

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.019

一种新型双重轮休式潜流湿地及其抗堵塞与去污效果

华祖林^{1,2,3}, 张子豪^{1,2}, 沈志伟⁴, 郑 杨^{1,2}, 顾 莉^{1,2,3}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098;
2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098;
4. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002)

摘要:为解决垂直潜流湿地易堵塞问题,设计了一种新型双重轮休式潜流湿地,该新型湿地通过控制进出水阀门开关实现预处理池和主体池上层的双重轮休以及水流方向的周期性改变,以提高防堵塞效果。在4个不同轮休周期工况下进行新型湿地对污染物去除效果的试验,确定其最佳轮休周期为5 d;在5 d轮休周期下运行新型湿地与传统潜流湿地,进行抗堵塞能力和去污效果的对比,运行40 d、140 d、160 d后,新型湿地的孔隙率分别为48.43%、46.36%和46.21%,传统湿地的孔隙率分别为46.89%、38.72%和44.37%,新型湿地基质孔隙率下降幅度小于传统湿地;运行160 d后,新型湿地NH₃-N、NO₃⁻-N、TN、COD、TP去除率分别为60.40%、70.80%、56.53%、53.12%和48.30%,传统湿地中这些污染物去除率分别为34.99%、51.70%、41.43%、29.84%和47.06%,新型湿地污染物去除率高于传统湿地,且新型湿地中这些污染物去除率下降幅度均小于传统湿地,整个运行过程中去除效果较为稳定。该新型湿地为有效缓解堵塞问题提供了一种新的解决途径。

关键词:新型湿地; 双重轮休; 水流方向; 周期性改变; 抗堵塞; 去污效果

中图分类号:X703 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0140-07

Anti-clogging and decontamination effects of a new type of dual rotation subsurface flow wetland//HUA Zulin^{1,2,3}, ZHANG Zihao^{1,2}, SHEN Zhiwei⁴, ZHENG Yang^{1,2}, GU Li^{1,2,3} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 4. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: A new type of dual rotation subsurface flow wetland was designed in order to solve the easy clogging problem of the vertical subsurface flow wetland. This new type of wetland realizes dual rotation of the pretreatment pool and the upper layer of the main pool and periodical change of the water flow direction through controlling the switch of the inlet and outlet valves, in order to improve the anti-clogging effect. A test on the pollutant removal effect of the new type of wetland was conducted under conditions of four different rotation periods, and the optimal rotation period was determined as five days. The anti-clogging ability and decontamination effect of the new type of wetland operated under the 5-day rotation period and the traditional subsurface flow wetland were compared. After 40, 140, and 160 days of operation, the porosities of the new type of wetland were 48.43%, 46.36%, and 46.21%, respectively, and the values of the traditional wetland were 46.89%, 38.72%, and 44.37%, respectively. The substrate porosity of the new type of wetland decreased less than that of the traditional wetland. Moreover, the removal rates of NH₃-N, NO₃⁻-N, TN, COD, and TP of the new type of wetland after 160 days were 60.40%, 70.80%, 56.53%, 53.12%, and 48.30%, respectively, and the values of the traditional wetland were 34.99%, 51.70%, 41.43%, 29.84%, and 47.06%, respectively. The removal rates of pollutants of the new type of wetland were higher than those of the traditional wetland, and the values of the new type of wetland decreased less than those of the traditional wetland. The new type of wetland has a relatively stable pollutant removal effect throughout the operation process, providing a new method to effectively alleviate the clogging problem.

Key words: new type of wetland; dual rotation; flow direction; periodical change; anti-clogging; decontamination effect

基金项目:长江水科学联合基金重点项目(U2040209);国家自然科学基金重点项目(51739002);中交上海航道局科技研发项目(SHJKJ-2018-001);中央高校基本科研业务费专项(B200204020)

作者简介:华祖林(1965—),男,教授,博士,主要从事水环境模拟与水环境修复研究。E-mail: zulinhua@hhu.edu.cn

当前,在污水处理尤其是微污染水体处理中,人工湿地技术得到广泛使用,其中,垂直潜流人工湿地由于对氨氮和有机物去除效率高、具有很高的稳定性与抗冲击负荷等优点,使用最多^[1-2]。但是垂直潜流湿地存在一些缺点,如长期运行后易发生堵塞,湿地基质发生堵塞后会破坏内部污水流场稳定性而造成雍水,使其去污效果大幅降低^[3]。

