

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.005

基质组配、填充方式及水力负荷对生态滤坝净化效果的影响

沈志伟¹, 张晓雷¹, 余亮^{2,3}, 熊壮¹, 郭梓越¹, 华祖林^{2,3}, 王鹏^{2,3}, 刘晓东^{2,3}

(1. 中交上海航道局有限公司江苏交通建设工程分公司, 江苏 南京 210019;
2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为提升生态滤坝净化能力, 选取砾石、沸石、陶粒、蛭石 4 种基质, 进行基质组配、填充方式及水力负荷等多情景下的污染物(COD、氨氮、总磷)去除效果试验。试验结果表明: 砾石+陶粒组配方式去除 COD 效果最好, 而去除氨氮和总磷效果最好的组配方式是砾石+沸石; 砾石和沸石均匀混合有利于 COD 的去除, 而砾石在前沸石在后的填充方式是去除氨氮和总磷最高效的填充方式; 随着水力负荷的增大, 3 种填充方式下 COD 和总磷的去除率均呈现递减趋势, 均匀混合填充方式下氨氮的去除率呈现递减趋势而分层填充方式下氨氮的去除率呈现先增大后减小趋势。
关键词: 生态滤坝; 基质组配; 填充方式; 水力负荷; 净化性能; 砾石; 沸石; 陶粒; 蛭石
中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)06-0037-07

Effects of substrate combination, packing arrangement and hydraulic loading on the purification performance of ecological filter dam

SHEN Zhiwei¹, ZHANG Xiaolei¹, YU Liang^{2,3}, XIONG Zhuang¹,
GUO Ziyue¹, HUA Zulin^{2,3}, WANG Peng^{2,3}, LIU Xiaodong^{2,3}

(1. CCCC Shanghai Channel Bureau Co., Ltd., Jiangsu Communications Construction Engineering Branch, Nanjing 210019, China;
2. Ministry of Education Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This study tested the contaminant removal effect under the conditions of substrate combination, packing arrangement, and hydraulic loading under four substrates (gravel, zeolite, ceramsite and vermiculite) as part of an attempt to improve the purification capacity of ecological filter dams. The results showed that the gravel and ceramsite group had the superior COD removal efficiency, whereas the best removal efficiencies of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP were achieved by the gravel and zeolite group. It was also found that uniform mixing mode could most effectively improve the removal of COD, but the best removal efficiencies of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP were found in the gravel in former and zeolite in behind mode. With the increase of hydraulic loading, the removal rates of COD and TP in three mixing modes were gradually decreased, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal behaved decrease in uniform mixing mode, but increased first and then decreased in two-layer mixing modes.
Key words: ecological filter dam; substrate combination; packing arrangement; hydraulic loading; purification performance; gravel; zeolite; ceramsite; vermiculite

随着社会经济的发展,环境问题特别是水环境问题日益受到政府的重视,各级政府积极建设各种城镇污水处理厂以提高污水处理效率^[1-2]。但是,污水处理厂尾水中氮磷营养盐浓度高、可生化性差,直接排放到江河湖体中仍会造成水体富营养化^[2-3],因此有必要对污水处理厂尾水进行总量削减和水质提升。

基金项目: 中交上海航道局科技研发项目(SHJKL-2018-001);国家自然科学基金项目(U2040209)
作者简介: 沈志伟(1984—),男,工程师,主要从事水环境治理与生态修复研究。E-mail: 121233421@qq.com
通信作者: 刘晓东(1972—),男,副教授,博士,主要从事污染物多介质输移转化与环境模拟研究。E-mail: xdlu@hhu.edu.cn
引用本文: 沈志伟,张晓雷,余亮,等. 基质组配、填充方式及水力负荷对生态滤坝净化效果的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6):37-43.
SHEN Zhiwei, ZHANG Xiaolei, YU Liang, et al. Effects of substrate combination, packing arrangement and hydraulic loading on the purification performance of ecological filter dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6):37-43.

