

基于不同基质人工湿地的“一级A”尾水提标

陈礼洪¹, 周伟鹏¹, 裴义山¹, 马世斌², 蒋柱武¹, 林翰¹

(1. 福建理工大学生态环境与城市建设学院, 福建福州 350118;

2. 福建省融旗建设工程有限公司, 福建福清 350300)

摘要: 针对人工湿地用于污水厂尾水提标改造中脱氮效率低、关键参数水力负荷不明确等问题, 构建了砾石(湿地A)、沸石(湿地B)、沸石+黄铁矿(湿地C)为基质的3组人工湿地, 通过改变水力负荷, 研究不同基质人工湿地将市政污水厂“一级A”尾水提标至“准IV类水质”的限制因素及最优运行水力负荷。结果表明, 总氮(total nitrogen, TN)是限制尾水提标的最关键因素, 湿地A、湿地B的最佳运行水力负荷为0.30 m/d。只有湿地C在水力负荷 ≤ 1.80 m/d条件下稳定达到“IV类水质”湖库TN ≤ 1.50 mg/L的要求。综合考虑氮磷去除效果和经济用地, 得出0.90 m/d是湿地C将尾水提标至“准IV类水质”的最佳运行水力负荷, 为尾水人工湿地实际工程设计、运行、管理及黄铁矿的应用提供重要参考价值。

关键词: 人工湿地; 黄铁矿; 水力负荷; “一级A”尾水

中图分类号: TU991

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)04-0341-08

“Grade A” tail water standard improvement based on constructed wetlands with different substrates

CHEN Lihong¹, ZHOU Weipeng¹, PEI Yishan¹, MA Shibin², JIANG Zhuwu¹, LIN Han¹

(1. School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Rongqi Construction Engineering Co., Ltd., Fuqing 350300, China)

Abstract: In response to issues such as low denitrification efficiency and unclear hydraulic load of key parameters in the upgrading and reconstruction of tail water in wastewater treatment plants by constructed wetlands, three groups of constructed wetlands with gravel (wetland A), zeolite (wetland B) and zeolite + pyrite (wetland C) as substrates were constructed. By changing the hydraulic retention time (HRT), the restriction factors and optimum operation hydraulic load of upgrading the “Grade A tail water” of municipal sewage treatment plants to “Quasi-Class IV water quality” were studied in constructed wetlands with different substrates. The results indicate that total nitrogen (TN) is the most critical factor limiting tailwater elevation, and the optimal operating hydraulic load for wetlands A and B is 0.30 m/d. Only wetland C can stably meet the requirement of TN ≤ 1.50 mg/L for Class IV water quality lakes and reservoirs under hydraulic load ≤ 1.80 m/d. Taking into account the nitrogen and phosphorus removal efficiency and economic land use, it is concluded that 0.90 m/d is the optimal operating hydraulic load for wetland C to elevate the tail water to Class IV water quality. This provides important reference value for the actual engineering design, operation, management, and application of pyrite in the tail water artificial wetland.

Keywords: constructed wetlands; pyrite; hydraulic load; “Grade A” tailwater

2022年, 中国城镇污水处理率达到97.9%, 尾水大多回归水体。尽管大部分污水厂出水能

达到“一级 A”标准,但出水总氮(total nitrogen, TN)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、总磷(total phosphorus, TP)等营养源浓度依旧很高,对环境容量低的敏感受纳水体造成严重威胁^[1]。人工湿地作为一种环境友好型的生态处理技术,因其净化效果好、耐冲击负荷强等优势被用于污水厂尾水提标改造中^[2]。但利用人工湿地进行尾水深度脱氮存在有机碳源不足、TN 去除率低等严重问题^[3]。因此,研究提升尾水湿地脱氮效率及明确设计水力负荷具有重要现实意义。

提升尾水湿地脱氮效率的有效途径之一是对基质的组合优化。不同基质互相组合不仅能为微生物生长代谢提供更多良好环境,还能把各自去除污染物的能力结合起来,提升湿地去除污染物的总体性能。黄铁矿(FeS_2)已被证实可作为无机电子供体在缺氧和中性 pH 条件下驱动微生物自养反硝化^[4],将其作为湿地基质用于对氮污染物去除有很大潜力。乔雯雯等^[5]构建黄铁矿型人工湿地探究其对高氮废水的处理效果,研究发现,当 COD/TN 为 6、HRT (hydraulic retention time) 为 12 h 时黄铁矿型人工湿地的脱氮效果最好,对硝态氮和 TN 的去除率分别为 95.6%、92.1%。此外,在黄铁矿自养反硝化过程中磷污染物也能得到去除^[6-7]。GE 等^[8]构建以石灰石-黄铁矿为基质的人工湿地进行长期运行试验,3 a 内平均 TN、TP 去除率可分别达到 (69.40 ± 21.40) 、 $(87.70 \pm 14.20)\%$ 。综上,黄铁矿能以“生物驱动自养反硝化-非生物化学除磷”双重途径协同作用实现氮磷同步去除^[9]。沸石作为自然界中最常见的一种硅酸盐矿物,晶体结构独特、有良好的吸附能力、氨氮去除能力强,且其较大的表面积能为微生物提供良好的附着场所^[10],常作为湿地基质被用于污水处理中。

