

# 硫-铁自养反硝化人工湿地强化农村 黑臭水体深度脱氮

高镜清<sup>1,2</sup>, 李煜翹<sup>1</sup>, 张政<sup>3</sup>, 王世龙<sup>4</sup>, 王帅<sup>5</sup>, 张鑫<sup>6</sup>

(1. 郑州大学 生态与环境学院 河南 郑州 450001; 2. 水利部 黄河流域水治理与水安全重点实验室 河南 郑州 450003; 3. 中建八局华中建设有限公司 湖北 武汉 430021;  
4. 河海大学 环境学院 江苏 南京 210098; 5. 郑州源致和环保科技有限公司 河南 郑州 450001;  
6. 广州铁诚工程质量检测有限公司 广东 广州 510010)

**摘要:** 现阶段研究分析发现, N、S 元素是导致水体黑臭的关键所在, 由此构建硫-铁自养反硝化人工湿地系统治理农村黑臭水体。该自养反硝化系统以硫铁矿为电子供体、以青石为酸碱平衡调节材料, 按照 3 : 2 : 1 : 1 的比例混合, 通过分析不同水力停留时间(HRT)下湿地系统的脱氮效果、沿程脱氮变化及微生物群落情况, 验证该人工湿地系统的脱氮治理效果。结果表明, 在 HRT 为 24 h 条件下系统的脱氮效果最好, TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 分别从 (12.88±0.4)、(7.73±0.76) mg/L 降至 (1.46±0.34)、(0.83±0.14) mg/L, 最高去除率分别为 91.3%、91.8%; 但随着 HRT 的下降, 脱氮效果也随之降低。随取样口 1~4 相对高度的增加, 系统脱氮效率明显上升, 其中, 由硫铁矿、火山岩、青石按照 3 : 5 : 2 的体积比复配而成的人工湿地系统在取样口 4 的 TN 及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率分别为 87.07%、85.88%, 取样口 1 的 TN 及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 去除率仅为 15.91%、16.88%。此外, *Proteobacteria* (变形门菌)、*Bacteroidetes* (拟杆菌门) 等为该系统中的优势菌门。

**关键词:** 农村黑臭水体; 自养反硝化; 人工湿地; 脱氮效果; 沿程变化

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1671-6841(2025)02-0089-06

DOI: 10.13705/j.issn.1671-6841.2023031

## Effect of Sulfur-iron Autotrophic Denitrification Constructed Wetland on Nitrogen in Black and Smelly Water

GAO Jingqing<sup>1,2</sup>, LI Yuxuan<sup>1</sup>, ZHANG Zheng<sup>3</sup>, WANG Shilong<sup>4</sup>, WANG Shuai<sup>5</sup>, ZHANG Xin<sup>6</sup>

(1. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Key Laboratory of Water Management and Water Security in the Yellow River Basin, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China;

3. China Construction Eighth Huazhong Construction Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430021, China;

4. School of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. Zhengzhou Yuanzhihe Environmental Protection Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 6. Guangzhou Tiecheng Engineering Quality Testing Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

**Abstract:** Current studies indicated that N and S elements were the key factors leading to water body black and odor. A S-Fe self-supporting denitrifying wetland system was constructed to control the black and odor water in rural areas of the Yellow River Basin. The autotrophical denitrification system used pyrite as electron donor and bluestone as acid-base balance regulating material, mixed at ratios of 3 : 2 and

收稿日期: 2023-02-08

基金项目: 中原英才计划(ZYYCYU202012183); 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室研究基金项目(2022-SYSSJJ-XX); 郑州市惠民计划项目(2021KJHM0007); 河南省高等学校重点科研项目(23B610004); 河南省博士后基金会项目(202003027); 河南省水体污染防治与修复重点实验室开放基金项目(CJSP2021007)。