生态滤坝是基于人工湿地和快速渗滤原理开发的一种新型生态治理水工建筑物^[4-9],在不影响水体流动的同时通过基质吸附、植物吸收、微生物降解去除污染物,因其具有操作简单、去除污染物性能优越和建设费用低等优点^[10-11],已在太湖流域得到实践应用^[12-13]。

基质被称为生态滤坝的“骨架”,是生态滤坝去除污染物的最重要部分,基质可以吸附、过滤、截留污染物,为植物生长提供支撑点,为微生物生存提供附着点^[14-16]。目前关于生态滤坝的研究主要集中在特定基质的污水净化效果,如化工材料(合成沸石、合成陶粒)^[17-18]、生物质材料(农业废物、木材、建筑废物)^[19-20]、修饰功能材料(改性陶粒、金属改性沸石)^[19,21-22]和新型材料(微型氧化铝、多孔地质聚合物)^[23]等去除污染物的研究。尽管这些基质具有优越的污水处理性能,但因制备成本高和运行条件苛刻等原因仍处于室内研究阶段,未能在实践中得到应用。此外,这些试验大多是针对单一基质处理废水性能的研究,忽略了多种结构参数和运行参数对去除性能可能存在的影响。

目前,围绕生态滤坝净化效果的影响因素已开展了相关研究。例如:刘露等^[24]研究了 20、30、50 cm 3 种基质厚度对生态滤坝处理性能的影响,发现 50 cm 基质厚度挂膜量最多,去除效果最好并且防堵塞性能好;张文学等^[25]开展了 20°、25°、30° 3 种坡度梯度的生态滤坝去除性能试验,发现 20°生态滤坝对化学需氧量(COD)、氨氮和总氮去除效果最好,而 30°生态滤坝对总磷去除效果最好;于鲁冀等^[26]试验研究了沸石和砾石上下组合对河流中微污染物的去除效果,发现基质混合生态滤坝提高了约 10% 的污染物去除率。然而,现有研究主要聚焦于基质厚度、结构形式、基质组合^[24-26]等因素对污染物去除效果的影响,无法全面评估和优化生态滤坝的运行参数和运行条件。本文选择在实际水生态治理工程中广泛应用的砾石、沸石、陶粒和蛭石 4 种基质,设置基质组配方式、基质填充方式及水力负荷等多种试验组合方案,评估不同情景下生态滤坝去除氮磷污染物的效果,以期工程实践中提高生态滤坝净化效能提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

2020 年 5—8 月在河海大学江宁校区温室大棚内开展相关试验,试验装置如图 1 所示,主要由有机玻璃制作,包括 1 个配水箱、1 个尾水回收箱、4 个阀门、4 个玻璃转子流量计、4 个并排生态滤坝和其他辅助装置。配水箱建在温室内顶部,便于合成废水以自流方式进入生态滤坝。每个生态滤坝都包括布水区、排水区和填料区,填料区为长方体(长 1.5 m、宽 0.4 m、高 0.6 m)形状。

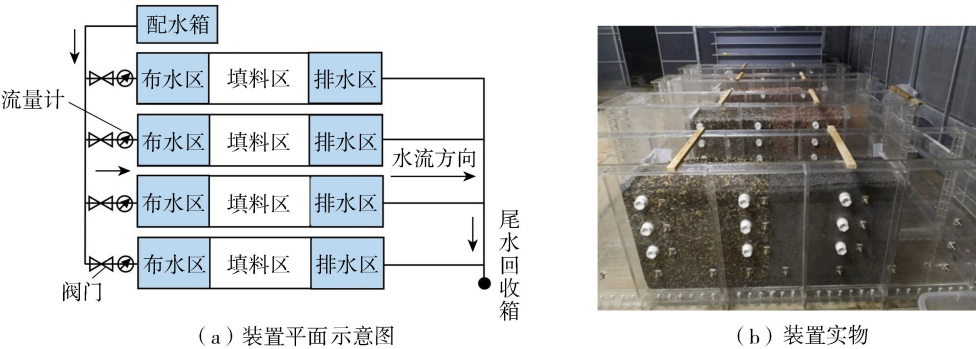


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental device

试验目标污染物为氮磷等营养物质,所以选取脱氮效果较好的沸石(粒径 8 ~ 16 mm)、陶粒(粒径 6 ~ 8 mm),除磷效果较好的蛭石(粒径 5 ~ 8 mm)、砾石(粒径 8 ~ 10 mm)进行试验,4 种基质均采购于河南省郑州市恒诺滤材有限公司。在试验开展前对基质先进行冲洗晾晒,去除基质表层附带的杂质,避免对试验结果产生影响。合成废水按 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》进行配置,以模拟污水处理厂出水质量浓度,其中 COD 质量浓度为(50±2.02)mg/L,氨氮质量浓度为(5±0.19)mg/L,总磷质量浓度为(0.5±0.023)mg/L。

1.2 试验设计

根据基质组配方式、基质填充方式和水力负荷设计 3 组试验:①基质组配试验。相关研究表明沸石和陶粒去除氮的效果比较好,而蛭石和砾石对磷去除比较有效,因此按去除氮和磷的效果将 4 种基质进行两两配