目前,关于黄铁矿强化尾水人工湿地脱氮性能研究的处理对象大多是人工配置的模拟污废水,无法确定其在实际应用下的可行性。尾水人工湿地将“一级 A 尾水”提标至“IV 类水水质”的设计参数水力负荷制定优化的内容未见报道以及黄铁矿与沸石组合作为湿地基质处理“一级 A”尾水的应用研究也比较少。综上,本研究构建砾石基、沸石基、沸石-黄铁矿基 3 组人工湿地系

统,基于实际污水厂出水条件,通过改变水力负荷,探究 3 组系统将“一级 A”尾水提标至“准 IV 类水”水质的限制因素及最优运行水力负荷。

1 材料与方法

1.1 试验装置设计

本试验构建 3 组垂直流人工湿地系统,分别是砾石基(湿地 A)、沸石基(湿地 B)、沸石-黄铁矿基(湿地 C),具体填料组成如表 1 所示。

表 1 湿地填料组成

Tab.1 Composition of wetland fillers

分层	粒径/ mm	厚度/ cm	填料		
			湿地 A	湿地 B	湿地 C
植物层	2~4	20		砾石	
布水层	8~16	10		砾石	
净化层	2~4	40	砾石	沸石	沸石+黄铁矿
过渡层	4~8	10		砾石	
承托层	16~32	10		砾石	

试验选取芦苇作为供试植物,筛选已有嫩芽,生长状况相近的植株种植于系统中,每个反应器 8 株。试验期间当地平均气温为 35 ℃,平均水温为 30 ℃。在 35 d 试验期内,各平行中芦苇株高、地径长势相近。目前,绝大部分研究者认为,植物的生物净增量越大,对营养盐去除效果越好^[11],通过异速生长曲线模型推算出试验期内芦苇净生物量差异不显著,植物净生物量与污染物去除呈正相关,因此忽略芦苇在试验期内对污染物去除的贡献。每组设 3 个平行,装置采用外径为 30 cm,高 1 m 的亚克力圆柱,底部设出水龙头,用于常规水质监测取样。底部出水龙头处设 U 型连通管用于控制湿地水位变化。为了更真实地模拟人工湿地,装置进行了避光处理。湿地进水通过自吸泵从二沉池末端出水口抽至集水箱,再经由蠕动泵进入到系统中,具体装置结构和工艺流程见图 1。

1.2 试验方案

湿地进水为福建某城镇污水厂二沉池末端出水,设计进出水的水质如表 2 所示,共设 5 种水力负荷,分别为 0.30、0.45、0.90、1.80、3.60 m/d,依次进行实验,在负荷改变过程中,均有经过一定的

缓冲时间,保证系统稳定后才进行取样测定。系统运行参数如表 3 所示。

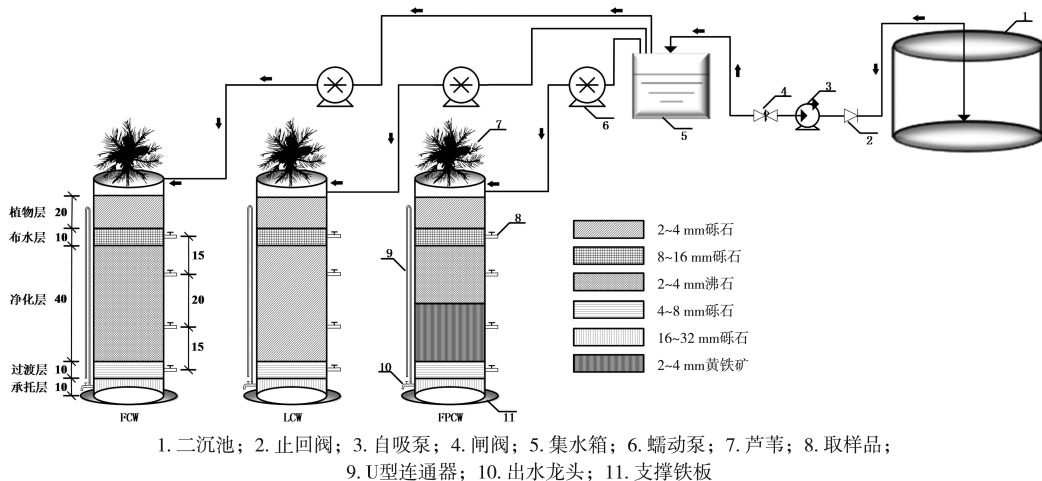


图 1 工艺流程图(单位:cm)

Fig.1 Process flow diagram (unit: cm)

表 2 设计进出水水质及各类水质标准

Tab.2 Design of inlet and outlet water quality and various water quality standards