第一作者: 高镜清(1980—), 男, 教授, 主要从事环境污染控制与生态修复研究, E-mail: jingqinggao@zzu.edu.cn。

1 : 1. The nitrogen removal effect of the constructed wetland system with different hydraulic residence time (HRT), the change in nitrogen removal along the path and microbial communities, were analyzed to verify the nitrogen removal and treatment effect of the constructed wetland system. The results showed that the system had the best denitrification effect when HRT was 24 h. TN and  $\text{NO}_3^-$ -N decreased from  $(12.88 \pm 0.4)$ ,  $(7.73 \pm 0.76)$  mg/L to  $(1.46 \pm 0.34)$  and  $(0.83 \pm 0.14)$  mg/L respectively, with the highest removal rates of 91.3% and 91.8%. However, with the decrease of HRT, the nitrogen removal effect decreased. With the increase of relative height of sampling port 1~4, the nitrogen removal efficiency of the system increased significantly. Among them, the TN and  $\text{NO}_3^-$ -N removal rates of the constructed wetland system composed of pyrite, volcanic rock and bluestone with the volume ratio of 3 : 5 : 2, at the sampling port 4 were 87.07% and 85.88%, respectively. The removal rates of TN and  $\text{NO}_3^-$ -N of sampling port 1 were only 15.91% and 16.88%. In addition, *Proteobacteria* and *Bacteroidetes* were the dominant bacteria in this system.

**Key words:** rural dark smelling water bodies; autotrophic denitrification; constructed wetlands; denitrification effect; along course changes

## 0 引言

在《农村黑臭水体治理工作指南(试行)》中将农村黑臭水体的定义为:各县(市、区、行政村、社区等)范围内颜色明显异常或散发浓烈(难闻)气味的水体<sup>[1]</sup>。随着社会经济的发展,农村黑臭水体的治理工作已经成为下一阶段农村人居环境改善的重点。目前我国黄河流域省份农村黑臭水体治理工作依然形势严峻。

现阶段研究认为,水体中  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\Sigma \text{S}^{2-}$  ( $\Sigma \text{S}^{2-} = \text{S}^{2-} + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{S}$ ) 的浓度与 DO 值是导致黑臭水体现象发生的关键因素。当水体处于缺氧或厌氧环境时,氧化还原条件发生转变且硫酸盐还原菌和铁还原菌的生长得到极大的促进<sup>[2-3]</sup>,使 Fe、Mn、S 元素价态发生改变,生成大量的  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{S}^{2-}$  离子从底泥扩散至上覆水体中;扩散至水体中的  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  与  $\text{S}^{2-}$  结合生成 FeS 和 MnS 等黑色的金属硫化物,致使水体出现发黑的现象<sup>[4-6]</sup>。同时在该条件下,水体中所形成的  $\beta$ -环柠檬醛、 $\beta$ -紫罗兰酮以及水体中甲基与硫结合生成的挥发性有机硫化物,如二甲基硫醚(DMS)、二甲基二硫醚(DMDS)、二甲基三硫醚(DMTS)是造成水体发臭的主要化学物质<sup>[7-9]</sup>;在厌氧分解过程中生成的  $\text{H}_2\text{S}$ 、氨气等气体同样会产生恶臭气味,造成水体产生发臭现象<sup>[10]</sup>。在《农村黑臭水体治理工作指南(试行)》中则将水中的氨氮作为了评判水体黑臭的主要指标之一。

硫自养反硝化的研究开始于 20 世纪 70 年代,其主要通过利用  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、 $\text{S}^0$  等还原态的硫为电子供体将硝酸盐氮还原为氮气,且无须加入额

外的碳源<sup>[11-12]</sup>。现阶段国内外研究者将硫自养反硝化与人工湿地相结合,进行湿地净化处理的研究已屡见不鲜,而基质又是人工湿地系统中的关键所在<sup>[13]</sup>。李芳芳等<sup>[14]</sup>以硫铁矿、硫磺、白云石等作为人工湿地的基质材料对二沉池尾水进行强化处理,其出水  $\text{NO}_3^-$ -N 和 TP 的浓度分别为 10.31 mg/L 和 0.10 mg/L。刘佃娜等<sup>[15]</sup>以硫磺、石灰石等构建垂直流人工湿地,发现  $\text{NO}_3^-$ -N 去除率可达到 92.2% 以上。Ge 等<sup>[16]</sup>以硫铁矿作为人工湿地的基质,发现在 3 年内 TN 去除率可以维持在  $(69.4 \pm 21.4)\%$  左右。但目前为止,将硫-铁自养反硝化人工湿地系统作用于农村黑臭水体的研究鲜有报道。