垂直潜流人工湿地发生堵塞的本质是基质孔隙率的降低^[4],而基质孔隙率下降是由于进水中存在的有机和无机悬浮固体^[5]、部分离子之间反应形成的难溶性沉淀物^[6]等不可滤物质在基质孔隙中逐渐积累,占据基质间孔隙,另外大量微生物及其分泌的胞外聚合物积聚在基质表面,会与水体中的有机物形成高含水量、低密度的胶状淤泥^[7],致使湿地孔隙率下降。

为了解决垂直潜流人工湿地堵塞问题,许多学者进行了诸多有益的研究工作。叶剑锋等^[8]研究表明,进水中有机和无机悬浮固体主要集聚在垂直潜流湿地布水管下10~20 cm处,即基质上层,因此有的湿地在运行一段时间后需对堵塞的上层填料进行更换或清洗,以解决表层基质中不可滤物质堵塞问题,如纪良等^[9]采用装配式模块装载填料,以便能够快速更换堵塞后的填料模块,被堵塞的填料模块单元通过清洗或更换内部填料后可再次利用,但清洗更换填料工作费时费力且会导致湿地运行中断,除了表层基质的堵塞外,湿地下层基质也存在一定程度的堵塞。针对湿地基质内部的有机物质,包括胞外聚合物,Nivala等^[10]使用过氧化氢强氧化剂进行氧化处理,将有机物质溶解以增加孔隙率。反冲洗措施也是解决整个湿地单元基质内部堵塞的方法之一,马飞等^[11]使用反冲洗方法,通过气泵将空气泵入反冲洗进水管形成气液两相流,对湿地进行大强度反冲洗,可以将堵塞在基质孔隙中的有机物和无机物冲洗脱落随水流流出,达到缓解堵塞目的。据统计反冲洗运行操作经济成本很高约为0.2元/(m³·次)^[12],且会对湿地内部微生物膜造成破坏,后续挂膜需要较长时间。

采取轮休方式或停床休作也能有效改善湿地基质表面胞外聚合物堵塞的情况,Hua等^[13]将堵塞后的垂直流人工湿地分别排空3 d、7 d和10 d后再运行,基质中的胞外聚合物均有相应减少,基质孔隙率有所提高。这种轮休方式使得至少有一组湿地单元处于停滞状态,无法处理污水,因此一般在实际应用中轮休或停床休作需要采用多组湿地单元并联的方式,间歇性轮流运行以保证处理额定的污水量。轮休虽然解决了湿地堵塞问题,但是湿地单元的利用

效率低,另外停床休作的湿地单元在重启初期水质不稳定,去除效率不佳。

为此,本文设计了一种新型双重轮休式潜流湿地,主体池左右两池按一定周期交替进水,池内始终有水流经过,避免了湿地单元休作时完全不参与运行的情况,同时左右两池按一定周期更换水流方向,起到了类似于反冲洗的作用。新型湿地结合了轮休方式与反冲洗方法的优点,为解决垂直潜流湿地长期运行时易堵塞的问题提供了一种新的途径。

1 新型湿地及试验设计

1.1 新型湿地

新型双重轮休式潜流人工湿地结构如图1所示,装置内共有5个池,包括前端的2个预处理池(A1和A2)、中部的2个主体池(B1和B2)和后端的1个出水池(C1)。预处理池尺寸为0.3 m×0.4 m×1.2 m,主体池尺寸为1 m×0.4 m×1.2 m,出水池尺寸为0.3 m×0.9 m×1.2 m。预处理池和主体池内垂直分层填铺填料,最上层厚度为30 cm,填料为8~16 mm粒径的沸石;中层厚度为30 cm,填料为6~8 mm粒径的陶粒;底层厚度为30 cm,填料为10~12 mm粒径的砾石。在这些填料顶部铺设厚度为15 cm的土壤,用于种植耐污的水生植物黄菖蒲和西伯利亚鸢尾。同时又专门制作了一个传统下行式垂直潜流湿地装置用于对比试验。传统湿地的主体池尺寸为1.2 m×0.6 m×1.2 m,出水池尺寸为0.3 m×0.6 m×1.2 m,其主体池内填料、水生植物与新型湿地相同。传统湿

