

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.021

生物滤池/生物滞留池组合设施控制 CSO 污染的效果

马晶伟¹, 林 潇¹, 施 周¹, 贺卫宁², 陈世洋², 陆先镭², 陈 蕃²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410007)

摘 要: 针对目前合流制溢流(CSO)污染严重的问题,开展了生物滤池/生物滞留池组合设施去除 CSO 污染物的研究。首先探讨了砾石、火山岩、陶粒、沸石等 4 种生物滤池填料对 N、P 的吸附和解吸附特性,然后通过模拟柱试验分析了含不同填料的生物滤池对 CSO 污染物的去除效果。结果显示,火山岩填料对 CSO 污染物的去除效果最佳。在此基础上,将火山岩填料生物滤池与改良介质填料生物滞留池组合起来,探究不同水力负荷和不同污染负荷下组合设施对 CSO 污染物的去除效果。结果表明,当水力负荷较低时组合设施对 CSO 污染物的去除效果较好,而当水力负荷较高时组合设施对 TN 和 COD 的去除效果不稳定;不同污染负荷下组合设施对 CSO 污染物均具有较好的去除效果。

关键词: 合流制溢流污染; 生物滤池; 生物滞留池; 填料

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)19-0131-08

Control Effect of Combined Process of Biofilter and Bioretention Ponds on CSO Pollution

MA Jing-wei¹, LIN Xiao¹, SHI Zhou¹, HE Wei-ning², CHEN Shi-yang²,
LU Xian-lei², CHEN Fan²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. China Machinery International Engineering Design & Research Co. Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: The removal of pollutants in the combined sewer overflow (CSO) by a combined process of biofilter and bioretention pond was investigated to solve this serious pollution problem. Firstly, the N and P adsorption and desorption characteristics of four kinds of biofilter media (gravel, volcanic rock, ceramsite and zeolite) were discussed. Then, the removal performance of the CSO pollutants in the biofilter containing different media was analyzed by simulated column experiments. The volcanic rock medium had the best removal effect on the CSO pollutants. On this basis, the biofilter with medium of the volcanic rock and the biofilter with the modified medium were combined to explore the removal performance of the CSO pollutants under different hydraulic loads and different pollution loads. The combined process had a better removal effect on the CSO pollutions when the hydraulic loads were low, while the facility had an unstable removal effect on the TN and COD when the hydraulic load was high. The combined process had a good removal effect on the CSO pollutants under different pollution loads.

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2018NK205402); 国机集团重大科技专项(SINOMAST-ZDZX-2017-07 号)
通信作者: 贺卫宁 E-mail:136340101@qq.com

Key words: combined sewer overflow (CSO) pollution; biofilter; bioretention pond; media

随着污水处理技术的不断改进和创新,点源污染已得到了初步控制,而截流倍数较低的截流式合流制排水系统造成的合流制溢流(CSO)等面源污染逐渐成为制约我国水环境质量改善的主要障碍^[1]。CSO污染的治理方式大致可分为3类:源头、过程以及末端控制。虽然3种措施都能在一定程度上控制CSO污染,但源头和过程控制不能完全解决问题,如果降雨过多,最终还是会造成溢流。所以,末端控制是最全面、最有效和最快的解决方案^[2]。常用的末端控制措施主要有溢流调蓄池、化学增强的一级处理、垂直流人工湿地等。但是,由于CSO排放点通常不易到达,且往往空间受限,导致这些设施的设计、运营和管理较为复杂。

生物滞留池由于能够有效控制面源污染,同时在尺寸、布局、位置等方面比较灵活,已逐渐成为国外广泛应用的雨水径流处理系统。近年来,随着我国海绵城市建设的逐步发展,生物滞留池逐渐引起国内相关科研人员的重视,并开始探讨其处理各种来源污水的可行性^[3-5]。相对于雨水径流,CSO污水中污染物浓度较高,同时参考本地海绵城市建设实际经验,若单独设置生物滞留池处理CSO污水,高浓度有机物会导致生物滞留池在短期内就出现堵塞和泄漏的风险。鉴于此,笔者在考虑采用生物滞留池控制CSO污染时,在其前面增加生物滤池作为一级预处理工艺,同时探究对CSO污染物去除效果较好、耐冲击负荷的生物滤池填料,并在此基础上考察不同水力负荷和污染负荷条件下生物滤池/生物滞留池组合设施对CSO污染物的去除效果,以期开发一种结构简单、节省空间、维护方便且能够同时去除多种污染物的新型处理设施和组合方案。