对,即蛭石+陶粒、蛭石+沸石、砾石+沸石、砾石+陶粒。4 种组合都按体积 1 : 1 前后分层方式进行填充,单个生态滤坝进水量为 0.8 m³/d。②填充方式试验。基于基质组配试验所确定的最优组合,将沸石和砾石分别按沸石在前砾石在后、砾石在前沸石在后和均匀混合 3 种方式进行填充,体积比为 1 : 1,水力条件同基质组配试验。③水力负荷试验。设计低、中、高 3 种水力负荷,分别为 0.8、1.1、1.3 m³/d。每次试验结束后都更换基质重新培养,以防出现局部基质吸附饱和现象影响后续试验,同时还会对填料内部进行再冲洗,让其自然风干,避免外部干扰因素。具体试验方案如表 1 所示。

1.3 采样和分析

每天分别从生态滤坝的布水区和排水区采取 500 mL 水样测定 COD、氨氮和总磷质量浓度,采用哈希便携式溶解氧仪测定填料区废水的溶解氧,使用 SPSS 22.0 统计程序进行统计分析,单因素方差法对去除效率进行对比($p<0.05$ 为显著值),用 Origin Pro 9.0 进行统计制图。

2 结果与分析

2.1 基质组配方式对生态滤坝净化性能的影响

a. COD 的去除。不同基质组配方式试验 COD 的出水质量浓度如图 2(a)所示。COD、氨氮和总磷质量浓度持续下降 5 d 后进入相对稳定阶段,后续对污染物质量浓度和去除率的分析均是基于 5 d 后的数据。蛭石+陶粒和砾石+陶粒组配方式对 COD 去除相对其他组配方式略有优势,出水质量浓度范围分别是 24.8 ~ 28.9 mg/L 和 22.8 ~ 27.6 mg/L,相对应的平均出水质量浓度为 26.3 mg/L 和 25.0 mg/L。从试验结果可以看出陶粒对 COD 具有较好的去除效果,且砾石+陶粒组配方式去除效果强于蛭石+陶粒组配方式,说明砾石去除 COD 效果比蛭石好。对蛭石+陶粒和砾石+陶粒组配方式而言,蛭石+沸石的组配方式出水质量浓度显著增大($p < 0.05$),其平均出水质量浓度为 29.1 mg/L;砾石+沸石组配方式出水质量浓度范围在 26.5 ~ 29.4 mg/L 之间,平均质量浓度为 27.8 mg/L,说明沸石去除污水中 COD 能力相对有限。如图 3(a)所示,4 种基质组配方式对 COD 的去除率从大到小依次为砾石+陶粒(47.9% ± 0.21%)、蛭石+陶粒(45.0% ± 0.20%)、砾石+沸石(41.2% ± 0.26%)、蛭石+沸石(38.7% ± 0.19%),组配方式之间的差异可能是不同基质吸附及附着其表层的微生物降解作用差异造成的。此外,砾石+陶粒组配方式的较低孔隙率和水力渗透系数增加了合成废水和基质的接触时间,为基质吸附和微生物降解提供了充足的时间,这可能是砾石+陶粒组配方式对废水中 COD 去除效果最好的原因。Belkouteb 等^[27]在研究污水处理厂去除新型有机污染物时也发现了延长废水和基质的接触时间有利于污染物的去除。

b. 氨氮的去除。从图 2(b)可以看出,蛭石+陶粒和砾石+陶粒组配方式对氨氮的去除效率较差,出水水质

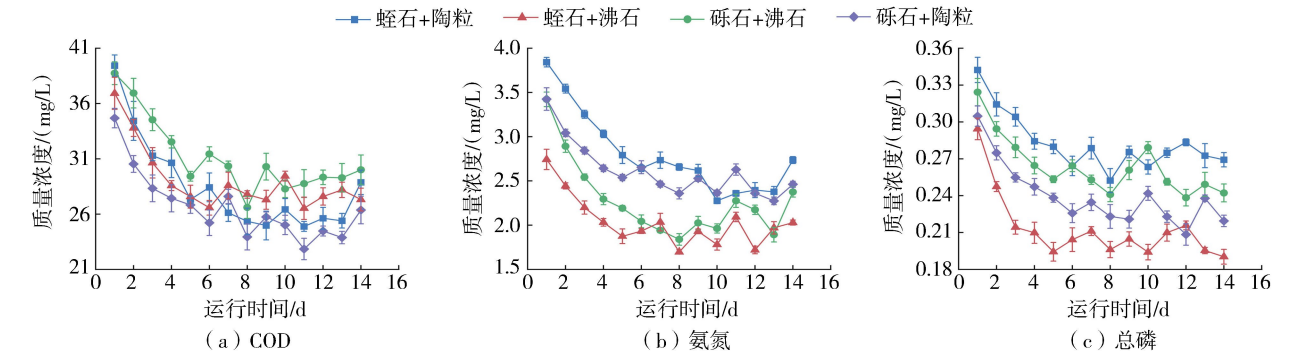


图 2 不同基质组配方式下的污染物质量浓度变化

Fig.2 Contaminant concentration variations under different substrate combinations