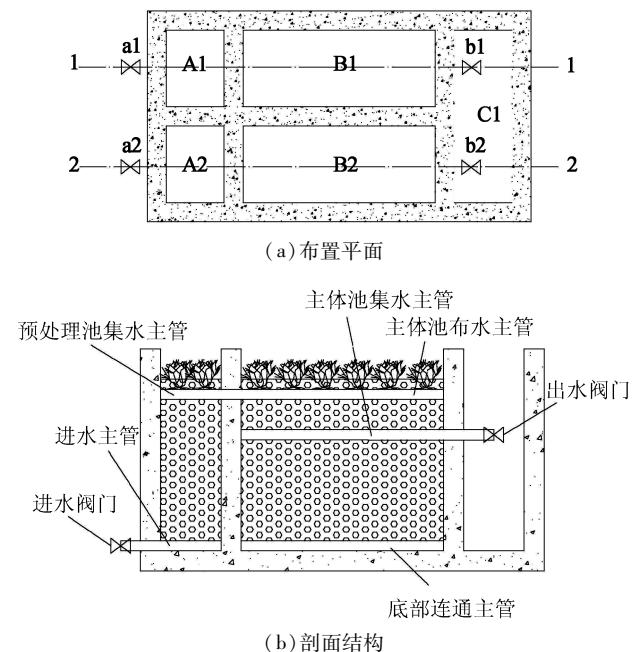


图1 新型湿地结构

Fig.1 Structure of new type of wetland

地在靠近表层填料(0.8 m 高度处)设有布水管,底部设有集水管连至出水池,此湿地运行时污水由布水管垂直向下均匀布水,通过底部集水管后排入出水池。出水池内另接一条管道与集水管相连,用作试验后期反冲洗。

新型湿地的2个预处理池和2个主体池内管道布置完全相同,如图2所示,各层管道均有主管与支管,主管无孔,支管均匀布孔,保证垂直流湿地均匀布水。主体池底部连通管的平面图结构如图2(b)所示,同样是主管无孔、支管均匀布孔,2个主体池的支管相互连通并穿过2个主体池之间的挡板,实现2个主体池的连通,方便水流在2个主体池底部间往返流动。

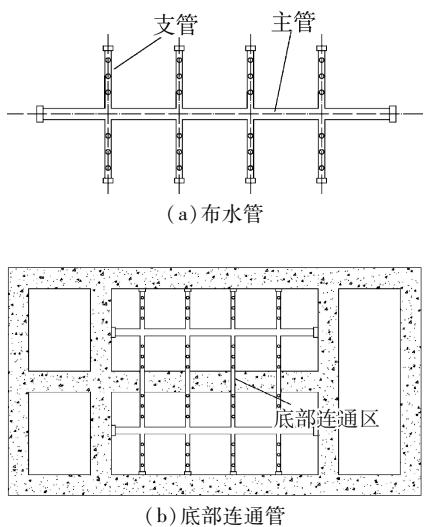


图2 管道结构

Fig. 2 Pipeline structure

新型湿地轮换制运行方式分为两个时间段。在水流运行的第一时间段时,开启预处理池A1的进水阀门a1和主体池B2的出水管阀门b2,并关闭预

处理池A2进水阀门a2和主体池B1的出水管阀门b1,水流运动路线如图3(a)~(c)中的黑色箭头所示,污水从预处理池A1底部的进水管进入,水流上行通过预处理池A1顶部的集水管进入主体池B1布水管;此时主体池B1内水流下行到底部,通过两个主体池的底部连通管进入主体池B2,水流再从主体池B2的底部上行至其集水管,并最终经过阀门b2排入出水池C1。

在第一时间段运行一段时间后,开始轮换,进入第二时间段,水流运动路线如图3(d)(e)中的红色箭头所示,此时关闭预处理池A1和主体池B2的阀门(a1和b2),开启预处理池A2和主体池B1的阀门(a2和b1),水流从预处理池A2进入,依次经过主体池B2、B1后,排入出水池C1。水流方向改变后湿地内的水流路径也对称改变,上一时间段的B1池内下行水流变为上行,B2池内上行水流变为下行,第一时间段和第二时间段交替轮休。第二时间段结束后,调回阀门开关,回到第一时间段,进入下一个周期,不断重复第一、二时间段。新型湿地通过简单的阀门开关控制,实现湿地单元的交替进水轮休。

1.2 试验设计

目前人工湿地广泛应用于微污染水处理,本文研究主要针对污水处理厂尾水,以提高污水处理厂出水水质,使其达到IV类及以上水质标准,故试验配制的进水模拟污水处理厂的出水水质,各污染物浓度参照GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准,进水中 COD、NH₃-N、NO₃⁻-N、TN 和 TP 的质量浓度分别为 (50 ± 2) mg/L、(5.0 ± 0.5) mg/L、(10.0 ± 0.6) mg/L、(15 ± 1) mg/L 和(0.5 ± 0.1) mg/L。

