

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.03.013

玄武岩纤维+间歇曝气强化人工湿地脱氮除磷效能

陈 鸣¹, 肖 君², 黄敏杰², 朱小曼¹, 黄 娟²

(1. 南京市生态环境保护科学研究院, 江苏 南京 210013; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 为增加人工湿地的微生物富集量,提高脱氮除磷性能,在传统人工湿地基质中加入玄武岩纤维填料,研究该新型基质人工湿地对常规污染物的去除效果,并比较有无间歇曝气对人工湿地处理效能和基质酶活性的影响。结果表明,在无曝气阶段,除TP以外,玄武岩纤维人工湿地对COD、TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率都在70%以上,相比对照组提高了5%~10%;在间歇曝气阶段,玄武岩纤维人工湿地对COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的去除率分别为87.47%、87.92%、92.94%和63.52%,相比对照组提高了12%~25%。此外,玄武岩纤维人工湿地曝气前后的基质酶活性均高于对照组,并且间歇曝气能够显著提高湿地内的脱氢酶和脲酶活性。

关键词: 人工湿地; 玄武岩纤维; 间歇曝气; 基质酶

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)03-0081-06

Nitrogen and Phosphorus Removal Efficiency of Constructed Wetland Enhanced by Basalt Fiber and Intermittent Aeration

CHEN Ming¹, XIAO Jun², HUANG Min-jie², ZHU Xiao-man¹, HUANG Juan²

(1. Nanjing Research Institute of Environmental Protection, Nanjing 210013, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To increase microbial abundance and improve nitrogen and phosphorus removal performance of constructed wetland, basalt fiber filler was packed into the traditional constructed wetland to explore the performance of the new constructed wetland for conventional pollutants removal, and the treatment efficiency and substrate enzyme activity of the wetland with or without artificial aeration was compared. In the stage without aeration, except for TP, the removal efficiencies of COD, TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ by basalt fiber constructed wetland were all above 70%, which increased by 5%~10% compared with the control group. In the intermittent aeration stage, the removal efficiencies of COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP by the basalt fiber constructed wetland were 87.47%, 87.92%, 92.94% and 63.52%, respectively, which increased by 12%~25% compared with the control group. In addition, the substrate enzyme activity of the basalt fiber constructed wetland before and after aeration was higher than those of the control group, and intermittent aeration could significantly increase the activity of dehydrogenase and urease in the wetland.

Key words: constructed wetland; basalt fiber; intermittent aeration; substrate enzyme

人工湿地是一种低成本、易操作、二次污染小且效果稳定的污水处理和生态修复技术。目前,人工湿地已被广泛应用于处理不同类型的污废水,包

括市政污水、工业废水、养殖废水、雨水径流等^[1]。基质是人工湿地的主要组成部分,不仅可以作为固定污染物的吸附剂^[1],还是生物膜的载体,其理化性

质直接影响微生物的附着和生长,进而影响湿地的净化效果^[2]。玄武岩纤维(BF)是一种高性能环保型无机纤维,其主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 等,近年来被广泛应用于建筑、化工和环保等领域^[3]。因其具有良好的水力特性、较大的比表面积和生物亲和性等特点,玄武岩纤维作为生物载体填料可以明显提高污染物去除效率^[3],但将玄武岩纤维应用于人工湿地基质的研究目前还鲜有报道。

此外,人工湿地系统内部的溶解氧(DO)水平也是影响一系列生化反应的关键因素^[4]。在提高基质微生物附着量的基础上,采用间歇曝气可以有效改善湿地内部的氧气供给,增强微生物活性,进而强化人工湿地的脱氮除磷性能。鉴于此,笔者在人工湿地的传统填料中掺入玄武岩纤维,构建中试装置,考察玄武岩纤维基质和间歇曝气及其交互作用对人工湿地除污性能的影响,以期为人工湿地的设计和运行提供技术支撑,并为玄武岩纤维在人工湿地填料方面的推广应用提供理论参考。