1 试验材料和方法

1.1 试验装置

试验采用直径为200 mm、高分别为2 000 mm(一级生物滤池)和1 400 mm(二级生物滞留池)的HDPE圆柱形装置,见图1。一级生物滤池自上而下依次为100 mm蓄水层、1 600 mm填料层、200 mm砾石排水层,填料层采用粒径为20~30 mm砾石、火山岩、陶粒或沸石;砾石排水层采用粒径为40~50 mm的砾石。二级生物滞留池自上而下依次为150 mm蓄水层、50 mm覆盖层、800 mm填料层、300

mm砾石排水层。为避免植物生长情况不同的干扰,本试验柱中不种植植物。覆盖层使用树皮,既防止径流冲刷,又为系统提供外加碳源;砾石排水层同上;按照国内外生物滞留池的经验^[6-8],填料层采用90%传统生物滞留介质(60%粗砂+15%细砂+25%种植土)+5%给水厂污泥+5%椰糠(体积比)均匀混合而成;填料层与砾石层之间添加土工布用于防止填料被冲刷进入砾石层。

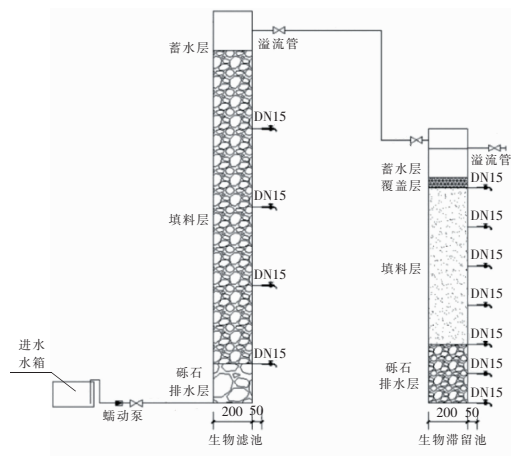


图1 生物滤池/生物滞留池组合设施

Fig.1 Schematics of biofilter/bioretention pond combined facilities

1.2 试验材料

① 生物滤池/生物滞留池填料

填料主要为沸石(粒径20~30 mm)、陶粒(粒径20~30 mm)、火山岩(粒径20~30 mm)、砾石(粒径20~30、40~50 mm)、粗砂(粒径0.5 mm以上、细度模数为3.1~3.7)、细沙(粒径0.25~0.35 mm、细度模数为1.6~2.2)、种植土、椰糠、树皮、给水厂污泥。除给水厂污泥(取自长沙某自来水厂)外,其余均购自河南某净水材料公司。

② 试验用水

试验用水采用实际CSO污水,取自长沙市湘江沿岸某溢流井,水质浓度以实测为准。由于不同浓度梯度的CSO污水难以取得,不同负荷CSO污水采用自来水按比例稀释实际CSO污水后得到。

1.3 试验方法

① 生物滤池填料对N、P的吸附试验

对预选的生物滤池填料(砾石、火山岩、沸石和陶粒)进行初步冲洗,去除填料表面的无机盐、有机

物等杂质的干扰,在自然状态下风干约5~10 d。在250 mL的锥形瓶中先分别加入1 g上述填料,再分别加入50 mg/L的 NH_4Cl 溶液和4 mg/L的 KH_2PO_4 溶液150 mL,然后在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、 $(150 \pm 5) \text{ r/min}$ 的条件下恒温振荡,于0.5、1、1.5、3、6、12和24 h分别取其上清液,过滤后测定N、P浓度。

② 生物滤池填料对N、P的解吸附试验

在250 mL的锥形瓶中先分别加入1 g上述饱和和吸附填料,再加入100 mL蒸馏水,其余试验条件同上,进行恒温振荡,48 h后取其上清液,过滤后测定N、P浓度。

③ 填料对生物滤池除污效果的影响试验

将经过初步清洗优选的填料装填在生物滤池试验柱中,先用自来水作为进水,连续冲刷2周,洗掉填料表面的杂质,并检测出水水质。待水质稳定后,采用CSO污水为进水,每2 d进水一次,每次8 h,同时检测出水水质。一个月后,出水COD、N、P等浓度最终稳定,同时观察到装置内有生物膜存在,表明驯化阶段结束,可进入正式试验阶段。正式试验时,每个测试周期持续2 d,即模拟CSO进水2 h,然后落干。于生物滤池进水口、填料厚度400和800 mm(以进水经过的生物滤池填料层厚度计)取样口、出水口处分别取样分析。