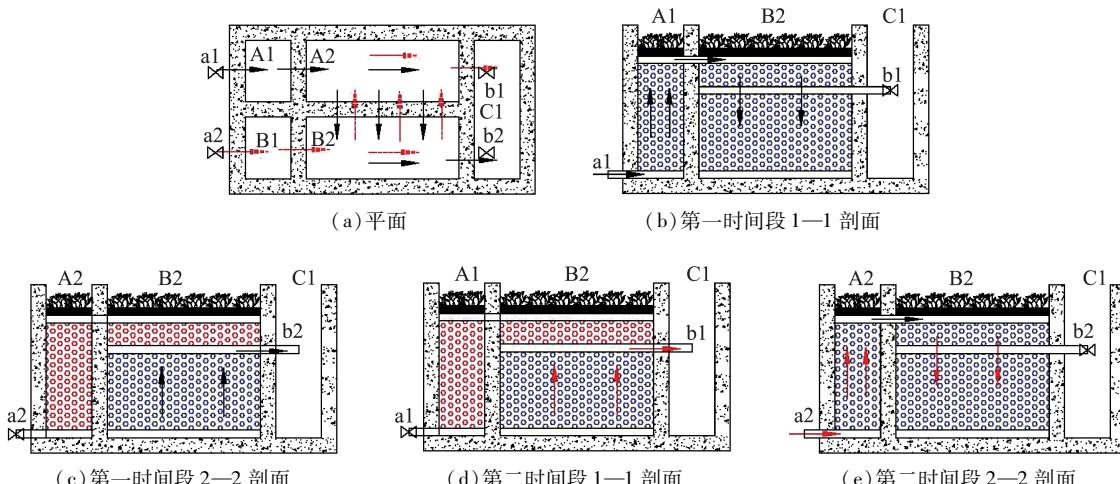


图3 水流路径

Fig. 3 Water flow path

1.3 最佳轮休周期工况选取及对比试验

与传统垂直潜流湿地不同,新型湿地在运行阶段根据轮休周期改变主体池内水流方向,轮休周期的长短影响新型湿地对污染物的去除效果,因此,需要探究新型湿地最佳轮休周期,使其对污染物有高去除率。

控制新型湿地进水流量为 $0.63 \text{ m}^3/\text{d}$,水力停留时间约 10 h。新型湿地设置 4 种不同的轮休周期:3 d、5 d、8 d、14 d,4 种工况分别运行 18 d、20 d、16 d、28 d。

试验结果表明,新型湿地在不同轮休周期下对不同污染物的去除率存在差异(图 4), $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率由高到低对应的轮休周期为 5 d、8 d、3 d 和 14 d, NO_3^- -N 平均去除率由高到低对应的轮休周期为 14 d、5 d、8 d 和 3 d,TN 平均去除率由高到低对应的轮休周期为 5 d、8 d、14 d 和 3 d。新型湿地以 5 d 的轮休周期更换主体池内水流方向,对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 去除率最高,对 NO_3^- -N 去除率相对较高,总体除氮效果好,因此,确定 5 d 为新型湿地最佳轮休周期。

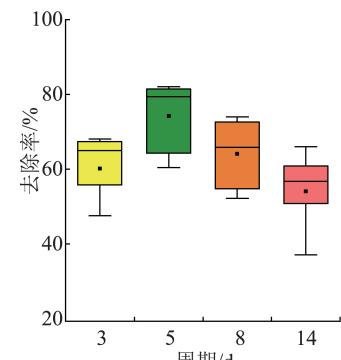
新型湿地的最佳轮休周期既不能太长也不可太短,需要取中间的“平衡值”,这是由于轮休周期较短时,主体池内水流方向频繁改变使水中的溶解氧含量较高,难以形成厌氧环境^[14],抑制反硝化菌的反硝化作用^[15],进而降低对 NO_3^- -N 的去除效果。而轮休周期过长时,湿地系统难以形成好氧-缺氧-厌氧交替环境,后期始终处于厌氧环境^[16],抑制了微生物的硝化反应,降低了对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果。而新型湿地 5 d 的轮休周期恰是合理的中间“平衡值”,对基质和植物影响较小,且能形成有氧环境和厌氧环境交替,进而更好地去除污水中各种形态的氮,提高对 TN 的去除效果。

为了对新型湿地与传统下行式垂直潜流湿地进行抗堵塞能力和去污效果的对比研究,控制传统湿地的进水流量,使其水力停留时间与新型湿地基本一致,约为 10 h,并与新型湿地同时运行,且传统湿地的进水水质、采样时间也与新型湿地相同,但在运行到试验后期(160 d 时),传统湿地利用出水池内的反冲洗管进行反冲洗操作。新型湿地不同轮休周期工况试验选择在每天下午 5 时采集出水水样,测定水样的污染物浓度并计算平均去除率^[17]。新型湿地与传统湿地的抗堵塞能力主要通过孔隙率来表征^[18]。