1 试验材料与方法

1.1 玄武岩纤维填料

试验用玄武岩纤维购自江苏某公司,其弹性模量 ≥ 91 GPa,浸润剂(硅烷)含量 $\leq 0.40\%$,含水量 $< 0.10\%$ 。采用扫描电子显微镜(SEM)观察玄武岩纤维填料表面,发现其表面光滑,且具有较大的比表面积。对玄武岩纤维填料进行傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析,在波数为 $3\,400\sim 3\,500\text{ cm}^{-1}$ 处检测到宽峰,这是由于O—H拉伸所致,表明玄武岩纤维表面存在羟基官能团;在波数为 $2\,250\sim 2\,400\text{ cm}^{-1}$ 处出现一个明显的 $\text{C}\equiv\text{C}$ 拉伸振动,该官能团可能导致较大的非饱和状态和较高的反应活性,从而具有更高的生物亲和力。

1.2 试验装置及运行条件

试验地点位于东南大学四牌楼校区实验室。室温条件下,构建了两组上流式垂直流人工湿地中试装置(见图1),分别为C-CW(对照组)和BF-CW(试验组)。装置主体采用圆柱形有机玻璃容器,直径为15 cm,有效容积为10.6 L。填料区总高度为50 cm,自下而上依次是:粗砾石(粒径为10~20 mm,填充高度为15 cm)、细砾石(粒径为5~8 mm,填充高度为20 cm)、石英砂(粒径为1~2 mm,填充高度为15 cm)。其中,在BF-CW组下层基质中均匀混合

100 g左右、长度为50~55 mm的玄武岩短纤维。此外,BF-CW装置底部设有曝气盘,通过输气管与外界空气泵连接。人工合成污水由蠕动泵连续泵入湿地系统,流速为 0.926 mL/min ,相应的水力停留时间(HRT)为3 d。沿程设有3个取样口,分别距离底部进水点20、40、60 cm。选用黄菖蒲作为湿地植物,纯水培养一周后移栽至装置内,每组8~10株。

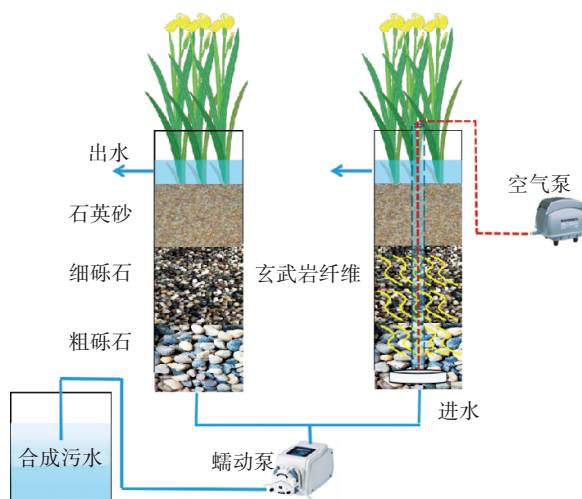


图1 人工湿地装置

Fig.1 Schematics of constructed wetland device

试验过程分为两个阶段,第一阶段为无曝气阶段(0~60 d),主要考察玄武岩纤维作为人工湿地填料的可行性;第二阶段为间歇曝气阶段(60~120 d),曝气时间:停曝时间=1 h:4 h,考察间歇曝气联合玄武岩纤维对人工湿地除污性能的强化作用。试验期间,对人工湿地的进、出水每3 d取一次样,取样时间为上午09:00,然后立即分析检测;对人工湿地基质每10 d采一次样,取样深度为0~5、5~10、10~20 cm,均匀布点且避开植物根部,将所取基质样品充分混合,设置3个平行样,采样后及时补充基质,基质酶的测定为现取现测。

1.3 进水水质与分析方法

人工湿地装置进水采用模拟生活污水,以三水合乙酸钠作为碳源,硫酸铵、硝酸钾和尿素作为氮源,磷酸二氢钾作为磷源进行配制,进水COD、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TP浓度分别为 (200.67 ± 3.62) 、 (25.24 ± 0.89) 、 (15.05 ± 0.49) 、 (6.07 ± 0.11) 、 $(3.02\pm 0.10)\text{ mg/L}$,pH值为6.5~7.5。为保证湿地植物的正常生长和微生物的代谢繁殖,进水中添加硫酸镁、硫酸亚铁、硫酸锌等微量元素。常规水质指标