量浓度分别在 2.28 ~ 2.74 mg/L 和 2.27 ~ 2.63 mg/L 之间,平均去除率为 44.8% ± 0.31% 和 46.9% ± 0.17% (图 3)。蛭石+沸石组配方式明显提高了对氨氮的去除($p < 0.05$),出水质量浓度稳定在 1.84 ~ 2.37 mg/L,平均去除率可达到 55.4% ± 0.29%,去除效果最优的是砾石+沸石组配方式,出水平均质量浓度为 1.91 mg/L,去除率为 58.9% ± 0.27%。对比发现含有沸石的填料组配方式对氨氮保持良好的去除效果。这主要是因为沸石是一种含水硅酸盐矿物,含有大量相互连通的孔道,便于自身通过离子交换和物理吸附去除污染物^[28]。此外,当生态滤坝处于好氧状态时,沸石表面有利于硝化菌的滋生,会增强硝化能力从而提高氨氮的去除。

c. 总磷的去除。不同基质组配方式试验的总磷出水情况和去除率如图 2(c) 所示。蛭石+陶粒、蛭石+沸石、砾石+沸石和砾石+陶粒组配方式总磷出水平均质量浓度分别稳定在 0.27、0.25、0.20、0.23 mg/L,相应的去除率为 41.7% ± 0.17%、45.5% ± 0.30%、56.6% ± 0.22% 和 51.1% ± 0.20%。生态滤坝对磷的去除主要依靠基质吸附和化学沉淀作用,基质表征试验表明沸石和砾石含有一定的铁和铝元素,极易形成金属氢氧化合物并吸附污染物磷形成沉淀物^[29],这从侧面解释了砾石+沸石组配方式总磷去除效果最好的原因。

从图 3(a) 可看出,砾石+陶粒组配方式对 COD 的去除效果最好,而对氨氮和总磷去除效果最好的是砾石+沸石组配方式。对 COD 去除而言,不同基质组配方式对 COD 的去除效果差异较小,考虑到生态滤坝长期运行,COD 的去除主要依靠微生物的降解而非基质吸收,因此,选择砾石+沸石组配方式作为最优基质组配方式进行后续试验研究。

2.2 基质填充方式对生态滤坝净化性能的影响

a. COD 的去除。如图 4(a) 所示,沸石在前砾石在后、砾石在前沸石在后、均匀混合 3 种填充方式的 COD 出水质量浓度范围分别为 26.0 ~ 29.4、24.3 ~ 29.3、23.5 ~ 28.5 mg/L,平均质量浓度分别为 27.3、27.6、25.4 mg/L,可以看出均匀混合有利于 COD 去除,而其他两种填充方式没有显著差异($p > 0.05$),与于鲁冀等^[26]研究生态滤坝处理微污染河水得到的结论一致。初步推断可能是砾石和沸石两种基质组成存在差异或均匀混合的填充方式可以为降解微生物提供更适宜的生长环境。如图 3(b) 所示,COD 去除率最高的是均匀混合方式,达到 48.4% ± 0.21%,其他两种方式去除率分别为 44.7% ± 0.17% 和 43.8% ± 0.34% ($p > 0.05$)。

