J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(2): 28 – 36.
- [37] 王雨轩, 魏巍, 李萍萍, 等. 人工湿地微生物的研究进展 [J]. *生物技术通报*, 2017, 33(10): 74 – 79.