均采用国家标准方法检测。湿地基质中脱氢酶(DHA)、脲酶(UA)、硝酸盐还原酶(NAR)和磷酸酶(NP)活性的测定方法参见文献[5]和[6]。

2 结果与讨论

2.1 COD去除效果

两组人工湿地系统对COD的去除效果见图2。

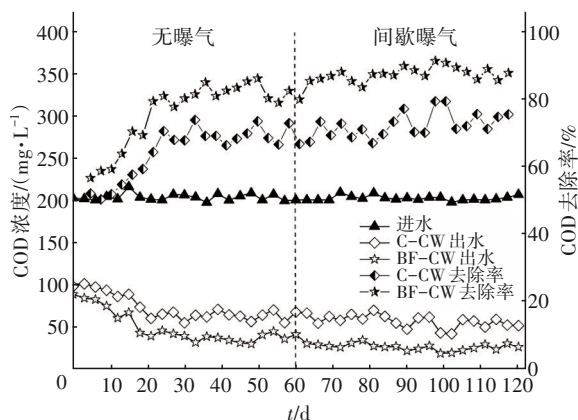


图2 两组人工湿地系统对COD的去除效果

Fig.2 Removal efficiency of COD in two constructed wetlands

由图2可以看出,在两组湿地系统中,出水COD浓度均在运行初期呈现下降趋势,之后随着运行时间的增长而逐步达到稳定。其中,在无曝气阶段,C-CW和BF-CW的出水COD平均浓度分别为 (71.69 ± 15.10) 、 (48.25 ± 13.91) mg/L,平均去除率分别为 $(64.71 \pm 7.42)\%$ 和 $(76.24 \pm 6.34)\%$,试验组BF-CW对COD的去除率比对照组C-CW提高了约12个百分点。这是由于玄武岩纤维填料的加入,一方面,增大了基质的比表面积,对有机物的吸附能力更强^[7];另一方面,玄武岩纤维在水力作用下形成相互交错的结构,有利于微生物的生长和附着,并起到支撑作用,提高了微生物的整体活性^[3]。在间歇曝气阶段,C-CW和BF-CW的出水COD平均浓度分别为 (55.87 ± 7.47) 、 (25.33 ± 3.97) mg/L,平均去除率分别为 $(72.37 \pm 3.61)\%$ 和 $(87.47 \pm 1.95)\%$,试验组BF-CW对COD的去除率较对照组C-CW提高了约15个百分点,该结果与其他研究^[8-9]报道的加强供氧有助于提高COD去除率的结果一致。这是因为好氧降解是有机物去除的主要途径,湿地环境内溶解氧的提升有利于好氧菌的生长代谢^[9],从而进一步提高COD的去除效果。而对照组的溶解氧主要来自于大气扩散和植物根系泌氧,导致湿地系

统内部氧含量较低,限制了有机物的去除。

2.2 TN去除效果

两组人工湿地系统对TN的去除效果见图3。可以看出,两组湿地的出水TN浓度在前40 d呈现波动下降趋势,之后逐渐趋于稳定。其中,在无曝气阶段,C-CW和BF-CW的出水TN平均浓度分别为 (8.21 ± 2.80) 、 (7.14 ± 3.48) mg/L,平均去除率分别为 $(66.34 \pm 11.35)\%$ 和 $(71.63 \pm 13.91)\%$,BF-CW对TN的去除效果略优于C-CW。在间歇曝气阶段,BF-CW的出水TN平均浓度为 (3.10 ± 0.84) mg/L,平均去除率升至 $(87.93 \pm 3.46)\%$,较对照组C-CW的TN去除率 $(75.68 \pm 2.95)\%$ 提高了约12个百分点。由此可见,间歇曝气对人工湿地脱氮具有明显的促进作用。研究表明,人工湿地对TN的去除主要是通过微生物的硝化和反硝化作用,也即 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 去除总和的综合反映^[10]。间歇曝气条件下,BF-CW内部出现好氧/厌氧交替的环境,有利于硝化/反硝化的进行,从而显著提升了脱氮效果。