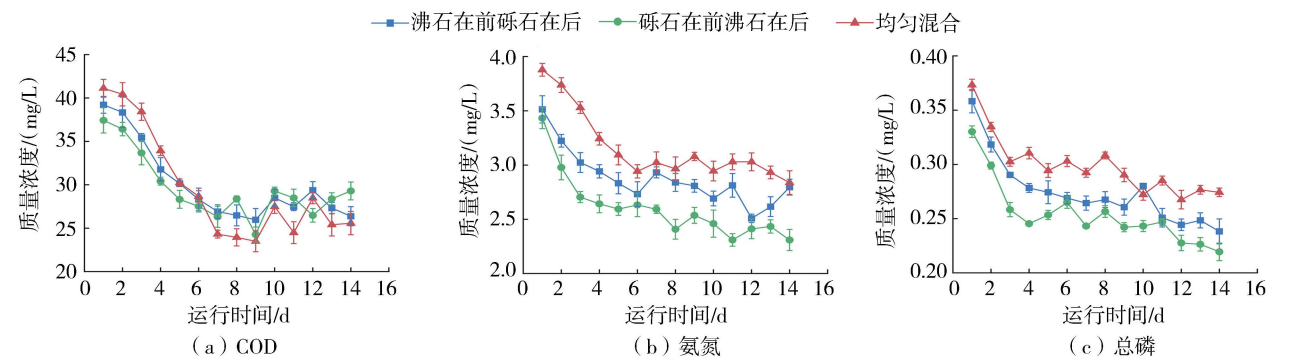


图 4 不同基质填充方式下的污染物质量浓度变化

Fig. 4 Contaminant concentration variations under different substrate mixing modes

b. 氨氮的去除。如图 4(b) 所示,3 种填充方式的氨氮平均出水质量浓度大小顺序为均匀混合 (2.98 mg/L)、沸石在前砾石在后 (2.74 mg/L)、砾石在前沸石在后 (2.45 mg/L),而于鲁冀等^[26]研究表明均匀混合填充方式去除氨氮效果优于分层填充方式。均匀混合填充方式对氨氮去除效果最差,这一填充方式增加了基质的相互碰撞,可能破坏基质表面的带电离子,从而降低氨氮进行交换离子的能力^[29]。而沸石在前砾石在后填充方式氨氮去除效果劣于砾石在前沸石在后填充方式,可能与沸石和砾石基质的粒径有关。

因为沸石粒径较大,会导致生态滤坝沸石段废水停留时间变短,而后半段砾石粒径较小,水力渗透率的突变造成废水在砾石段汇集,不利于砾石吸附^[30]。

c. 总磷的去除。3 种填充方式总磷的平均出水质量浓度顺序和氨氮一致,分别为 0.29、0.26、0.24 mg/L,出水质量浓度范围为 0.27~0.31、0.24~0.27、0.23~0.26 mg/L。磷的去除是依靠基质吸附作用和聚磷菌降解作用,分层填料不会影响单一基质对磷的吸附性能,所以前后分层的去除效率差异不大($p>0.05$)。基质的填充方式对氨氮和总磷影响较大。如图 3(b) 所示,砾石在前沸石在后填充方式对氨氮和总磷去除效果最好,去除率达到 $50.9\% \pm 0.22\%$ 和 $51.5\% \pm 0.19\%$ 。前后分层填充方式有利于氨氮的去除,因为分层填充方式让基质内部水流流场相对稳定,有利于基质和废水的充分接触,试验测得分层的孔隙度为 42.3%,大于均匀混合的孔隙度 35.8%。废水和基质的充分接触可以增加物理吸附和离子交换作用,提高磷的去除率。

根据以上分析确认最高效填充方式为砾石在前沸石在后。

2.3 水力负荷对生态滤坝净化性能的影响

a. COD 的去除。不同水力负荷条件下,生态滤坝对 COD 的去除率如图 5(a) 所示。当进水负荷从 $0.8 \text{ m}^3/\text{d}$ 增大到 $1.1 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,沸石在前砾石在后、砾石在前沸石在后、均匀混合 3 种填充方式下 COD 的去除率分别从 $44.7\% \pm 0.72\%$ 、 $43.8\% \pm 0.14\%$ 、 $48.4\% \pm 0.60\%$ 下降至 $38.5\% \pm 0.19\%$ 、 $40.5\% \pm 0.40\%$ 、 $40.0\% \pm 0.82\%$,其中砾石在前沸石在后填充方式降幅最小,当水力负荷继续增大到 $1.3 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,去除率分别下降至 $29.3\% \pm 0.31\%$ 、 $28.1\% \pm 0.50\%$ 和 $30.9\% \pm 0.73\%$,其中两种分层填充方式的去除率降幅较大,均匀混合填充方式降幅较小,表明水力负荷显著降低了生态滤坝对 COD 的去除率。COD 的去除主要与微生物种类和数量有关,进水流量的增大会使部分生物膜脱落而降低系统中微生物数量,降低了对有机物的去除能力。