本研究以黑臭水体成因的研究现状与硫自养反硝化的原理为基础,构建一种适应于农村黑臭水体的硫-铁自养反硝化人工湿地系统。通过对该系统不同水力停留时间下的脱氮效果、沿程变化、后续实验中的微生物群落等进行综合分析研究,以期为该人工湿地系统在农村黑臭水体净化中的应用提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

本研究实验装置示意图见图 1。本装置由有机玻璃制成,高 550 mm、内径为 50 mm、容积为 1.08 L。实验装置 A 中由硫铁矿(粒径:2~4 mm)、火山岩(粒径:5~8 mm)、青石(粒径:12~15 mm)按照 3 : 5 : 2 的体积比复配而成;装置 B 为硫铁矿(粒径:2~4 mm)、火山岩(粒径:5~8 mm)、青石(粒径:12~15 mm)按照 1 : 3 : 1 的体积比复配而成。

装置采取底端进水,同时为探究沿程因素影响,于进水口上端 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 处设置 4 个出水口,装置运行期间以最上端出水口出水进行水质分析。

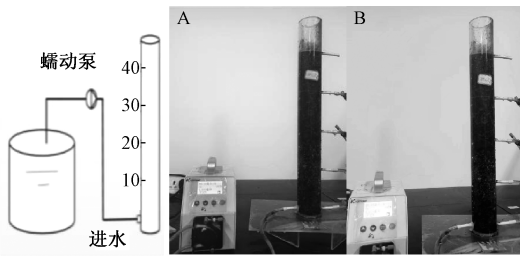


图1 实验装置

Figure 1 Experiment setup

在早上 9:00 进行取样测定,实验前期为保证实验装置稳定运行进行连续测样,运行稳定后每间隔 2 天进行一次取样测定。

## 1.2 污泥接种

实验所接种的污泥取自郑州市五龙口水务处理分公司厌氧段,MLSS 为 4 320 mg/L。为保证挂膜效果,加快装置启动,运行前期采用循环进水的方式,在启动完成后采取连续进水。

## 1.3 实验污水

本实验污水取自黄河流域河南省荥阳市某乡村受污染黑臭水体,水中 COD、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度分别为 (82.7 ± 5.9)、(13.22 ± 0.91)、(7.61 ± 0.88)、(2.78 ± 0.32)、(60.17 ± 6.77) mg/L。

## 1.4 检测方法

水中 COD、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 的测定均依照《水和废水监测分析方法(第四版)》进行。其他指标如 pH、DO、温度等均采用上海雷磁便携式多参数水质分析仪 DZB-712 进行测定。在最佳 HRT 条件下运行结束后,分别对不同取样口 5 cm 内的基质混合取样并利用 16S rRNA 高通量测序技术对后续实验中的微生物群落进行测定。

## 1.5 数据分析

利用 Excel 2016 进行数据收集整理;SPSS 26 进行数据分析,差异显著性水平为 0.05;Origin 2021 进行绘图。

# 2 结果与讨论

## 2.1 系统脱氮效果

硫-铁自养反硝化人工湿地系统出水 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 随时间变化情况见图 2。两系统对 TN 的去除均有着较为明显的效果,但随着水力停留时间(hydraulic

residence time, HRT) 的降低, TN 的去除率明显下降。当 HRT 为 24 h 时, A 系统 TN 平均去除率为 (88.37 ± 2.66)%, 最高去除率达到了 91.03%; B 系统 TN 平均去除率为 (81.82 ± 2.26)%, 最高去除率达到了 84.08%。当 HRT 下降至 12 h 时, 两系统 TN 去除率均有不同程度下降, A 系统 TN 去除率仍能维持在 80% 以上, 但 B 系统仅能维持在 70% 左右。当 HRT 下降至 6 h 时, A、B 两系统去除率均出现大幅度下降, A、B 两系统最低去除率为 52.74%、35.71%。