④ 水力负荷对组合设施除污效果的影响试验

将生物滤池和生物滞留池试验柱串联连接,一级生物滤池装填上述试验筛选出的最优填料,二级生物滞留池按照试验设置依次装填各层介质。生物滤池底部进水、上部出水,并串联生物滞留池上部进水、底部出水,然后依照上述相同方法驯化,待驯化挂膜成功后开始正式试验。试验时设置不同进水水力负荷即1.0、1.5、2.0、2.5 m/h,其余运行条件与上述试验一致。于组合设施进水口、生物滤池出水口、生物滞留池填料深度400 mm(以进水经过的生物滞留池填料层厚度计)取样口、组合设施出水口处分别取样分析。

⑤ 污染负荷对组合设施除污效果的影响试验

将CSO污水用自来水稀释成不同浓度梯度(1:0、1:1、1:2和1:4),进水水力负荷为1.0 m/h,其余运行条件及取样位置与上述试验一致。

⑥ 检测分析方法

COD:快速消解分光光度法,TP:钼酸铵分光光度法, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$:纳氏试剂分光光度法,TN:碱性过硫

酸钾消解—紫外分光光度法。

2 结果与讨论

2.1 生物滤池填料对N、P的吸附特性

砾石、火山岩、沸石和陶粒4种生物滤池填料对水中氨氮的吸附量变化如图2所示。吸附开始时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附量快速升高,经过2.0 h左右4种填料的吸附量均达到80%以上,之后吸附速率逐渐降低,最后吸附量保持稳定并达到饱和。在吸附的初期阶段,吸附过程为以膜扩散为主的快速物理吸附,可供利用的吸附点较多,所以吸附速度很快。但随着吸附的进行,吸附点逐渐被利用,吸附速度变缓;之后 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向填料内部扩散,并与填料内活性位发生表面络合反应,即离子交换,吸附量进一步增加。吸附饱和时,4种填料对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附量排序为:沸石>火山岩>陶粒>砾石。

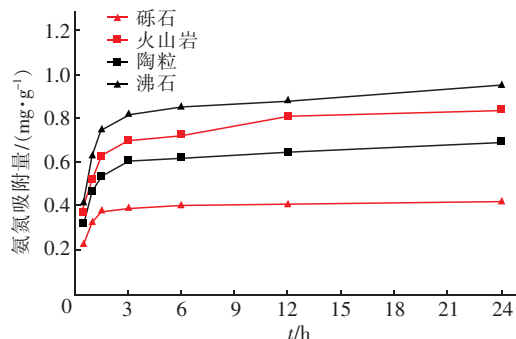


图2 不同生物滤池填料对氨氮的吸附曲线

Fig. 2 Adsorption curves of ammonia nitrogen on different biofilter media

4种填料对磷的吸附规律与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 类似。当吸附饱和时,陶粒、沸石和火山岩的吸附量差异不大且优于砾石,主要是因为这3种填料比表面积较大、孔隙结构发达并且含有金属离子(如Al、Fe、Ca等),这些金属离子可以与磷酸盐相结合,这些均有利于填料对磷的吸附。吸附饱和时4种填料对磷的吸附量排序为:火山岩>沸石>陶粒>砾石。

2.2 生物滤池填料对N、P的解吸附特性

在水处理中,除了考虑填料的吸附效率和吸附量,还应考虑填料的解吸率,以免氮、磷等污染物重新释放,引起二次污染^[9]。为此,试验考察了4种填料吸附饱和后的解吸附特性。

填料对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附作用主要有离子交换与物理吸附。在本试验中,砾石、陶粒、沸石和火山岩对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的解吸率分别为45.6%、40.4%、

33.3%和21.4%。有研究表明,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附,陶粒以物理吸附为主,而火山岩和沸石则主要为离子交换^[10]。通过对比分析,火山岩和沸石的剩余吸附量较其他两者要高。因此,在吸附 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 方面,火山岩和沸石要优于砾石和陶粒。

火山岩、砾石、陶粒、沸石对磷的解吸率分别为20.40%、11.40%、10.63%和10.43%,其中火山岩的解吸率最大,其余3种填料相差不大但均大于10%,大量使用时应考虑磷释放风险。通过对比可知,火山岩、沸石和陶粒的剩余吸附量比较接近。