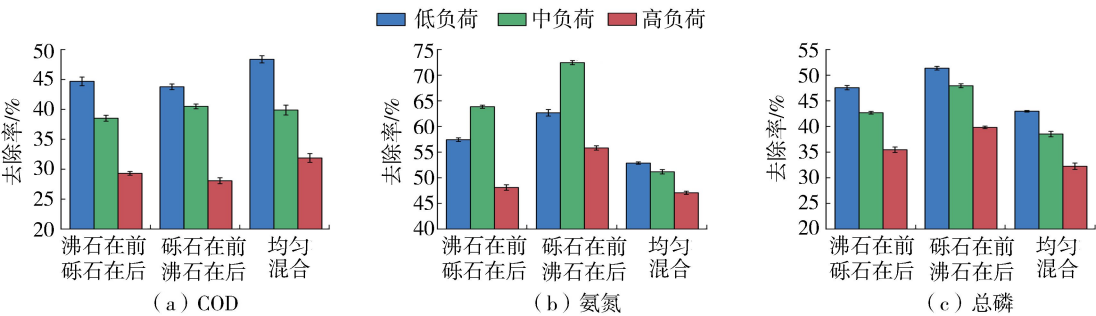


图 5 不同水力负荷下的污染物去除率

Fig. 5 Contaminant removal rates under different hydraulic loading

b. 氨氮的去除。如图 5(b) 所示,在低、中、高水力负荷下砾石在前沸石在后填充方式氨氮的去除率分别为 $62.7\% \pm 0.64\%$ 、 $72.4\% \pm 0.40\%$ 和 $55.8\% \pm 0.42\%$,表明随水力负荷的增大,生态滤坝对氨氮的去除率呈现先增大后减小的趋势。可能是因为氨氮去除主要依靠硝化菌的硝化作用,硝化菌对水体溶解氧较敏感。在低、中、高水力负荷下,砾石在前沸石在后填充方式生态滤坝填料区的溶解氧平均质量浓度分别为 (5.38 ± 1.20) 、 (6.54 ± 0.67) 、 $(7.01 \pm 1.03) \text{ mg/L}$ 。当水力负荷增大时,水流加剧会增加水体中的溶解氧含量,促进硝化作用而提高氨氮的去除率,但当水力负荷进一步增大时,废水和基质的接触时间会变小,不利于氨氮的去除,会降低去除率。此外,沸石在前砾石在后填充方式不同水力负荷下氨氮去除率规律与砾石在前沸石在后一样,但均匀混合填充方式去除率随着水力负荷的增大而减小,其去除率分别为 $52.9\% \pm 0.23\%$ 、 $51.2\% \pm 0.42\%$ 和 $47.1\% \pm 0.31\%$,可能是因为均匀混合的滤坝系统中,水力负荷的改变造成填料内部的水流流场不稳定,其影响抵消了溶解氧含量增大对硝化反应的促进作用。

c. 总磷的去除。从图 5(c) 可以看出,3 种填充方式下总磷的去除率均随水力负荷增大呈逐渐下降的趋势,例如砾石在前沸石在后填充方式 3 种水力负荷下的去除率分别为 $51.4\% \pm 0.37\%$ 、 $47.9\% \pm 0.38\%$ 和 $39.8\% \pm 0.24\%$,这同样是因为废水和基质接触时间变短导致基质无法有效地吸附磷污染物,会降低磷的去除率。此外,从中负荷到高负荷的去除率降幅(3.5%)小于从低负荷到中负荷的去除率降幅(8.1%),可能是因为当进水量增大后,虽然流速加快会增加填料内的溶解氧含量而促进好氧时微生物的吸附降解,但很显然高水力负荷造成水力停留时间过短的负面影响更大。

从基质组配方式、基质填充方式和水力负荷试验都可以看出,生态滤坝对 COD、氨氮和总磷去除率存在

一定差别,即对 COD 去除效果差,可能是本文试验生态滤坝没有种植水生生物,缺少植物吸收而降低了生态滤坝对 COD 的去除能力^[31]。

3 结 论

- a. 砾石+陶粒组配方式对 COD 去除效果最好,而氨氮和总磷去除效果最好的均为砾石+沸石组配方式。
- b. 砾石和沸石均匀混合可以提高 COD 的去除率,而砾石在前沸石在后的填充方式是去除氨氮和总磷最高效的填充方式。
- c. 随着水力负荷的增大,3 种填充方式下 COD 和总磷的去除率均呈递减趋势,均匀混合填充方式下氨氮的去除率呈现递减趋势而分层填充方式下氨氮的去除率呈现先增大后减小趋势。

参考文献:

[1] 雷向东,赖成光,王兆礼,等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护,2021,37(5):131-139. (LEI Xiangdong,LAI Chengguang,WANG Zhaoli,et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution [J]. Water Resources Protection,2021,37(5):131-139. (in Chinese))