水质指标	进水浓度/mg · L ⁻¹	浓度均值/mg · L ⁻¹	一级 A 排放标准 浓度/mg · L ⁻¹	地表水Ⅳ类水标准 浓度/mg · L ⁻¹	地表水Ⅲ类水标准 浓度/mg · L ⁻¹
TN	7.46~11.10	9.53	15.0	1.5(湖库)	1.0(湖库)
氨氮	3.02~4.03	3.601	5.0	1.5	1.0
TP	0.31~0.75	0.48	0.5	0.3(湖库 0.1)	0.2(湖库 0.05)
COD	33.60~39.0	35.71	50.0	30	20.0

表 3 湿地运行参数表

Tab.3 Wetland operation parameters

进水流量/mL · min ⁻¹	水力负荷/m · d ⁻¹	运行时间/d
14	0.30	10
21	0.45	10
42	0.90	5
84	1.800	5
168	3.600	5

1.3 水样采集与测定

试验期间系统连续运行,根据水力负荷变化于上午 9:00 采集进出水样,立即通过便携式溶解氧(dissolved oxygen, DO)仪(雷磁 JPB-607A,上海)和 pH 计(雷磁 PHS-2F,上海)测定水温、pH、DO,水样带回实验室后用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤。水质指标氨氮、TN、TP、COD、硝态氮的测定按照水和废水的国家标准分析法来进行^[12]。

1.4 数据分析

使用 Excel 2019 软件和 Origin 2021 进行图

表绘制,利用 SPSS 19.0 进行相关性分析、显著性检验和单因素方差分析。

2 结果与讨论

不同水力负荷下各湿地系统出水水质指标如表 4 所示。

2.1 3 组湿地系统对 COD 的去除效果

从图 2(b)可知,3 组系统的 COD 去除率随水力负荷的减小而降低。湿地主要通过基质吸附和生物膜作用来去除 COD,在负荷变化期间,3 组系统的出水 COD 浓度随负荷增大而降低,平均 COD 去除率随负荷的增大而升高。当水力负荷为 0.30 m/d 时,3 组系统的平均 COD 去除率达到最低,因为停留时间延长会使得湿地内部处于缺氧状态,好氧微生物活性降低,进而 COD 去除受到影响。而当负荷增大至 3.60 m/d,3 组系统的平均 COD 去除率达到最高,推测可能是停留时间缩短使水力冲刷强度提升,冲刷掉部分老化生物膜,降低因负荷减小而产生的生物膜内源呼吸、微生物

解体的影响,促进湿地对 COD 的去除。

在运行期间,3 组系统在 COD 去除上没有显著

性差异,出水 COD 均可达到 III 类水体要求($\text{COD} < 20 \text{ mg/L}$),说明 COD 不是尾水提标的限制因素。

表 4 不同水力负荷下各系统出水水质指标的平均质量浓度

Tab.4 Average mass concentration of effluent quality indicators of various systems under different hydraulic loads

水力负荷/ $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	湿地 系统	$\rho_{\text{COD}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		$\rho_{\text{氨氮}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		$\rho_{\text{TN}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		$\rho_{\text{TP}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	
		进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
3.60	湿地 C		12.00±2.71		0.19±0.04		2.34±0.11		0.082±0.056
	湿地 B	35.50±1.91	8.50±1.29	3.79±0.30	0.18±0.02	9.19±1.54	3.73±0.67	0.66±0.07	0.117±0.030
	湿地 A		10.50±3.42		1.57±0.27		6.15±0.62		0.224±0.050
1.80	湿地 C		12.75±4.86		0.18±0.09		1.29±0.49		0.140±0.075
	湿地 B	37.00±1.41	12.50±2.52	3.46±0.31	0.15±0.09	9.04±1.34	3.51±0.75	0.32±0.07	0.088±0.020
	湿地 A		11.25±5.12		0.29±0.20		7.79±1.53		0.104±0.040
0.90	湿地 C		12.34±0.57		0.24±0.07		1.28±0.28		0.037±0.006
	湿地 B	35.50±1.76	9.06±2.39	3.600±0.05	0.24±0.11	10.15±0.89	2.85±0.59	0.46±0.09	0.173±0.038
	湿地 A		11.02±2.22		0.26±0.07		3.73±0.59		0.133±0.067
0.45	湿地 C		12.41±2.22		0.23±0.05		1.12±0.34		0.087±0.007
	湿地 B	34.39±0.35	12.47±1.08	3.56±0.05	0.17±0.04	9.48±0.30	2.36±0.64	0.48±0.12	0.050±0.005
	湿地 A		12.46±2.96		0.42±0.16		2.34±0.22		0.098±0.010
0.30	湿地 C		18.85±3.21		0.24±0.05		0.87±0.08		0.088±0.008
	湿地 B	36.15±1.802	16.53±4.02	3.79±0.22	0.16±0.05	9.80±0.58	2.87±0.24	0.46±0.12	0.091±0.016
	湿地 A		17.61±3.600		0.63±0.15		2.35±0.99		0.087±0.010