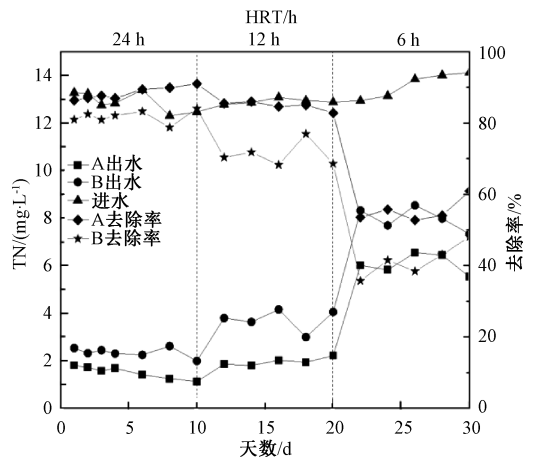


图2 不同 HRT 下系统 TN 变化情况

Figure 2 Change of system TN with different HRT

A、B 两系统 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的去除率变化趋势与 TN 相似,随着 HRT 的下降, TN 去除率也随之降低。当 HRT 为 24 h 时, A 系统 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均去除率为 (89.42 ± 2.38)%, 最高去除率达到了 91.8%; B 系统 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均去除率为 (80.16 ± 1.3)%, 最高去除率达到了 81.46%。当 HRT 为 12 h 时, A 系统平均去除率在 77% 左右, 而 B 系统仅为 49%。在 HRT 下降至 6 h 时, A、B 两系统 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的去除率下降趋势更明显, 两系统最低去除率分别为 45.73%、21.59%。

从数据对比可以看出 A 系统去除率明显优于 B 系统, 硫铁矿基质的用量对水中氮元素的去除具有明显的影响。这因为在硫自养反硝化过程中以硫铁矿 FeS<sub>2</sub> 充当电子供体与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 反应生成 N<sub>2</sub> 实现水体中氮的去除<sup>[17]</sup>。通过实验数据对比发现, 当 HRT 为 24 h 时, A、B 两系统均有较好的脱氮效果, 其中 A 系统出水可达到地表水环境质量标准中地表 IV 类水的标准, 但当 HRT 降低时, 污水与基质接触不充分且不利于微生物的反应, 导致反硝化过程受到抑制从而导致去除率下降<sup>[18]</sup>; 同时, 硫自养反硝化过程中参与反应的多为 TON (总氧化氮)。随着 HRT 的不断下降, A、B 两系统内的反硝化过程无法完

成,从而导致了 TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 的去除率随之逐渐下降。

## 2.2 沿程变化分析

本研究在 HRT 为 24 h 的条件下对湿地系统脱氮效率进行沿程分析,以此来探究硫-铁自养反硝化人工湿地内部氮元素的变化规律。具体数据见图 4~6。两系统中 TN 的沿程变化趋势相似,随着沿程高度呈现了逐步下降的态势,在最终取样口 4 及出水的位置 A、B 两系统的去除率分别达到 89.12%、82.7%。从进水到取样口 4 之间,两系统 TN 含量均有着不同程度的下降,这表明系统中各个阶段均有硫自养反硝化反应的发生。通过沿程变化趋势发现,从进水到取样口 1 的去除效率明显较慢,A、B 两系统去除率仅为 15.91%、14.53%;而在取样