2.3 填料对生物滤池除污效果的影响

火山岩、砾石、陶粒、沸石等4种生物滤池填料对CSO污染物的去除效果如图3所示。

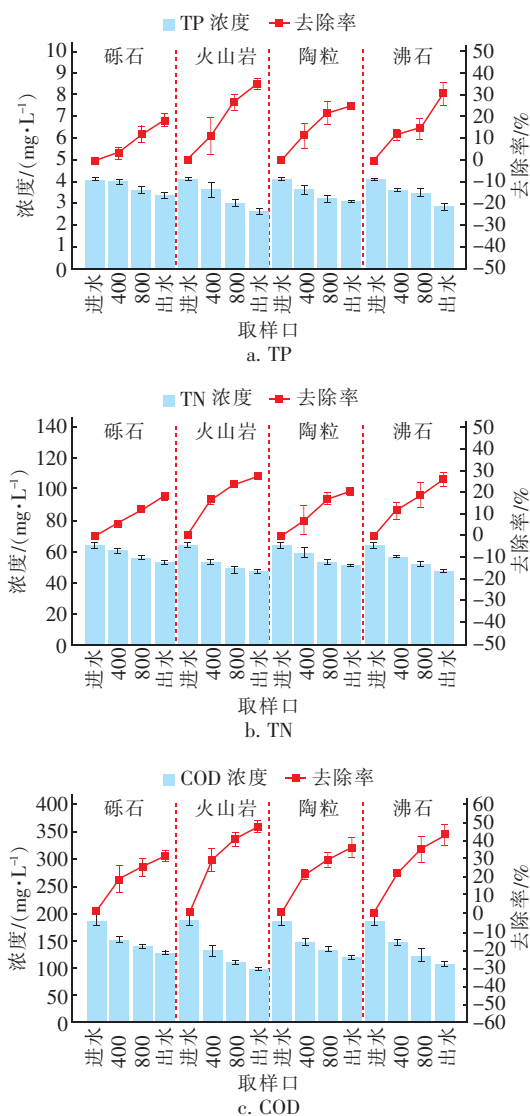


图3 不同填料生物滤池对污染物的去除效果

Fig.3 Removal of pollutants by biofilter with different media

在生物滤池中,作为微生物载体的填料,是系统功能发挥的关键因素。考虑到各填料的性质和获取的难易程度及价格,本研究初步优选出火山岩、沸石、陶粒和砾石作为生物滤池的填料,如图3(a)所示,这4种填料生物滤池对TP的去除率分别为35.04%、30.52%、24.64%和18.37%,出水TP浓度分别为2.68、2.87、3.11和3.37 mg/L。同一填料生物滤池,随取样深度的增加,TP去除率逐渐增加,出水浓度逐渐减少,同时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、COD、SS等指标也呈现类似规律。出水TP浓度的降低与填料的吸附和聚磷菌等微生物的除磷作用有关,但也有研究表明,生物滤池中微生物的除磷作用有限,在实际工程中通常通过投加混凝剂进行化学除磷来增强生物滤池的除磷效果^[11]。

如图3(b)所示,4种填料生物滤池对TN的去除率高低顺序为:火山岩(27.18%)>沸石(26.15%)>陶粒(20.46%)>砾石(17.72%),出水TN浓度分别为46.41、47.03、50.68和52.43 mg/L。CSO污水中TN主要为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和有机氮等,其中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量极少,一般不作考虑; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 主要是由反硝化菌在缺氧条件下去除;溶解性有机氮主要在微生物作用下被矿化为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,然后被进一步去除;颗粒态有机氮则主要通过填料层过滤、吸附作用而被去除。当TN浓度较高时,可以通过曝气强化硝化作用,同时增设缺氧段进行出水回流强化反硝化作用,以此提高生物滤池对TN的去除效果^[12]。

如图3(c)所示,火山岩、沸石、陶粒和砾石4种填料生物滤池出水COD浓度分别为97、105.67、118和127.33 mg/L,相应的去除率为47.73%、42.98%、36.35%和31.43%。大部分有机物通过填料的吸附作用得以去除,一些小分子有机物能够被微生物直接利用,其他大分子有机物则先被微生物分解为小分子有机物,然后再被吸附或利用。

另外,不同填料对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率高低顺序为:火山岩(41.62%)>沸石(32.01%)>陶粒(28.64%)>砾石(21.70%),出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度分别为27.16、31.65、33.23和36.46 mg/L。此结果与4种填料对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附特性规律略有不同,表明除了填料的吸附作用外,还有硝化菌等微生物也参与了生物滤池中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除过程。4种填料对SS的去除率高低顺序为:火山岩(53.15%)>沸

石(46.47%) > 陶粒(43.43%) > 砾石(31.86%), 出水SS浓度分别为51.87、59.23、62.63和75.37 mg/L,与其他污染物去除规律相似。