2.2 3 组湿地系统对氨氮的去除效果

如图 3 所示,当水力负荷在 0.30~1.80 m/d 时,3 组系统的出水氨氮浓度和平均氨氮去除率变化较稳定。从图 3(b)可知,当水力负荷为 3.60 m/d 时,湿地 A 的平均氨氮去除率明显降低,因为负荷过大,停留时间变短使得污水很快被排出系统外,减少氨氮与生物膜的接触时间,没能得到充分降解。而湿地 B 和湿地 C 的平均氨氮去除率在水力负荷为 3.60 m/d 时依旧能保持较高水平,比湿地 A 高出 36.47% 和 36.72% ($p < 0.05$),说明水力冲刷强度提升不会对湿地 B 和湿地 C 的氨氮去除造成影响。

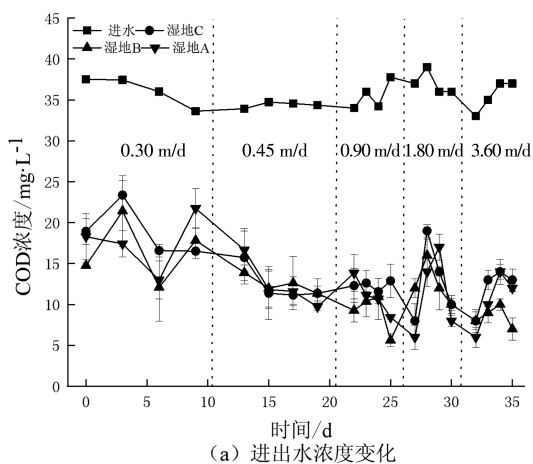
相较于砾石,沸石具有独特稳定的铝氧八面体结构,内部含有 Na^+ 、 K^+ 等带正电荷的金属离子,而水中依附能力更强的 NH_4^+ 就会将其交换出去,从而实现 NH_4^+ 的去除^[13]。其次,沸石比表面积大,内部有发达的孔道和空旷的骨架结构,为参与硝化反应的好氧微生物提供适宜的生存环境。

因此,与湿地 A 相比,添加有沸石的湿地 B 和湿地 C 的氨氮去除能力更好,且在高负荷条件下,依旧能保持较高的氨氮去除率。

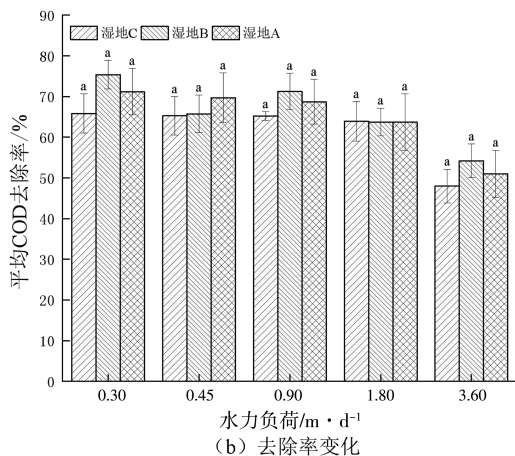
运行期间,湿地 B、湿地 C 的出水氨氮均值分别为 0.18 ± 0.07 、 $0.22 \pm 0.06 \text{ mg/L}$,去除率变化组间差异不显著,与添加黄铁矿的湿地 C 相比,湿地 B 的平均氨氮去除率会略高,表明黄铁矿的添加不会对湿地的氨氮去除性能产生影响,沸石与黄铁矿的基质组合在氨氮处理中没有协同作用。此外,在负荷变化期间,除却湿地 A 在水力负荷为 3.60 m/d 时平均出水氨氮为 $1.57 \pm 0.27 \text{ mg/L}$ 未能达标外,3 组系统的出水氨氮均能达到 III 类水体要求,说明氨氮不是尾水人工湿地处理的“瓶颈”。

2.3 3 组湿地系统对 TN 的去除效果

由图 4(a)可知,湿地 A、B 的出水 TN 浓度随负荷增大而升高。当水力负荷在 0.30~1.80 m/d 时,湿地 C 的出水 TN 浓度变化较稳定,基本维持在 $0.87 \sim 1.29 \text{ mg/L}$,能稳定达到 IV 类水体要求。



(a) 进出水浓度变化



(b) 去除率变化

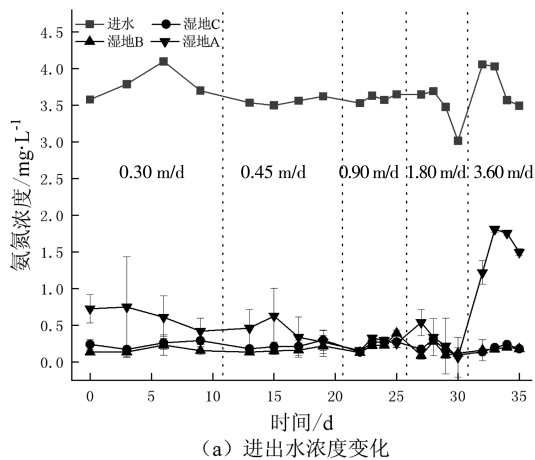
注:图 2(b)中不同小写字母表示相同水力负荷下不同湿地系统的 COD 去除率存在显著差异($p < 0.05$)