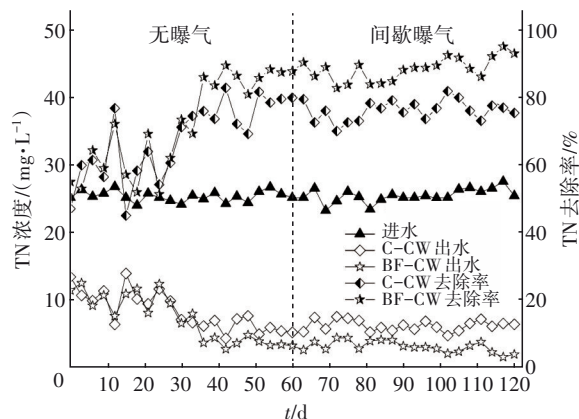


图3 两组人工湿地系统对TN的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of TN in two constructed wetlands

2.3 NH_4^+-N 去除效果

两组人工湿地系统对 NH_4^+-N 的去除效果如图4所示。可以看出,出水 NH_4^+-N 浓度的整体变化趋势与TN相似,均随运行时间的增加而逐渐降低,之后趋于稳定;在无曝气阶段两组的处理效果差异并不显著,而在增加曝气供氧后,BF-CW对 NH_4^+-N 的去除效果明显优于C-CW。在无曝气阶段,C-CW和BF-CW的出水 NH_4^+-N 平均浓度分别为 (5.35 ± 1.07) 、 (4.38 ± 1.46) mg/L;在间歇曝气阶段,两者的出水 NH_4^+-N 平均浓度分别为 (4.78 ± 0.61) 、 $(1.05 \pm$

0.48) mg/L, BF-CW 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率相比 C-CW 提高了约 25 个百分点。这是因为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除十分依赖于氧气的供给,溶解氧浓度的高低直接影响硝化作用,而硝化作用是生物脱氮的限速步骤^[4]。一方面,BF-CW 基质中的玄武岩纤维具有更大的比表面积和生物亲和性,更易形成良好的生物膜;另一方面,增加人工曝气之后,基质下层处于好氧状态,为氨氧化菌和硝化菌提供了良好的好氧环境,使其能够有效地将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[8,10],达到去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的目的。

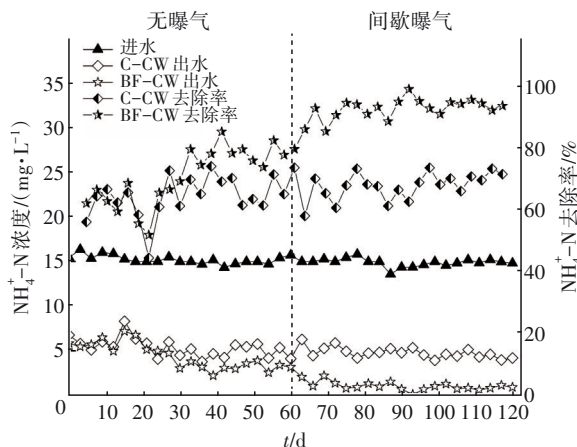


图4 两组人工湿地系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

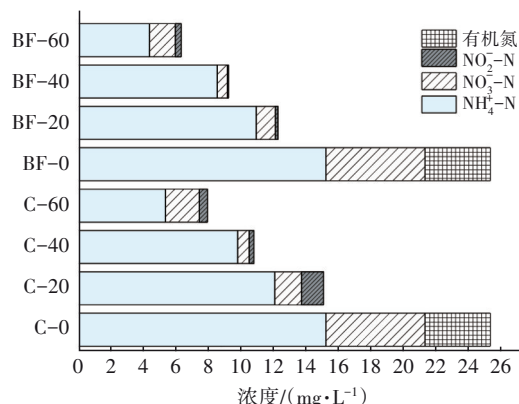
Fig.4 Removal efficiency of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in two constructed wetlands