综合来看,火山岩填料生物滤池对CSO污染物的净化效果最佳,因此选择火山岩填料生物滤池与后续的生物滞留池进行组合。

2.4 水力负荷对组合设施去除污染物的影响

CSO水量具有瞬时性和间歇性等特点,且与径流量、管道输水能力和截流倍数等参数关系密切^[2]。而我国地域广阔,各地各季节降雨量、径流量差别较大,同时各城市建设所采用的截流倍数也各有不同。因此,研究不同水力负荷下生物滤池/生物滞留池组合设施对CSO污水的净化效果,可以为该设施更好地推广应用提供技术支撑。在进水水力负荷分别为1.0 m/h(I)、1.5 m/h(II)、2.0 m/h(III)、2.5 m/h(IV)条件下,生物滤池/生物滞留池组合设施对CSO污染物的去除效果如图4所示。

如图4(a)所示,生物滤池/生物滞留池组合设施出水TP浓度随着水力负荷的提高而逐渐增加,但基本上都满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B标准。TP去除率随着水力负荷的提高逐渐下降,经一级生物滤池处理后,TP去除率分别为31.10%、25.05%、21.98%和19.67%;再经生物滞留池处理后,TP去除率分别达到70.49%、60.71%、55.46%和47.32%。组合设施对TP的去除主要是填料的吸附作用和聚磷菌等微生物的降解作用。此外生物滞留池采用的改良介质填料中还添加了给水厂污泥,其所含的铝、铁等离子会与磷发生螯合作用,对除磷亦有较大贡献^[13-14]。与此同时,水力负荷越小,CSO污水在设施中的停留时间越长,可以增加填料和微生物的接触时间,从而提高磷的去除效果。

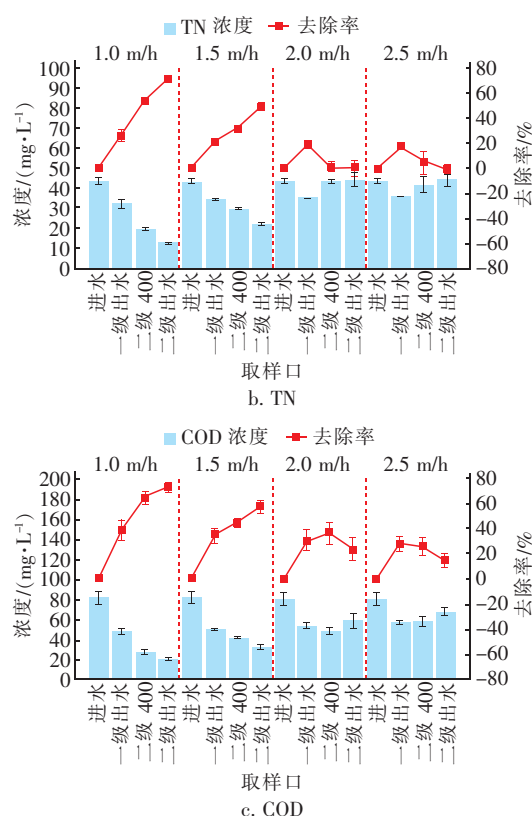
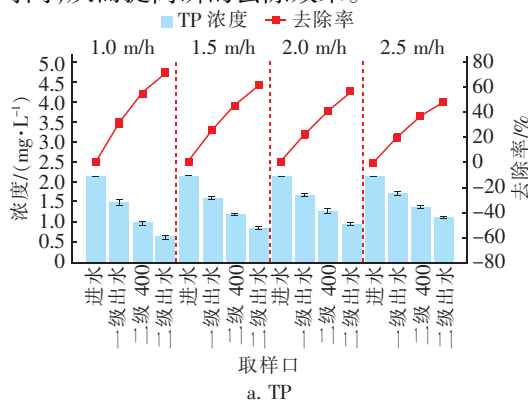


图4 不同水力负荷下生物滤池/生物滞留池组合设施对污染物的去除效果

Fig.4 Removal of pollutants in biofilter/ bioretention pond combined facilities under different hydraulic loads

在不同水力负荷条件下,组合设施对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 均具有较好的去除能力,但随着水力负荷的增加, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果逐渐下降。其中,经一级生物滤池处理, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为: I (40.16%) > II (34.41%) > III (25.59%) > IV (20.57%);再经生物滞留池处理, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为: I (88.35%) > II (82.59%) > III (74.67%) > IV (67.73%)。出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度随水力负荷的提高而逐渐上升,低负荷时可满足国家一级A标准,而高负荷时仅能达到国家一级B标准。水力负荷越大,水体流速就越快,CSO污水在填料层的水力停留时间就越短,从而降低了填料对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的快速吸附和过滤作用,同时也减少了硝化细菌与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的接触反应时间,从而降低了组合设施对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果。