图 2 不同湿地系统的 COD 去除效果

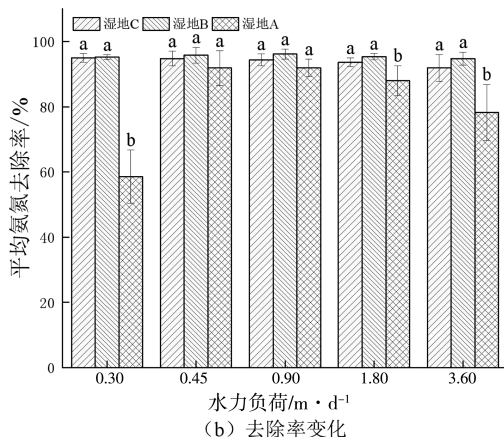
Fig.2 COD removal effects of different wetland systems

但负荷增大至 3.60 m/d 时,湿地 C 的出水 TN 浓度明显升高,平均出水 TN 浓度为 2.34 ± 0.11 mg/L,未能达到“IV 类水质”湖库 $TN \leq 1.50$ mg/L 的要求,说明水力负荷为 1.80 m/d 是湿地 C 的 TN 去除拐点。

湿地去除 TN 的主要途径是微生物反硝化脱氮。据图 4(b)可知,湿地 B 和湿地 A 的平均 TN 去除率在水力负荷为 0.30、0.45 m/d 下无显著性差异,但在负荷为 0.90 m/d 时出现转折。当水力负荷处于 0.90~3.60 m/d 时,湿地 B 和湿地 A 的平均 TN 去除率都呈下降趋势,这是由于随着负荷增大,生物膜内的缺氧环境因水力冲刷而受到影响,硝化程度低,进而抑制其反硝化作用。但相比于湿地 A,湿地 B 的平均 TN 去除率下降幅度会相对较小。推测是因为沸石的独特晶体结构和稳定骨架,其氨氮去除能力高于砾石。结合图 3



(a) 进出水浓度变化



(b) 去除率变化

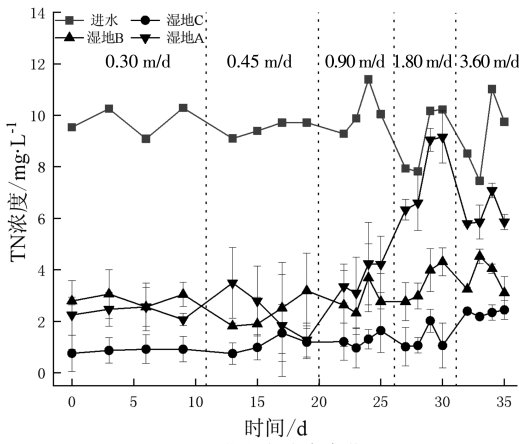
注:图 3(b)中不同小写字母表示相同水力负荷下不同湿地系统的氨氮去除率存在显著差异($p < 0.05$)

图 3 不同湿地系统的氨氮去除效果

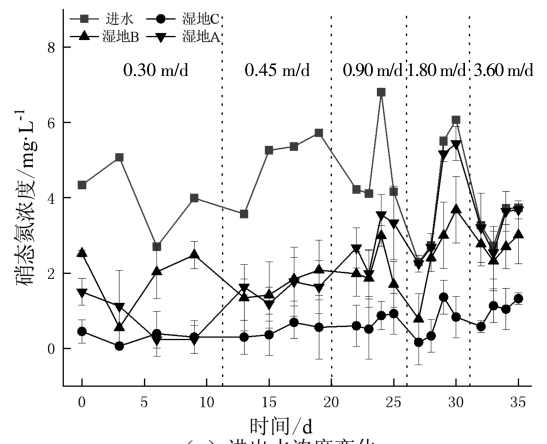
Fig.3 Ammonia nitrogen removal effects of different wetland systems

(b)分析可知,随着水力冲刷强度的逐渐提升,湿地 B 的平均氨氮去除率始终保持较高水平,其硝化程度受影响较小,反硝化作用抑制效果较弱。所以,在高负荷下,湿地 B 的平均 TN 去除率虽有下降,但依旧高于湿地 A。