2.4 沿程脱氮情况

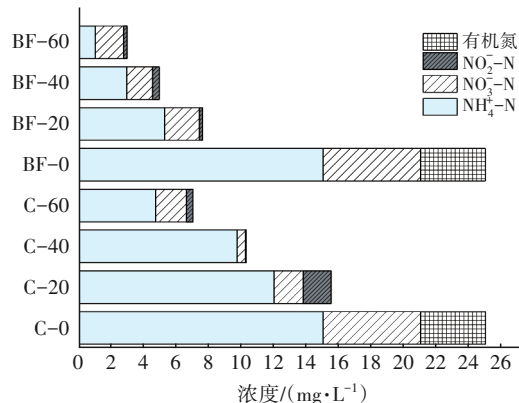
为了进一步探究玄武岩纤维和人工曝气对人工湿地脱氮效果的影响,以及垂直上向流人工湿地沿程氮的形态分布和去除途径,对比分析了两组湿地系统沿程的氮浓度变化,结果见图5。

如图5(a)所示,在无曝气阶段,试验组 BF-CW 沿程的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均低于对照组 C-CW。其中,BF-CW 沿程的硝态氮去除效果明显优于 C-CW,且亚硝态氮累积浓度较 C-CW 低。由此可以推测,在缺氧/厌氧条件下,BF-CW 基质下层的玄武岩纤维可以为反硝化菌提供更多的附着表面,促进反硝化过程的进行。此外,两组湿地的硝态氮浓度在 0~40 cm 内沿水流方向逐渐降低,而在 40~60 cm 内有小幅上升。分析可知,垂直上向流人工湿地进水中的硝态氮主要在基质中下层被去除,而基质上层由于根系泌氧和大气复氧作用,溶解氧浓度较下层要高,不利于反硝化过程的进行^[8,10],因此一部分氨氮转化而来的硝态氮在水中

累积,从而导致上层的硝态氮浓度略微上升。



a. 无曝气阶段



b. 间歇曝气阶段

图5 两组人工湿地沿程的氮浓度变化

Fig.5 Change of nitrogen concentration along two constructed wetlands

由图5(b)可知,在间歇曝气阶段,BF-CW 沿程的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均远低于对照组,由此反映出人工曝气确实能提高湿地内部的氧含量,促进氨氧化菌和硝化菌的生长代谢,从而实现 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的高效去除。而对于硝态氮,对比分析图5(a)和(b)可以发现,曝气阶段 BF-CW 沿程的硝态氮浓度均高于无曝气阶段,这说明溶解氧浓度的提高一定程度上会影响反硝化菌活性,不利于硝态氮的去除。整体来看,进水含氮污染物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为最主要的成分,增加曝气可以大幅度提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率,从而实现总体脱氮效果的提升。

2.5 TP 去除效果

两组湿地的出水 TP 浓度均随着运行时间的增长呈缓慢下降趋势,后期出现小幅度的上升,整体有些波动(见图6)。其中,在无曝气阶段,C-CW 和 BF-CW 的出水 TP 平均浓度分别为 (1.89 ± 0.32) 、 (1.81 ± 0.37) mg/L,平均去除率分别为 $(37.06 \pm$

9.38)%和(39.75±11.46)%,可见,在无曝气条件下,添加玄武岩纤维填料对人工湿地的除磷效果并无明显影响,这是由于人工湿地中磷的主要去除途径是基质的吸附和截留^[11],因而BF-CW基质内的微生物优势并不能充分体现在除磷方面。在间歇曝气阶段,C-CW和BF-CW的出水TP平均浓度分别为(1.56±0.32)、(1.11±0.19) mg/L,平均去除率分别为(48.68±7.58)%和(63.52±6.52)%,BF-CW的TP去除率比C-CW提高了约15个百分点,这一方面说明随着运行时间的增加,植物生长和微生物繁殖,湿地系统整体除污性能逐渐提升;另一方面表明增加曝气供氧能够有效改善人工湿地的除磷效果。可能的原因有:①曝气状态下,污水中的磷能够与填料表面更充分地接触,增强了基质对磷的吸附作用;②湿地内部溶解氧浓度的增加会提高氧化还原电位(ORP),从而加速 PO_4^{3-} -P反应生成磷酸盐沉淀^[12];③好氧条件促进了微生物对磷酸盐的同化吸收,而在厌氧条件下该过程是可逆的,导致磷酸盐的释放^[12]。