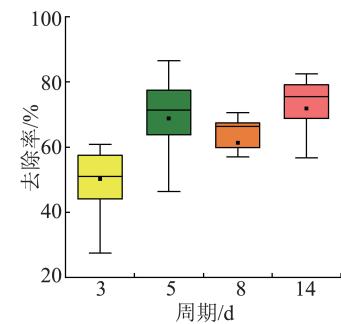
2 结果与分析

2.1 新型湿地与传统湿地抗堵塞能力对比

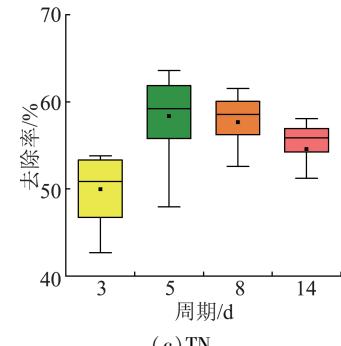
图 5 为新型湿地与传统湿地孔隙率随时间的变化趋势,第 1 次初始测量是在新型湿地和传统湿地内生物膜挂膜成功后,此时两种湿地的初期孔隙率



(a) $\text{NH}_3\text{-N}$



(b) NO_3^- -N



(c) TN

图 4 新型湿地不同轮休周期污染物去除率

Fig. 4 Pollutant removal rates of new type of wetland under different rotation periods

基本相同,均接近 50%。两种湿地同时运行 40 d 后第 2 次测量它们的孔隙率,发现传统湿地和新型湿地预处理池的孔隙率相差不大,分别为 46.89% 和 46.32%,而新型湿地主体池的孔隙率为 48.43%,仅比初次测量的孔隙率下降了 0.8%,其堵塞程度最低。第 3 次测量孔隙率是在两种湿地同时运行 140 d、传统湿地反冲洗前,测量发现传统湿地的孔隙率在这个过程中急剧下降了 8.17%,其孔隙率变为 38.72%,受堵塞的影响最大;新型湿地预处理池的孔隙率降为 42.81%,受堵塞影响小于传统湿地;新型湿地主体池的孔隙率为 46.36%,仅下降了 2.07%,受堵塞影响最小。两种湿地同时运行 160 d、传统湿地反冲洗结束后进行最后一次孔隙率测量,得到传统湿地的孔隙率为 44.37%,可见反冲洗对提高传统湿地孔隙率的效果显著,孔隙率回升了 5.65%,

缓解了传统湿地堵塞情况;新型湿地主体池和预处理池的孔隙率分别为 46.21% 和 42.55%,传统湿地反冲洗后的孔隙率仍低于新型湿地主体池的孔隙率。

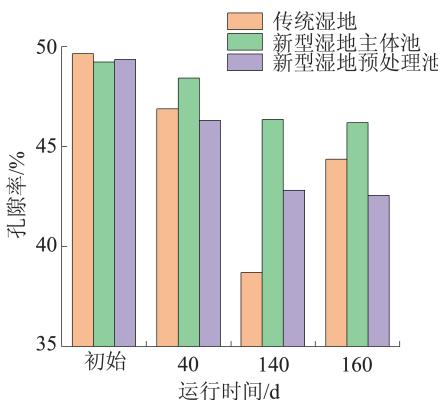


图 5 新型湿地与传统湿地不同时间孔隙率

Fig. 5 Porosities of new type of wetland and traditional wetland at different time

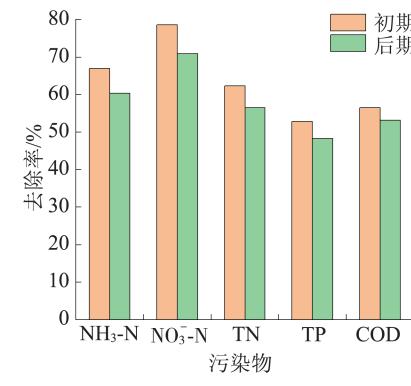
试验结果表明,整个运行阶段新型湿地基质内孔隙率下降幅度较小,从试验初期到结束,其主体池孔隙率仅下降了 3.02%,受堵塞影响较小;而传统湿地从初期到反冲洗前孔隙率下降幅度较大,下降了 10.93%,其受堵塞影响大于新型湿地;在反冲洗后,传统湿地的孔隙率有所提高,对堵塞有一定缓解,但其堵塞程度仍然高于新型湿地主体池。新型湿地在 5 d 的轮休周期下运行,能有效缓解堵塞情况,其抗堵塞能力强于设有反冲洗管、可进行反冲洗的传统湿地。