[2] 李一平,郑可,周玉璇,等. 南方城市污水处理系统效能评估与提质增效策略制定[J]. 水资源保护,2022,38(3):50-57. (LI Yiping,ZHENG Ke,ZHOU Yuxuan,et al. Efficiency evaluation of a sewage system and strategy formulation of quality and efficiency improvement in city of Southern China[J]. Water Resources Protection,2022,38(3):50-57. (in Chinese))

[3] 陈丽娜,韩龙喜,谈俊益,等. 基于多断面水质达标的河网区点面源污染负荷优化分配模型[J]. 水资源保护,2021,37(6):128-134. (CHEN Li'na,HAN Longxi,TAN Junyi,et al. Optimal allocation model of point and non-point pollution loads in river network based on water quality standard of multiple control sections[J]. Water Resources Protection,2021,37(6):128-134. (in Chinese))

[4] 田猛,张永春. 用于控制太湖流域农村面源污染的透水坝技术试验研究[J]. 环境科学学报,2006,26(10):1665-1670. (TIAN Meng,ZHANG Yongchun. Experimental study on permeable dam technique to control rural non-point pollution in Taihu Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2006,26(10):1665-1670. (in Chinese))

[5] 崔理华,朱夕珍,汤连茂,等. 城市污水人工土快滤床与水生植物复合处理系统[J]. 中国环境科学,2000,20(5):432-435. (CUI Lihua,ZHU Xizhen,TANG Lianmao,et al. Combining artificial soil filter and aquatic plant for treating municipal sewage [J]. China Environmental Science,2000,20(5):432-435. (in Chinese))

[6] 陈润,陈中祥,莫李娟. 不同基质和植物人工湿地净化效果试验[J]. 水资源保护,2010,26(4):62-66. (CHEN Run,CHEN Zhongxiang,MO Lijuan. Experimental study on purification effect of constructed wetland with different substrates and plants[J]. Water Resources Protection,2010,26(4):62-66. (in Chinese))

[7] 朱亮,刘钢,苗伟红,等. 膨胀蛭石用于人工湿地去除氮磷的研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2008,36(2):147-151. (ZHU Liang,LIU Gang,MIAO Weihong,et al. Removal of nitrogen and phosphorus by bulgy vermiculites in constructed wetlands [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2008,36(2):147-151. (in Chinese))

[8] 陈平,韦余广,罗静. 河道人工湿地的构建及其对河道水流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(4):374-378. (CHEN Ping,WEI Yuguang,LUO Jing. Wetland construction along river course and its effect on water flow[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2007,35(4):374-378. (in Chinese))

[9] 田伟君,王超,李勇,等. 城市污染水体强化净化技术研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(2):136-139. (TIAN Weijun,WANG Chao,LI Yong,et al. Advances in intensified purification technology for urban polluted water bodies[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2004,32(2):136-139. (in Chinese))

[10] JI Zehua,TANG Wenzhong,PEI Yuansheng. Constructed wetland substrates:a review on development,function mechanisms, and application in contaminants removal[J]. Chemosphere,2022,286:131564.

[11] CORBELLA C,PUIGAGUT J. Improving domestic wastewater treatment efficiency with constructed wetland microbial fuel cells: Influence of anode material and external resistance[J]. Science of the Total Environment,2018,631-632:1406-1414.

[12] 陈众,田丰,董俊. 太湖流域河网水体负荷削减技术应用及效果分析[J]. 环境化学,2013,32(10):1995-1996. (CHEN Zhong,TIAN Feng,DONG Jun. Application and effect analysis of water load reduction technology in river network of Taihu Basin [J]. Environmental Chemistry,2013,32(10):1995-1996. (in Chinese))

[13] 袁淑方,王为东,董慧峪,等. 太湖流域源头南苕溪河口生态工程恢复及其初期水质净化效应[J]. 环境科学学报,2013,33(5):1475-1483. (YUAN Shufang,WANG Weidong,DONG Huiyu,et al. Ecological engineering restoration at the confluence of South Tiaoxi Stream in the upper Taihu Lake and its water quality improvement[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013,33(5):1475-1483. (in Chinese))