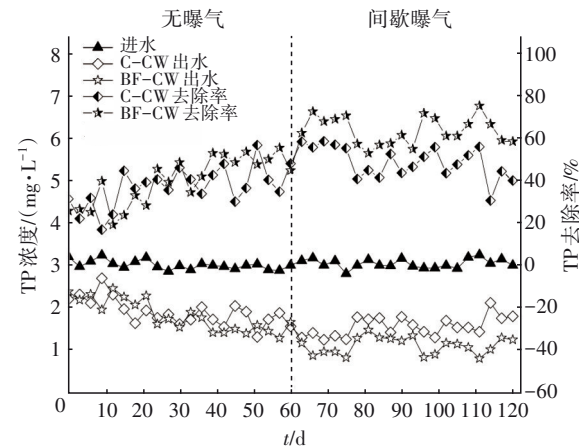


图6 两组人工湿地系统对TP的去除效果

Fig.6 Removal efficiency of TP in two constructed wetlands

2.6 基质酶活性

基质酶在湿地内污染物的分解代谢中起着重要的作用,其活性的高低可以间接反映湿地环境中微生物的活性,是评价湿地系统净化效果的重要指标^[13]。如表1所示,BF-CW基质的脱氢酶活性在无曝气阶段与对照组C-CW无明显差异,而在间歇曝气阶段明显高于对照组,这也很好地解释了该阶段BF-CW在有机物去除方面明显优于对照组C-CW。此外,与脱氮密切相关的脲酶和硝酸盐还原酶活性

在两个阶段的变化规律并不相同,在无曝气阶段,BF-CW基质的两种酶活性均略高于对照组C-CW,可能是由于BF-CW基质内的硝化菌和反硝化菌数量更多,这也与两组湿地系统在该阶段的TN去除效果相符;在间歇曝气阶段,BF-CW基质的脲酶活性显著高于对照组C-CW,而硝酸盐还原酶活性受到轻微抑制,略低于对照组C-CW,并且低于自身无曝气阶段的酶活性。可见,间歇曝气可以明显增加湿地内硝化菌的数量,而对反硝菌的生长代谢存在一定程度地抑制^[14]。在有或无曝气状态下,BF-CW基质的磷酸酶活性均显著高于对照组C-CW,这也证实了玄武岩纤维人工湿地内部微生物的整体活性优于普通人工湿地。

表1 两组人工湿地的基质酶活性对比

Tab.1 Comparison of matrix enzyme activities between two constructed wetlands

项 目		无曝气	间歇曝气
脱氢酶活性/($\mu\text{gTTC} \cdot \text{g}^{-1}$ 基质 $\cdot \text{h}^{-1}$)	C-CW	0.93±0.24	2.11±0.06
	BF-CW	1.17±0.70	4.26±0.62
脲酶活性/($\text{mgNH}_4^+-\text{N} \cdot \text{g}^{-1}$ 基质 $\cdot \text{h}^{-1}$)	C-CW	1.98±0.72	2.20±0.65
	BF-CW	2.19±0.53	4.93±1.14
硝酸盐还原酶活性/($\text{mgNO}_3^--\text{N} \cdot \text{g}^{-1}$ 基质 $\cdot \text{h}^{-1}$)	C-CW	10.53±2.04	13.48±2.49
	BF-CW	11.98±1.53	11.53±0.94
磷酸酶活性/($\text{mg 酚} \cdot \text{g}^{-1}$ 基质 $\cdot \text{h}^{-1}$)	C-CW	0.35±0.13	0.86±0.22
	BF-CW	0.49±0.06	1.18±0.14

3 结论

① 在传统人工湿地基质中掺入玄武岩纤维,可增加基质表面的微生物附着量,对有机物和含氮污染物的去除率相比普通人工湿地可提高5%~10%;再辅以间歇曝气后,对COD、TN、 NH_4^+-N 和TP的去除率较普通人工湿地可提高12%~25%。