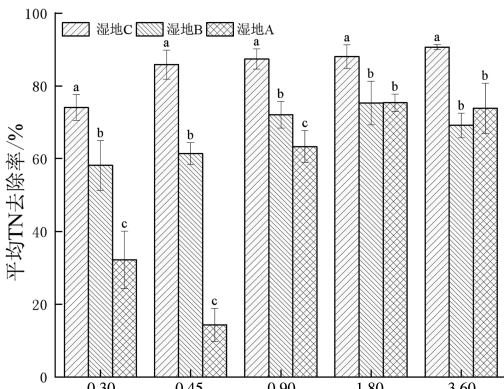
此外,在负荷变化期间,与湿地 B 和湿地 A 相比,添加有黄铁矿的湿地 C 的平均 TN 去除率与两系统均存在显著性差异,特别在水力负荷为 1.80 m/d 时,湿地 C 的平均 TN 去除率比湿地 B 和湿地 A 分别高出 24.45% 和 71.5% ($p < 0.05$)。这是因为黄铁矿的主要成分 FeS_2 能替代有机碳源作为生物反硝化所需的电子供体,强化了碳源不足条件下自养反硝化反应,提高了 TN 的去除效果,从而使沸石-黄铁矿为基质的人工湿地系统对 TN 去除有较大优势。并且,相关研究也证明了黄铁矿在使用过程中能进行自养反硝化作



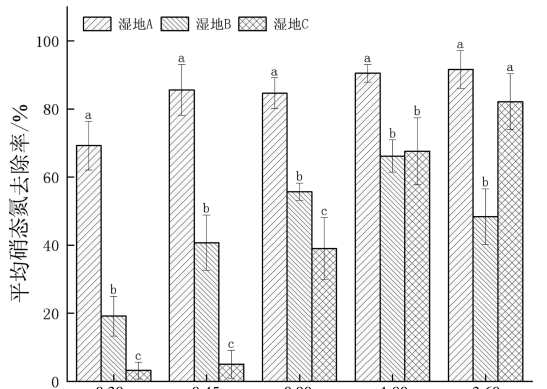
(a) 进出水浓度变化



(a) 进出水浓度变化



(b) 去除率变化



(b) 去除率变化

注:图 4(b)中不同小写字母表示相同水力负荷下不同湿地系统的 TN 去除率存在显著差异($p < 0.05$)

注:图 5(b)中不同小写字母表示相同水力负荷下不同湿地系统的硝态氮去除率存在显著差异($p < 0.05$)

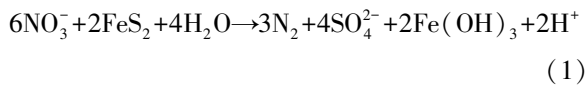
图 4 不同湿地系统的 TN 去除效果

图 5 不同湿地系统的硝态氮去除效果

Fig.4 TN removal effects of different wetland systems

Fig.5 Nitrate nitrogen removal effects of different wetland systems

用,提升湿地内部电子转移能力,为微生物脱氮提供所需要的电子供体^[14],以此来去除水中硝酸盐,其反应式为:



结合图 5(a)可知,随着负荷增大,3 组系统的出水硝态氮浓度变化趋势与 TN 基本一致。如图 5(b)所示,在负荷变化期间,湿地 C 的平均硝态氮去除率均优于湿地 B 和湿地 A,存在显著性差异,特别在水力负荷为 1.80 m/d 时,平均硝态氮去除率比两系统高了 44.93% 和 80.63% ($p < 0.05$),说明黄铁矿驱动的自养反硝化在硝态氮去除中发挥了重要作用。

图 6 反映了运行期内 3 组系统中 3 种主要形态氮污染物的浓度动态变化。可以看出,湿地 A 脱氮效果最差,在水力负 1.80 m/d 时,硝态氮累

积量最大。运行期间,各湿地均以硝态氮为氮污染物的主要贡献者。此外,与湿地 C 相比,湿地 B 的氮污染物中含有较多硝态氮,这也证明了黄铁矿的添加是能提升湿地对硝态氮的去除效果。

2.4 3 组湿地系统的 TP 去除效果

由图 7(a)可知,在水力负荷为 0.30~0.90 m/d 下,湿地 C 的出水 TP 浓度逐渐降低,而湿地 B 和湿地 A 的出水 TP 浓度则是逐渐升高。但当水力负荷为 1.80 m/d 时,3 组系统的出水 TP 浓度变化出现转折,湿地 C 的出水 TP 浓度明显升高,另外两组系统的出水 TP 浓度则是达到最低。随着水力负荷进一步增大,3 组系统的出水 TP 浓度均呈升高后降低的趋势。其中,运行期间内,3 组系统的出水 TP 浓度均能满足地表水 IV 类水标准。