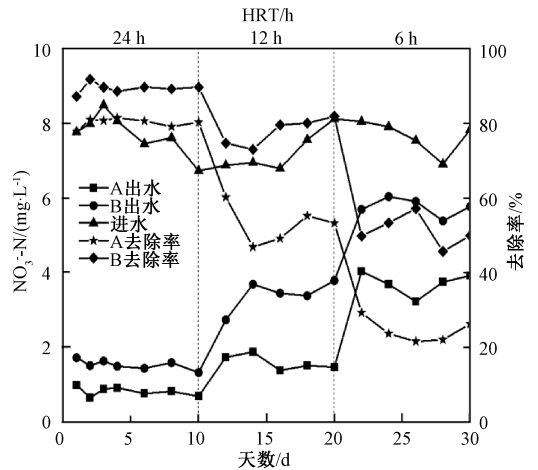


图3 不同 HRT 下系统  $\text{NO}_3^-$ -N 变化情况

Figure 3 Change of system  $\text{NO}_3^-$ -N with different HRT

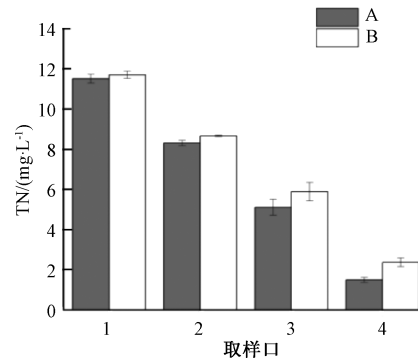


图4 系统 TN 沿程变化情况

Figure 4 Changes of element TN along the system

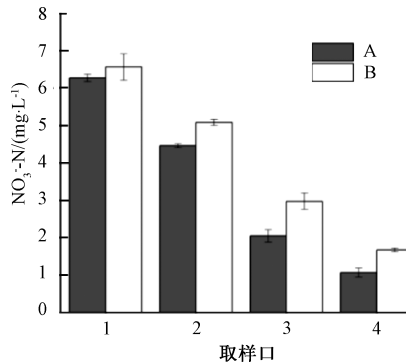


图5 系统  $\text{NO}_3^-$ -N 沿程变化情况

Figure 5 Changes of element  $\text{NO}_3^-$ -N along the system

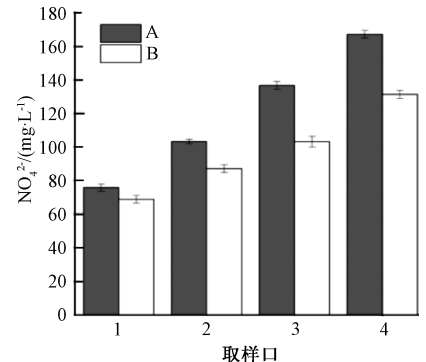


图6 系统  $\text{SO}_4^{2-}$  沿程变化情况

Figure 6 Changes of system  $\text{SO}_4^{2-}$  along the system

口 1~4, A 系统中 TN 含量大幅度下降,由 11.52 mg/L 降至 1.49 mg/L,去除率达到了 87.07%。B 系统与之相似,由 11.71 mg/L 降至 2.37 mg/L,去除率为 79.76%。系统去除效率的变化可能是由于随着氧气的进入,初期部分中硝化与反硝化过程同时存在,产生了电子供体的竞争关系,导致反硝化受到了一定程度的抑制,TN 去除率较低;随着氧气的消耗,反硝化效率不断上升,去除率也随之上升。

从  $\text{NO}_3^-$ -N 的沿程变化趋势可以进一步证明上述分析。A、B 两系统在取样口 1 的去除率仅为 16.88%、13.03%,而在取样口 4 的去除效率达到了 85.88%、75.86%,呈现出与 TN 相似的变化趋势。这很可能是因为在处理前端硝化与反硝化过程的同步进行, $\text{NO}_3^-$ -N 被转化为  $\text{N}_2$  的同时  $\text{NH}_4^+$ -N 被转化为  $\text{NO}_3^-$ -N,从而导致上述现象的发生。与此同时,当水自进水端流经至取样口 1 时,HRT 较低亦有可能导致微生物未能完全发挥作用。