② 在无曝气阶段,玄武岩纤维人工湿地沿程的硝态氮去除效果明显优于对照组;在间歇曝气阶段,溶解氧浓度的增加使得湿地沿程的氨氮去除率大幅度提高,从而实现总氮的高效去除。

③ 基质酶活性的高低间接反映了湿地环境中微生物的活性,玄武岩纤维人工湿地曝气前后的基质酶活性均高于普通人工湿地。此外,间歇曝气条件下,人工湿地内脱氢酶、脲酶和磷酸酶的活性升高,而硝酸盐还原酶活性受到轻微抑制。

综上,将玄武岩纤维作为微生物强富集基质,联合间歇曝气措施,强化人工湿地脱氮除磷性能具

有创新性和现实可行性,适合在实际污水处理工程中推广应用。

参考文献:

- [1] WANG Y, CAI Z, SHENG S, *et al.* Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701:134736.
- [2] WU H, ZHANG J, NGO H H, *et al.* A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 594-601.
- [3] NI H, ZHOU X, ZHANG X, *et al.* Feasibility of using basalt fiber as biofilm carrier to construct bio-nest for wastewater treatment [J]. *Chemosphere*, 2018, 212: 768-776.
- [4] MALTAIS-LANDRY G, MARANGER R, BRISSON J, *et al.* Nitrogen transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands [J]. *Water Research*, 2009, 43(2):535-545.
- [5] LI S, WU S, MA B, *et al.* Single and combined effects of divalent copper and hexavalent chromium on the performance, microbial community and enzymatic activity of sequencing batch reactor [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719: 137289.
- [6] YAN Q, XU Y, YU Y, *et al.* Effects of pharmaceuticals on microbial communities and activity of soil enzymes in mesocosm-scale constructed wetlands [J]. *Chemosphere*, 2018, 212: 245-253.
- [7] 赵帅,倪慧成,李俊波,等.玄武岩纤维填料强化A/O工艺处理生活污水[J]. *环境工程*, 2019, 37(9): 18-23.
ZHAO Shuai, NI Huicheng, LI Junbo, *et al.* Basalt fiber carrier enhanced A/O process for treatment of domestic wastewater [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(9): 18-23(in Chinese).
- [8] ZHOU X, WANG X, ZHANG H, *et al.* Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using a biochar-amended aerated vertical flow constructed wetland [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241: 269-275.
- [9] 郭烨烨,杨淑英,黄莹,等.间歇曝气潜流人工湿地的污水脱氮效果[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(4):1405-1409.
GUO Yeye, YANG Shuying, HUANG Ying, *et al.* Effect of intermittent aeration on performance of nitrogen removal in domestic wastewater treatment by subsurface constructed wetlands [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(4): 1405-1409 (in Chinese).
- [10] LIU F, FAN J, DU J, *et al.* Intensified nitrogen transformation in intermittently aerated constructed wetlands: removal pathways and microbial response mechanism [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650(2):2880-2887.
- [11] 汤显强,黄岁樑.人工湿地去污机理及其国内外应用现状[J]. *水处理技术*, 2007,33(2): 9-13.
TANG Xianqiang, HUANG Suiliang. Mechanisms of pollutant removal in constructed wetlands and their applications both at home and abroad[J]. *Technology of Water Treatment*, 2007,33(2): 9-13(in Chinese).
- [12] OEHMEN A, LEMOS P C, CARVALHO G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale [J]. *Water Research*, 2007, 41(11): 2271-2300.
- [13] NI L, XU J, CHU X, *et al.* Correlation among soil enzyme activities, root enzyme activities, and contaminant removal in two-stage in situ constructed wetlands purifying domestic wastewater [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, 97(1): 131-137.
- [14] PAN J, YU L, LI G, *et al.* Characteristics of microbial populations and enzyme activities in non-shunt and shunt subsurface wastewater infiltration systems during nitrogen removal [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61 (Part A):127-132.

作者简介:陈鸣(1981-),女,江苏盐城人,硕士,正高级工程师,注册环保工程师,注册环评工程师,研究方向为水污染防治及水环境管理。

E-mail:05499105@163.com

收稿日期:2020-09-18

修回日期:2020-10-26

(编辑:刘贵春)