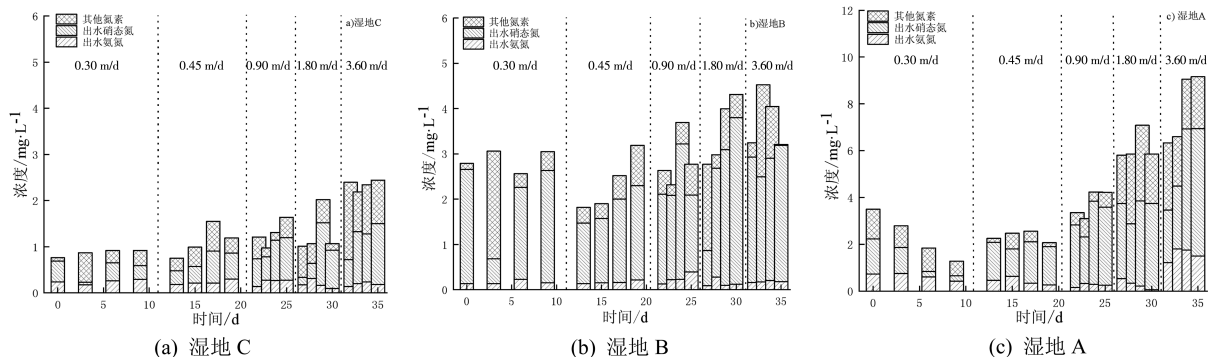
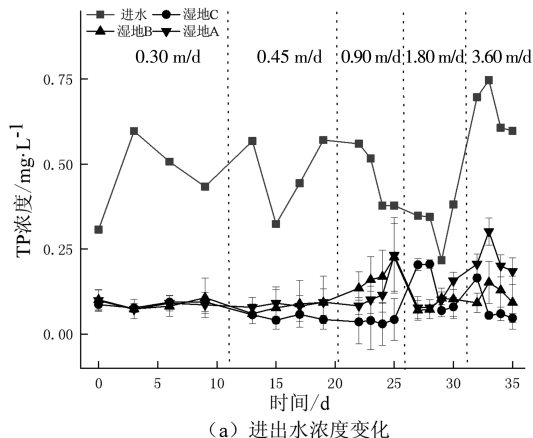
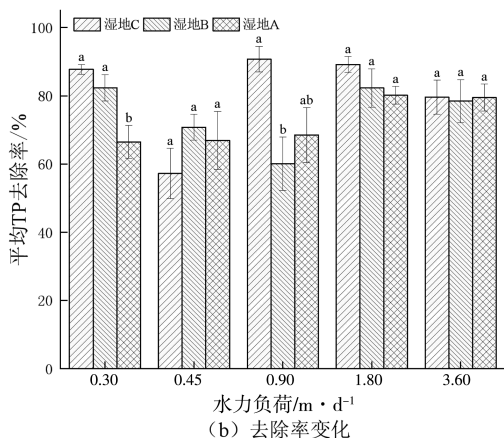


图 6 运行期内各系统氮污染物质量浓度动态变化

Fig.6 Dynamic changes in nitrogen pollutant mass concentration in different systems during operation



(a) 进出水浓度变化



(b) 去除率变化

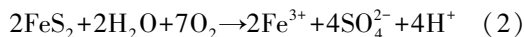
注:图 7(b)中不同小写字母表示相同水力负荷下不同湿地系统的 TP 去除率存在显著差异($p < 0.05$)

图 7 不同湿地系统的 TP 去除效果

Fig.7 TP removal effects of different wetland systems

湿地去除 TP 的主要途径是基质的物理化学作用。从图 7(b)可知,湿地 A 的平均 TP 去除率随负荷增大而逐渐降低,在水力负荷为 3.60 m/d 时达到最低。而湿地 B 的平均 TP 去除率在水力负荷为 0.90 m/d 时达到最低,仅有 60.1%,但随着负荷进一步增大,其平均 TP 去除率却逐渐升

高。此外,在负荷变化期间(除水力负荷为 1.80 m/d 外),湿地 C 的平均 TP 去除率均高于湿地 B,在水力负荷为 0.90 m/d 时相差最大,平均 TP 去除率比湿地 B 高出 30.65% ($p < 0.05$)。这可能是由于沸石主要依靠自身的吸附沉淀作用来除磷,Al-P 是其吸附后磷素的主要存在形态^[15],且沸石的基本结构单元之一是铝氧八面体,当中含有较高的 Al,而其中的 Al 主要以铝硅酸盐为主,致使其水溶性盐含量低,除磷能力不高。而黄铁矿能通过 O_2 驱动化学氧化和自养反硝化作用实现对磷的去除,如式(1)和式(2)。



该反应过程中产生的 Fe^{3+} 、铁的氧化物和氢氧化铁能吸附水中磷酸根,与其反应生成沉淀。因此,相较于湿地 B,湿地 C 会有较高的 TP 去除率。当水力负荷为 1.80 m/d 时,湿地 C 的平均 TP 去除率大幅降低,仅有 57.2%,这可能是随着水力负荷的提高,产生了较多的铁沉积物,附着在基质表面,而提升后的水力负荷不足以冲刷掉铁沉积物,出现了铁结壳现象^[9],抑制了 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} 的作用,减少了 Fe^{3+} 的除磷作用,造成 TP 去除率下降。但随着水力负荷增大至 3.60 m/d 时,湿地 C 的平均 TP 去除率却升高至 87.78%,推测是负荷的进一步缩短使得水力冲刷强度提升,冲刷掉沉积在黄铁矿表面的高价态铁沉淀物,恢复了黄铁矿的化学除磷作用,但具体原因还有待研究。而在水力负荷为 0.30、0.45 m/d 时,湿地 C 的平均 TP 去除率略高于另外两组系统,对 TP 的去除影响并不显著。这是因为水力负荷增大使内部会呈严重缺氧状态,导致黄铁矿化学氧化作用减弱,所产生的 Fe^{3+} 、铁的氧化物和氢氧化铁减少,影响 TP 去除,所以低负荷下湿地 C 的