新型湿地具有较强的抗堵塞能力,主要是因为其双重轮休与类似于反冲洗的作用。新型湿地的 2 个预处理池和 2 个主体池,配合其按一定周期交替进水的运行方式,可使得上一时间段有污水流经的预处理池和主体池上部两个易堵塞区域处于轮休状态,以实现双重轮休。轮休可使基质的大气复氧能力增强,以促进好氧微生物降解有机污染物,也使基质中微生物进入内源呼吸阶段,消耗胞内物质或胞外聚合物,缓解因生物膜大量积聚在基质表面引起的堵塞状况^[19]。此外水流在主体池 B1 和 B2 中按一定轮休周期更换方向,相当于反冲洗作用,对截留在基质孔隙中的堵塞物质进行反向冲刷,以减缓基质内堵塞物的累积。

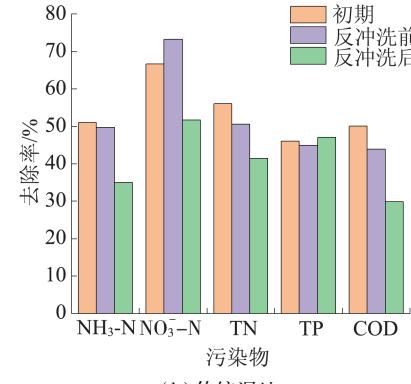
2.2 新型湿地与传统湿地去污效果比较

新型湿地与传统湿地在不同时期的污染物平均去除率变化如图 6 所示。在运行初期,即稳定运行 40 d 后,新型湿地 NO_3^- -N 平均去除率最高,达到 78.50%,高于传统湿地 NO_3^- -N 平均去除率(66.71%);新型湿地 NH_3 -N、TN、COD 平均去除率较高,分别为 67.00%、62.33% 和 56.48%,高于传

统湿地 NH_3 -N、TN、COD 平均去除率(分别为 51.04%、56.06% 和 50.08%);而新型湿地 TP 平均去除率相对较低,为 52.80%,但仍高于传统湿地 TP 平均去除率(46.07%),所以,在运行初期新型湿地对 COD、 NH_3 -N、 NO_3^- -N、TN、TP 的去除效果均好于传统湿地。长期运行至传统湿地进行反冲洗,即 160 d 时,新型湿地 NH_3 -N、 NO_3^- -N、TN、COD、TP 平均去除率分别为 60.40%、70.80%、56.53%、53.12% 和 48.30%,而传统湿地 NH_3 -N、 NO_3^- -N、TN、COD、TP 平均去除率分别为 34.99%、51.70%、41.43%、29.84% 和 47.06%,对比发现,新型湿地中这些污染物平均去除率远高于传统湿地,即使在传统湿地反冲洗后,新型湿地对污染物的去除效果仍优于传统湿地;此时两种湿地 NH_3 -N、 NO_3^- -N、TN、COD 平均去除率与初期相比均有所下降,但是新型湿地中这些污染物平均去除率的下降幅度均小于 10%,下降幅度明显小于传统湿地。



(a) 新型湿地



(b) 传统湿地

图 6 新型湿地与传统湿地不同时期污染物平均去除率

Fig. 6 Average pollutant removal rates of new type of wetland and traditional wetland in different stages

相比于传统湿地,新型湿地具有较强的抗堵塞能力,其受堵塞影响程度小,水体能较好地复氧,使得微生物活性较好,进而获得较好的去污效果;新型湿地中,2 个主体池集水管以下部分始终处于运行状态,不会因堵塞严重而中断运行,湿地系统处于相对稳定的状态,对其内部的微生物群落影响较小,所

以新型湿地能保持相对稳定的去污效果。传统湿地在进行反冲洗操作前,湿地基质有一定程度堵塞,其受堵塞影响程度大于新型湿地,影响水体复氧,从而影响到微生物活性,使得传统湿地去污效果不如新型湿地;传统湿地经过较大强度的反冲洗后,基质表面的生物膜出现部分脱落,造成湿地内生物量有所减少,使其短期内难以恢复反冲洗前的净水效果,需要稳定运行一段时间才能恢复其对污染物较好的去除效果。