通过对 TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 的沿程数据变化情况分析发

现,A 系统的处理效果始终优于 B 系统,这也验证本实验中主要依靠  $\text{FeS}_2$  为硫自养反硝化过程提供电子供体,基质中硫铁矿的用量对水中氮素的去除有关键的影响。 $\text{SO}_4^{2-}$  的生成是制约硫自养反硝化实际运用的关键因素<sup>[19]</sup>。现阶段在硫自养反硝化过程中发现  $\text{SO}_4^{2-}$  的生成是不可避免的,但通过基质的优化可以减少, $\text{SO}_4^{2-}$  的生成。从图中可以看出,随着取样口位置的不升高  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度也不断上升,与之伴随的是氮元素的不断下降。进水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度为 55.52 mg/L,在取样口 4 两系统出水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度分别为 167.00 mg/L、131.00 mg/L,均低于生活饮用水卫生标准 (GB 5749—2022) 中 250.00 mg/L 的限值。通过相关研究对比发现,硫铁矿比  $\text{S}^0$  等在硫自养反硝化过程中生成  $\text{SO}_4^{2-}$  的量更低<sup>[20]</sup>。随着  $\text{SO}_4^{2-}$  的生成,系统碱度也会随之逐渐下降,而青石的主要成分为  $\text{CaCO}_3$ ,起承托作用的同时一定程度上调节了系统的碱度,通过数据监测发现两系统水 pH 值长期维持在 7.5~8.2,处于正常范围内,保证了系统

脱氮效果的稳定性。

### 2.3 微生物群落分析

以 A 系统为基础构建的硫-铁自养人工湿地在最佳 HRT 条件下运行结束后,分别对不同取样口 5 cm 内的基质混合取样并进行高通量测序。数据如图 7 中所示,主要优势菌门依次是 *Proteobacteria* (38.53%)、*Bacteroidetes* (12.83%)、*Chloroflexi* (8.72%)、*Acidobacteria* (6.35%)、*Planctomycetes* (5.68%)、*Firmicutes* (3.61%)、*Nitrospirae* (2.75%)。其中,*Proteobacteria* (变形门菌)在污水净化处理中扮演着重要角色,多种参与 C、N、S 循环的微生物均属于该菌门<sup>[16]</sup>;*Bacteroidetes* (拟杆菌门)有着较强的有机物降解能力<sup>[21]</sup>。在相关研究中发现 *Chloroflexi* (绿弯菌门)、*Planctomycetes* (浮霉菌门)、*Acidobacteria* (酸杆菌门)、*Firmicutes* (厚壁菌门)、*Nitrospirae* (硝化螺旋菌门)对系统的脱氮效果均有着不同程度的作用,其中存在着某些细菌可以对  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 进行利用,实现系统的脱氮<sup>[22-23]</sup>。

表 1 门水平微生物群落相对丰度表

Table 1 Relative abundance table of microbial communities at phylum level

微生物菌门	所占比例/%
<i>Proteobacteria</i>	38.53
<i>Bacteroidetes</i>	12.83
<i>Chloroflexi</i>	8.72
<i>Acidobacteria</i>	6.35
<i>Planctomycetes</i>	5.68
<i>Firmicutes</i>	3.61
<i>Nitrospirae</i>	2.75
<i>Verrucomicrobia</i>	2.41
<i>Gemmatimonadetes</i>	2.23
<i>Ignavibacteriae</i>	1.35
<i>Parcubacteria</i>	1.12
<i>Unclassified-Bacter</i>	9.17
Other	5.25

从属水平进行分析发现,该模块系统中相对丰度超过 1% 微生物除去 unclassified 共有 8 种,分别为 *Nitrospira* (2.75%)、*Thiobacillus* (2.25%)、*Gemmatimonas* (2.14%)、*Gp4* (1.68%)、*Geobacter* (1.52%)、*Gp3* (1.24%)、*Ignavibacterium* (1.18%)、*Parcubacteria-genera-incertae-sedis* (1.06%)。在系统中发现了硝化螺旋菌门的 *Nitrospira* 及 *Thiobacillus* (硫杆菌属)的存在,说明系统中硝化及反硝化过程同时存在。*Thiobacillus* 是硫自养反硝化过程中最常见的菌属之一,可利用多种价态的 S 将  $\text{NO}_3^-$ -N 转化为  $\text{N}_2$ <sup>[24]</sup>。