TP 去除能力并不是很有优势。

3 结论

1) 3 组系统在 COD 去除上无显著性差异。在水力负荷为 0.30、0.45、0.90、1.80、3.60 m/d 条件下,出水 COD 均能达到 IV 类水体要求。因此, COD 不是尾水提标的限制性因素。

2) 湿地 C 和湿地 B 在 NH_4^+-N 去除上无显著性差异,在水力负荷为 0.30、0.45、0.90、1.80、3.60 m/d 条件下,出水 NH_4^+-N 均能达到 III 类水体要求。而除水力负荷为 3.60 m/d 外,在其余条件下湿地 A 的出水 NH_4^+-N 也能达到 III 类水体要求。因此, NH_4^+-N 并不是尾水提标的“瓶颈”。

3) 湿地 A 和湿地 B 在水力负荷为 0.30、0.45、0.90、1.80、3.60 m/d 条件下, TN 均难以达到“IV 类水水质”湖库 $\text{TN} \leq 1.50 \text{ mg/L}$ 的要求。湿

地 C 的出水 TN 在水力负荷为 0.30、0.45、0.90、1.80 m/d 条件下能稳定达到“IV 类水水质”湖库 $\text{TN} \leq 1.5 \text{ mg/L}$ 的要求,但在水力负荷为 3.60 m/d 时,湿地 C 的平均出水 TN 浓度为 $2.34 \pm 0.11 \text{ mg/L}$,未能达标,这说明水力负荷为 1.80 m/d 是其 TN 去除的拐点。另外,运行期间,3 组湿地系统的出水 TP 均能达到 IV 类水体要求 ($< 0.30 \text{ mg/L}$)。

4) 综上所述, TN 是影响“一级 A”尾水提标至“准 IV 类水水质”的重要限制因素。与湿地 B 相比,黄铁矿的添加能明显提升尾水湿地的氮磷去除能力。其中,湿地 A 和湿地 B 的最佳运行水力负荷为 0.30 m/d,湿地 C 的最佳运行水力负荷为 0.90 m/d 建议传统砾石基、沸石基尾水人工湿地在低负荷运行时需额外投加碳源,保证出水 TN 达标。

参考文献:

- [1] SCHINDLER D W, CARPENTER S R, CHAPRA S C, et al. Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50: 8923–8929.
- [2] 孔令为, 邵卫伟, 梅荣武, 等. 浙江省城镇污水处理厂尾水人工湿地深度提标研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(2): 39–43.
- [3] ZHANG P, PENG Y, LU J, et al. Microbial communities and functional genes of nitrogen cycling in an electrolysis augmented constructed wetland treating wastewater treatment plant effluent[J]. *Chemosphere*, 2018, 211: 25–33.
- [4] LIANG J, CHEN N, TONG S, et al. Sulfur autotrophic denitrification(SAD) driven by homogeneous composite particles containing CaCO_3 -type kitchen waste for groundwater remediation[J]. *Chemosphere*, 2018, 212: 954–963.
- [5] 乔雯雯, 王宇晖, 宋新山. 黄铁矿强化人工湿地反硝化处理含氮废水的研究[J]. *工业水处理*, 2021, 41(4): 77–83.
- [6] CARREY R, BALLESE E, Blanch A R, et al. Combining multi-isotopic and molecular source tracking methods to identify nitrate pollution sources in surface and groundwater[J]. *Water Research*, 2021, 188: 116537.
- [7] CAOUA F D, MASCOLO M C, PIROZZI F, et al. Simultaneous denitrification phosphorus recovery and low sulfate production in a recirculated pyrite-packed biofilter(RPPB) [J]. *Chemosphere*, 2020, 255: 126977.
- [8] GE Z B, WEI D Y, ZHANG J, et al. Natural pyrite to enhance simultaneous long-term nitrogen and phosphorus removal in constructed wetland: three years of pilot study[J]. *Water Research*, 2019, 148: 153–161.
- [9] 李亚楠. 黄铁矿生物滤池对污水厂尾水深度处理效果和机制研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
- [10] 马容真, 郝庆菊, 翁思佳, 等. 基质填充方式对铁碳-沸石人工湿地水质净化的影响[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(9): 130–141.
- [11] 胡傲, 李宇辉, 杨宇静, 等. 不同生长型沉水植物配置对生物量积累和水质净化效果的影响[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(5): 1484–1492.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 赵仲婧. 铁碳微电解及沸石添加对曝气人工湿地水质净化和温室气体排放的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [14] CHEN Y F, SHAO Z Y, KONG Z, et al. Study of pyrite based autotrophic denitrification system for low-carbon source stormwater treatment[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 37: 101414.
- [15] 贺银海. 沸石同步脱氮除磷功能调控及机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.

(责任编辑: 方素华)