3 结 论

a. 新型双重轮休式潜流湿地通过交替进水实现易堵塞的预处理池和主体池上层的双重轮休,主体池左右两池按轮休周期更换水流方向,起到类似于反冲洗的作用。

b. 从试验初期到结束,新型湿地主体池孔隙率仅下降了3.02%,受堵塞影响小,而传统湿地从初期到反冲洗前孔隙率下降了10.93%,新型湿地抗堵塞能力强于传统湿地。

c. 不同时期新型湿地污染物去除率高于传统湿地,且从运行初期到后期,新型湿地 COD、NH₃-N、NO₃⁻-N、TN 去除率的下降幅度均小于10%,远小于传统湿地中这些污染物去除率的下降幅度。

d. 新型湿地具有较强的抗堵塞能力和较好且稳定的去污效果,为垂直潜流湿地易堵塞问题提供了一种新的解决途径。

参考文献:

- [1] KONNERUP D, TRANG N T D, BRIX H. Treatment of fishpond water by recirculating horizontal and vertical flow constructed wetlands in the tropics [J]. Aquaculture, 2011,313(1/2/3/4) : 57-64.
- [2] 张海阔,姜翠玲,朱立琴,等.盐龙湖表面流人工湿地底泥氧化层对污染物释放的影响[J].水资源保护,2019,35(5):95-101. (ZHANG Haikuo, JIANG Cuiling, ZHU Liqin, et al. Effect of oxide layer of sediment on contaminant release in surface flow constructed wetland of Yanlong Lake [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5) :95-101. (in Chinese))
- [3] 王振,张彬彬,向衡,等.垂直潜流人工湿地堵塞及其运行效果影响研究[J].中国环境科学,2015,35(8):2494-2502. (WANG Zhen, ZHANG Binbin, XIANG Heng, et al. Clogging of vertical subsurface flow constructed wetland and its effects on purifying efficiency [J]. China Environmental Science, 2015, 35 (8) :2494-2502. (in Chinese))
- [4] WANG Hanxi, SHENG Lianxi, XU Jianling. Clogging mechanisms of constructed wetlands:a critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,295:126455.
- [5] 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.
- [6] 项泽顺.垂直流人工湿地基质堵塞及恢复方法的研究 [D]. 杭州:杭州电子科技大学,2018.
- [7] 林莉莉,鲁汭,肖恩荣,等.人工湿地生物堵塞研究进展 [J]. 环境科学与技术,2019,42(6):207-214. (LIN Lili, LU Rui, XIAO Enrong, et al. Bioclogging in constructed wetlands: state-of-the-art [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42 (6) : 207-214. (in Chinese))
- [8] 叶建锋,徐祖信,李怀正.垂直潜流人工湿地堵塞机制:堵塞成因及堵塞物积累规律 [J]. 环境科学,2008,29 (6) : 1508-1512. (YE Jianfeng, XU Zuxin, LI Huaizheng. Clogging mechanism in vertical-flow constructed wetland: clogging cause and accumulation distribution characteristics [J]. Environmental Science, 2008, 29 (6) : 1508-1512. (in Chinese))
- [9] 纪良,杨帆,吴华波,等.人工湿地中装配式填料模块设计及应用 [J]. 山东化工,2021,50(4):296-298. (JI Liang, YANG Fan, WU Huabo, et al. Design and application of prefabricated filler module in constructed wetland [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50 (4) : 296-298. (in Chinese))
- [10] NIVALA J, ROUSSEAU D P L. Reversing clogging in subsurface-flow constructed wetlands by hydrogen peroxide treatment: two case studies [J]. Water Science and Technology, 2009,59(10):2037-2046.
- [11] 马飞,蒋莉,熊洁羽,等.反冲洗措施改善垂直潜流人工湿地水力特性的研究 [J]. 环境科学与技术,2011,34 (7) :46-49. (MA Fei, JIANG Li, XIONG Jieyu, et al. Changes of hydraulics of constructed wetlands after backwashing [J]. Environmental Science & Technology, 2011,34(7):46-49. (in Chinese))
- [12] 操家顺,姚博宇,薛朝霞,等.反硝化滤池应用新型陶粒滤料的水处理效果及反冲洗性能分析 [J]. 应用化工,2018,47(11):2317-2321. (CAO Jiashun, YAO Boyu, XUE Zhaoxia, et al. Water treatment effect and backwash energy consumption evaluation of a new type of ceramic filter used in denitrification filter [J]. Applied Chemical Industry, 2018,47(11):2317-2321. (in Chinese))
- [13] HUA Guofen, ZENG Yitao, ZHAO Zhongwei, et al. Applying a resting operation to alleviate bioclogging in vertical flow constructed wetlands: an experimental lab evaluation [J]. Journal of Environmental Management, 2014,136:47-53.
- [14] ROTH J J, PASSIG F H, ZANETTI F L, et al. Influence of the flooded time on the performance of a tidal flow constructed wetland treating urban stream water [J].