如图4(b)所示,在各水力负荷下,组合设施对TN的去除效果差异较大。在高负荷下生物滞留池试验柱400 mm取样口及组合设施出水口水样均出现淋析现象,而在低负荷下TN去除效果较好,出水

TN 浓度基本可满足国家一级 B 标准。其中,经一级生物滤池处理后,TN 去除率为: I (26.13%) > II (21.22%) > III (19.00%) > IV (16.61%);再经生物滞留池处理后,TN 去除率为: I (70.84%) > II (49.11%) > III (-0.28%) > IV (-0.40%)。组合设施对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果较好且在不同水力负荷下相对稳定;对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除主要靠填料的吸附、过滤和微生物的反硝化作用,反硝化受环境中氧和碳源的限制而作用有限;同时水力负荷过大容易把生物滞留池填料中的有机氮冲刷出来,这些都会影响对 TN 的去除效果。

如图 4(c) 所示,组合设施对 COD 的去除规律与 TN 类似。在最高负荷时生物滞留池试验柱 400 mm 取样口及组合设施出水口水样均出现了淋析现象,在低负荷下出水 COD 浓度能满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类标准。其中,经一级生物滤池处理后,COD 去除率为: I (40.29%) > II (35.85%) > III (32.00%) > IV (28.87%);再经生物滞留池处理后,COD 去除率为: I (74.74%) > II (59.01%) > IV (24.86%) > III (15.78%)。当水力负荷较大时,设施内的滤速较大,水力停留时间较短,同时生物滞留池填料中所含的有机物有可能被冲刷出来,从而影响 COD 的去除效果。

另外,在不同的水力条件下,组合设施对 SS 均具有较好的去除效果,经一级生物滤池处理后,SS 去除率分别为 39.60%、34.37%、27.77% 和 23.39%;再经生物滞留池处理后,SS 去除率分别为 76.59%、71.68%、69.13% 和 67.14%,出水 SS 浓度基本可达到国家一级 B 标准。水力负荷对一级生物滤池影响较大,对二级生物滞留池影响较小,可能是一级生物滤池的填料粒径较大,当水力负荷较大时,填料的吸附作用得不到很好的发挥;二级生物滞留池填料层 400 mm 深度处的 SS 去除率在不同水力负荷下均能达到 40% 以上,且在同一水力负荷下,二级设施填料层 400 mm 深度处水样和最终出水 SS 浓度的变化幅度更小,因此二级设施的 SS 去除主要由上层填料完成。

2.5 污染负荷对组合设施去除污染物的影响

CSO 污染负荷因受降雨及径流特征、污水水量及浓度、合流制管道截流倍数和管道沉积物等因素影响而变化幅度较大,为此探究了不同污染负荷下 [CSO 污水与自来水的比例为 1:0 (I)、1:1