- [14] BATOOL A, SALEH T A. Removal of toxic metals from wastewater in constructed wetlands as a green technology: catalyst role of substrates and chelators[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 189: 109924.
- [15] MOHAMMED A, BABATUNDE A O. Modelling heavy metals transformation in vertical flow constructed wetlands[J]. *Ecological Modelling*, 2017, 354: 62-71.
- [16] GE Xiaoyan, CAO Xin, SONG Xinshan, et al. Bioenergy generation and simultaneous nitrate and phosphorus removal in a pyrite-based constructed wetland-microbial fuel cell[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 296: 122350.
- [17] CHEN Jun, WEI Xiaodong, LIU Yousheng, et al. Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes from domestic sewage by constructed wetlands: optimization of wetland substrates and hydraulic loading[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 240-248.
- [18] CHENG Gong, LI Qionghui, SU Zhan, et al. Preparation, optimization, and application of sustainable ceramsite substrate from coal fly ash/waterworks sludge/oyster shell for phosphorus immobilization in constructed wetlands[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 175: 572-581.
- [19] BELVISO C. State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass: a focus on zeolite synthesis processes and issues[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 65: 109-135.
- [20] 方红卫, 李晓翠, 黄磊, 等. 受污染底泥陶粒化回填技术及其底泥修复效果[J]. *水资源保护*, 2019, 35(3): 1-6. (FANG Hongwei, LI Xiaocui, HUANG Lei, et al. Ceramization of contaminated sediment backfill technology and its effects of sediment remediation[J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(3): 1-6. (in Chinese))
- [21] LAN Wei, ZHANG Jian, HU Zhen, et al. Phosphorus removal enhancement of magnesium modified constructed wetland microcosm and its mechanism study[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 335: 209-214.
- [22] 杜胜蓝, 刘文杰, 臧常娟. 壳聚糖-沸石复合体对铜绿微囊藻的去除效果[J]. *水资源保护*, 2013, 29(4): 87-90. (DU Shenglan, LIU Wenjie, ZANG Changjuan. Removal of *Microcystis aeruginosa* by chitosan-zeolite composite[J]. *Water Resources Protection*, 2013, 29(4): 87-90. (in Chinese))
- [23] MLIH R, BYDALEK F, KLUMPP E, et al. Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands: a review[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 148: 105783.
- [24] 刘露, 于鲁冀, 李廷梅, 等. 基质厚度对生态滤坝净化水体效果及机理的研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(5): 13-17. (LIU Lu, YU Luji, LI Tingmei, et al. Effect and mechanism of substrate thickness on water purification of ecological filter dam[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*, 2019, 40(5): 13-17. (in Chinese))
- [25] 张文生, 于鲁冀, 吕晓燕, 等. 生态滤坝坡度对水体污染物去除效率的影响[J]. *环境工程*, 2018, 36(8): 30-34. (ZHANG Wensheng, YU Luji, LYU Xiaoyan, et al. Effects of ecological filter dams' gradient on removal efficiency of water pollutants[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(8): 30-34. (in Chinese))
- [26] 于鲁冀, 吕晓燕, 李阳阳, 等. 生态滤坝处理微污染河水实验研究[J]. *水处理技术*, 2018, 44(5): 88-92. (YU Luji, LYU Xiaoyan, LI Yangyang, et al. Experimental study of micro-polluted river treatment by ecological filter dam[J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(5): 88-92. (in Chinese))
- [27] BELKOUTEB N, FRANKE V, MCCLEAF P, et al. Removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in a full-scale drinking water treatment plant: long-term performance of granular activated carbon (GAC) and influence of flow-rate[J]. *Water Research*, 2020, 182: 115913.
- [28] 张璐, 杨忆新, 罗明生, 等. 天然沸石去除煤化工废水中氨氮的研究[J]. *工业水处理*, 2018, 38(7): 46-49. (ZHANG Lu, YANG Yixin, LUO Mingsheng, et al. Research on natural zeolite for the removal of ammonia nitrogen from coal chemical wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(7): 46-49. (in Chinese))
- [29] 康思, 伍昌友. 三种建筑材料对氨氮和磷的吸附解析性能[J]. *武汉理工大学学报*, 2017, 39(10): 70-74. (KANG Si, WU Changyou. Adsorption propertoes of three building materials to ammonia nitrogen and phosphorus[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2017, 39(10): 70-74. (in Chinese))
- [30] 张思, 宁国辉, 杨铮铮, 等. 复合填料土壤渗滤系统处理农村生活污水的效果[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(11): 4625-4630. (ZHANG Si, NING Guohui, YANG Zhengzheng, et al. Effect of rural decentralized sewage treatment by composite filler SIS[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(11): 4625-4630. (in Chinese))
- [31] ZHENG Xiaoying, JIN Mengqi, ZHOU Xiang, et al. Enhanced removal mechanism of iron carbon micro-electrolysis constructed wetland on C, N, and P in salty permitted effluent of wastewater treatment plant[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 21-30.