- [15] 张建明,殷树鹏,于会国,等.人工湿地氮、磷去除机理及影响因素研究[J].清洗世界,2021,37(1):38-39.
(ZHANG Jianming, YIN Shupeng, YU Huiguo, et al. Study on the mechanism and influencing factors of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetland [J]. Cleaning World, 2021, 37(1):38-39. (in Chinese))
- [16] LI Luzhen, HE Chenguang, JI Guodong, et al. Nitrogen removal pathways in a tidal flow constructed wetland under flooded time constraints [J]. Ecological Engineering, 2015, 81:266-271.
- [17] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].第4版.北京:中国环境出版社,2002.

- [18] 张明珍,徐栋,武俊梅,等.人工湿地堵塞监测方法的研究进展[J].水生态学杂志,2021,42(3):121-126.
(ZHANG Mingzhen, XU Dong, WU Junmei, et al. Review of methods for monitoring clogging of constructed wetlands [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(3):121-126. (in Chinese))
- [19] 赵文喜,陶磊,刘红磊.人工湿地堵塞机理及防堵措施浅析及研究[J].环境科学与管理,2013,38(8):8-16.
(ZHAO Wenxi, TAO Lei, LIU Honglei. Analysis on clogging mechanism of constructed wetlands and clogging prevention measures [J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(8):8-16. (in Chinese))

(收稿日期:2021-12-03 编辑:施业)

(上接第 95 页)

- [27] 陶然,张珂.基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析[J].水资源保护,2020,36(5):50-56.
(TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015 [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5):50-56. (in Chinese))
- [28] 姜瑶,徐宗学,王静.基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J].水利学报,2020,51(7):845-857.
(JIANG Yao, XU Zongxue, WANG Jing. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(7):845-857. (in Chinese))
- [29] 宁忠瑞,张建云,王国庆.1948—2016 年全球主要气象

要素演变特征[J].中国环境科学,2021,41(9):4085-4095.
(NING Zhongrui, ZHANG Jianyun, WANG guoqing. Variation and global pattern of major meteorological elements during 1948-2016 [J]. China Environmental Science, 2021, 41 (9): 4085-4095. (in Chinese))

- [30] 王飞,丁建丽,魏阳.“一带一路”国家和地区百年尺度干旱化特征分析[J].地球信息科学学报,2017,19(11):1442-1455.
(WANG Fei, DING Jianli, WEI Yang. Analysis of drought characteristics over countries and regions of “the Belt and Road Initiatives” in recent one hundred years [J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(11):1442-1455. (in Chinese))

(收稿日期:2021-11-20 编辑:施业)

(上接第 139 页)

- [39] 严晓瑜.不同时间尺度若尔盖湿地植被变化及其与气候的关系[D].北京:中国气象科学研究院,2008.
- [40] 赵凌栋,车丁,张晶,等.基于景观指数的高邮湖湿地生态水文连通性分析[J].水利水电技术,2019, 50(1): 126-133.
(ZHAO Lingdong, CHE Ding, ZHANG Jing, et al. Ecohydrological connectivity analysis of Gaoyou Lake wetland based on landscape indices [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(1): 126-133. (in Chinese))
- [41] 汪豪,娄夏,刘曙光,等.湿地环境质量评价方法研究进展[J].水利水电科技进展,2020, 40(6): 85-94.
(WANG Hao, LOU Xia, LIU Shuguang, et al. Advances in wetland environmental quality assessment methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6):85-94. (in Chinese))
- [42] 潘健,于丹丹,何振芳,等.东平湖湿地景观演变对人类活动的响应机制[J].水资源保护,2017, 33(4): 88-94.
(PAN Jian, YU Dandan, HE Zhenfang, et al.

Impacts of human activities on change of wetland landscape in Dongping lake area [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 88-94. (in Chinese))

- [43] 赵衡,闫旭,王富强,等.基于 PSR 模型的三门峡库区湿地生态系统健康评价[J].水资源保护,2020, 36(4): 21-25.
(ZHAO Heng, YAN Xu, WANG Fuqiang, et al. Assessment on ecosystem health of Sanmenxia Reservoir wetland based on PSR model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (4): 21-25. (in Chinese))
- [44] 张珂,牛杰帆,李曦,等.洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J].水资源保护,2021, 37(1): 28-35.
(ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in Chinas semi-arid and semi-humid regions [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 28-35. (in Chinese))

(收稿日期:2021-03-08 编辑:王芳)