(II)、1:2 (III)、1:4 (IV)] 生物滤池/生物滞留池组合设施对 CSO 污染物的去除效果,结果见图 5。

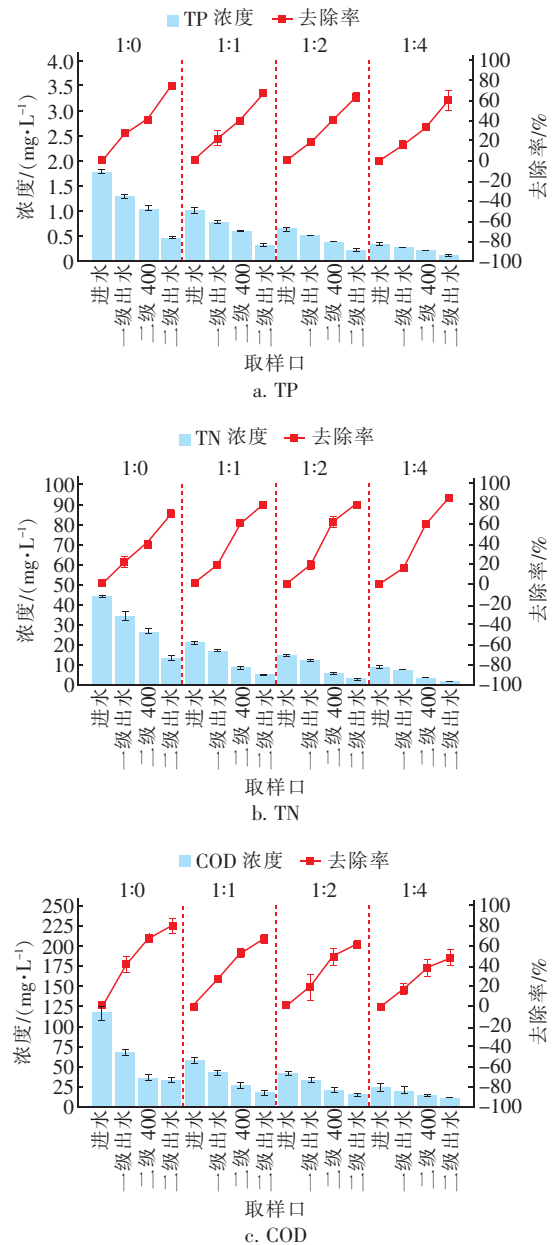


图5 不同污染负荷下生物滤池/生物滞留池组合设施对污染物的去除效果

Fig. 5 Removal of pollutants in biofilter/ bioretention pond combined facilities under different pollution loads

如图 5(a) 所示,随着污染负荷的降低,一、二级设施对 TP 的去除率均逐渐降低,其中,一级生物滤池的 TP 去除率分别为 28.08%、23.04%、18.58% 和 16.17%,再经二级生物滞留池处理后,TP 去除率分别达到了 74.37%、66.92%、63.90% 和 60.15%;组合设施出水 TP 浓度亦逐渐降低,高负

荷时满足地表水环境Ⅴ类标准,低负荷时可满足地表水环境Ⅲ类标准。

另外,在各污染负荷下,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均较低,高负荷时略超过地表水环境Ⅴ类标准,低负荷时则可满足地表水环境Ⅱ类标准。一级生物滤池对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率随着污染负荷的降低而降低:Ⅰ(37.16%) > Ⅱ(31.22%) > Ⅲ(28.10%) > Ⅳ(25.80%),组合设施对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率则随着污染负荷的降低而升高:Ⅰ(86.10%) < Ⅱ(88.50%) < Ⅲ(89.07%) < Ⅳ(90.60%),但整体相差不大,且均在85%以上,表明在不同污染负荷下,组合设施对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 均具有很好的去除效果。

如图5(b)所示,随着污染负荷的降低,组合设施出水TN浓度逐渐降低,低负荷时满足地表水环境Ⅳ类标准,高负荷时满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级A标准。TN去除率变化规律与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 类似,其中一级生物滤池的TN去除率为:Ⅰ(21.82%) > Ⅱ(20.37%) > Ⅲ(19.56%) > Ⅳ(16.13%);组合设施对TN的总去除率为:Ⅰ(70.44%) < Ⅱ(78.29%) < Ⅲ(80.24%) < Ⅳ(84.96%)。

如图5(c)所示,随着污染负荷的降低,生物滤池及组合设施对COD的去除率均逐渐降低。其中,一级生物滤池对COD的去除率分别为41.28%、27.76%、19.04%和17.48%,组合设施对COD的总去除率分别为79.38%、67.39%、61.71%和48.92%。高负荷时出水COD浓度可满足地表水环境Ⅳ类标准,而低负荷时可满足地表水环境Ⅰ类标准。虽然低负荷时去除率较低,但由于进水浓度较低,故出水COD浓度反而达到了更高的排放标准。

设施出水SS浓度随污染负荷的降低而降低,高负荷时略超过GB 18918—2002的一级B标准,低负荷时则可满足GB 18918—2002的一级A标准。生物滤池及组合设施对SS的去除率均随污染负荷的降低而减小,其中生物滤池对SS的去除率分别为37.56%、25.97%、19.67%和15.03%,组合设施对SS的去除率分别为74.88%、63.17%、61.74%和58.00%。

3 结论

火山岩、沸石和陶粒对磷的吸附效果明显优于砾石,而火山岩和沸石对氮的吸附效果明显优于砾石和陶粒。砾石、火山岩、陶粒和沸石4种填料生物

滤池对CSO污水中氮、磷的去除率均较低,而对COD和SS的去除效果稍好,综合比较,火山岩填料生物滤池对CSO污染物的去除性能最优。不同水力负荷条件下,生物滤池/生物滞留池组合设施对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果较好,对TP和SS有一定的去除作用,但对TN和COD的去除效果不稳定,低负荷时生物滞留池的处理效果较好,而高负荷时会出现淋析现象,在设施的后续应用中应设法提高其在高水力负荷下的TN和COD去除效果。不同污染负荷条件下,组合设施对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN均有较好的去除效果,对TP、COD和SS也有一定的去除作用,表明设施在不同的污染负荷下均能发挥较好的除污效果。

参考文献:

- [1] 闫攀,赵杨,车伍,等. 中国城市合流制溢流控制的系统衔接关系剖析[J]. 中国给水排水,2020,36(14): 37-45.
YAN Pan, ZHAO Yang, CHE Wu, et al. Analysis of the conjunctive relationship of urban combined sewer overflow control system in China[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 37-45 (in Chinese).
- [2] 佃柳,郑祥,郁达伟,等. 合流制管道溢流污染的特征与控制研究进展[J]. 水资源保护,2019,35(3): 76-83, 94.
DIAN Liu, ZHENG Xiang, YU Dawei, et al. Research progress on characteristics and control of combined sewer overflows pollution[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 76-83, 94 (in Chinese).
- [3] 张弘. 生物滞留池处理化粪池出水及其效能强化研究[D]. 南京:东南大学,2017.
ZHANG Hong. The Study on Bioretention Treating Effluent from Septic Tank and Methods to Enhance Its Pollutant Removal Efficiency[D]. Nanjing: Southeast University, 2017 (in Chinese).
- [4] 李磊,周克梅,王君嫻,等. 水力负荷对生物滞留池处理污水厂尾水的影响[J]. 中国给水排水,2018,34(23): 115-118.
LI Lei, ZHOU Kemei, WANG Junxian, et al. Influence of hydraulic load on treatment of tail water from wastewater treatment plant by bioretention pond[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(23): 115-118 (in Chinese).
- [5] 张忠祥. 生物滞留池处理乡村散养家禽径流污染的试验研究[D]. 南京:东南大学,2017.
ZHANG Zhongxiang. Experimental Study on Treatment

- of Abandoned Poultry Runoff Pollution in Rural Area by Bioretention Ponds [D]. Nanjing: Southeast University, 2017 (in Chinese).
- [6] TROWSDALE S A, SIMCOCK R. Urban stormwater treatment using bioretention [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 397(3/4): 167–174.
- [7] 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.
- HU Aibing, LI Zifu, ZHANG Shuhan, *et al.* Simulated bioretention pond for improving quality of stormwater runoff on urban traffic road [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(13): 75–79 (in Chinese).
- [8] 许萍, 黄俊杰, 张建强, 等. 模拟生物滞留池强化径流雨水中的氮磷去除研究 [J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(2): 107–112.
- XU Ping, HUANG Junjie, ZHANG Jianqiang, *et al.* Research on simultaneous removal of nitrogen and phosphorus in runoff rainwater by bioretention [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(2): 107–112 (in Chinese).
- [9] JIANG C, JIA L, ZHANG B, *et al.* Comparison of quartz sand, anthracite, shale and biological ceramsite for adsorptive removal of phosphorus from aqueous solution [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(2): 466–477.
- [10] 刘莹, 刘晓晖, 张亚茹, 等. 三种人工湿地填料对低浓度氨氮废水的吸附特性 [J]. *环境化学*, 2018, 37(5): 1118–1127.
- LIU Ying, LIU Xiaohui, ZHANG Yaru, *et al.* Adsorption properties of low concentration ammonia nitrogen wastewater by three constructed wetland fillers [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(5): 1118–1127 (in Chinese).
- [11] 张晓杰. 火山岩滤料曝气生物滤池污水处理实验研究 [J]. *山西建筑*, 2015(12): 126–127.
- ZHANG Xiaojie. Experimental study of biological aerated filter wastewater treatment technology with volcanic rock filter material [J]. *Shanxi Architecture*, 2015(12): 126–127 (in Chinese).
- [12] 黄晓龙. 海南火山岩滤料 BAF 处理城市污水的试验研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
- HUANG Xiaolong. Study on Municipal Wastewater Treatment Using Biological Aerated Filter with Hainan Volcanic Rock Filter Media [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014 (in Chinese).
- [13] 王建军, 李田, 张颖. 给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 [J]. *环境科学*, 2014, 35(12): 4642–4647.
- Wang Jianjun, LI Tian, ZHANG Ying. Water treatment residual as a bioretention media amendment for phosphorus removal [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(12): 4642–4647 (in Chinese).
- [14] 操家顺, 朱文杰, 李超, 等. 给水厂污泥作为人工湿地滤料对磷的去除效果研究 [J]. *环境科技*, 2015, 28(5): 16–20.
- CAO Jiashun, ZHU Wenjie, LI Chao, *et al.* The research of phosphate removal by using water treatment residuals as filter materials in constructed wetlands [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 28(5): 16–20 (in Chinese).

作者简介: 马晶伟 (1980–), 男, 甘肃陇西人, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水处理、有机废弃物资源化以及水环境治理技术。

E-mail: jma@hnu.edu.cn

收稿日期: 2020-09-08

修回日期: 2020-10-28

(编辑: 刘贵春)