### 3 结论

在实验室条件下运行发现硫-铁自养反硝化人工湿地系统可有效解决由氮元素过量引发的农村黑臭水体问题。在进水 TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 分别为 (12.88±0.4)、(7.73±0.76) mg/L 的条件下,其最高去除率均可达到 90% 以上,达到了地表 IV 类水的标准。在系统运行过程中,当 HRT 为 24 h 时脱氮效果最好,TN 去除率可达到 91.3%;且随着 HRT 的逐渐降低,系统脱氮效果也逐渐下降。通过对比 A、B 两系统的处理效果后发现,A 系统明显优于 B 系统,以硫铁矿为硫自养反硝化人工湿地系统提供电子供体所产生的  $\text{SO}_4^{2-}$  在实验中最高为 167.00 mg/L,满足标准要求。系统中 *Proteobacteria* (变形门菌)、*Bacteroidetes* (拟杆菌门)等优势菌门是脱氮的关键;同时存在的 *Nitrospira* 及 *Thiobacillus* 两种菌属验证了沿程过程中,不同取样口间氮元素去除速率之间存在差异的主要原因为同时进行的硝化与反硝化过程。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 农村黑臭水体治理工作指南[Z]. 2019-11-17. Ministry of Environmental Protection, PRC. Guidelines for the treatment of black and odorous water bodies in rural areas [Z]. 2019-11-17.
- [2] ZHOU C, MIAO T, JIANG L, et al. Conditions that promote the formation of black bloom in aquatic microcosms and its effects on sediment bacteria related to iron and sulfur cycling[J]. The science of the total environment, 2021, 751: 141869.
- [3] SHEN Q S, FAN C X, LIU C, et al. The limiting factor to the outbreak of lake black bloom: roles of ferrous iron and sulfide ions[J]. CLEAN-soil, air, water, 2018, 46 (9): 180305.
- [4] FREITAG T E, KLENKE T, KRUMBEIN W E, et al. Effect of anoxia and high sulphide concentrations on heterotrophic microbial communities in reduced surface sediments (Black Spots) in sandy intertidal flats of the German Wadden Sea [J]. FEMS microbiology ecology, 2003, 44(3): 291-301.
- [5] WANG G F, LI X N, FANG Y, et al. Analysis on the formation condition of the algae-induced odorous black water agglomerate [J]. Saudi journal of biological sciences, 2014, 21(6): 597-604.
- [6] 申秋实, 范成新, 王兆德, 等. 湖泛水体沉积物-水界面  $\text{Fe}^{2+}/\Sigma\text{S}^{2-}$  迁移特征及其意义[J]. 湖泊科学, 2016,

- 28(6): 1175-1184.
- SHEN Q S, FAN C X, WANG Z D, et al. Effects of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{S}^{2-}$  transportation at sediment-water interface to the black bloom formation[J]. *Journal of lake sciences*, 2016, 28(6): 1175-1184.
- [7] DUVAL B, LUDLAM S D. The black water chemocline of meromictic lower mystic lake, Massachusetts, U. S. A [J]. *International review of hydrobiology*, 2001, 86(2): 165-181.
- [8] ZHANG X J, CHEN C, DING J Q, et al. The 2007 water crisis in Wuxi, China: analysis of the origin[J]. *Journal of hazardous materials*, 2010, 182(1/2/3): 130-135.
- [9] LIU C, SHEN Q S, ZHOU Q L, et al. Precontrol of algae-induced black blooms through sediment dredging at appropriate depth in a typical eutrophic shallow lake[J]. *Ecological engineering*, 2015, 77: 139-145.
- [10] OLOLADE I A, ZHOU Q, PAN G. Influence of oxic/anoxic condition on sorption behavior of PFOS in sediment [J]. *Chemosphere*, 2016, 150: 798-803.
- [11] DRISCOLL CHARLES T, BISOGNI JAMES J. The use of sulfur and sulfide in packed bed reactors for autotrophic denitrification[J]. *Journal (water pollution control federation)*, 1978, 50(3): 569-577.
- [12] 苏柏懿, 吴莉娜, 王春艳, 等. 硫自养反硝化在工业废水处理中的研究进展[J]. *应用化工*, 2022, 51(4): 1070-1076.
- SU B Y, WU L N, WANG C Y, et al. Review of sulfur autotrophic denitrification in industrial wastewater treatment[J]. *Applied chemical industry*, 2022, 51(4): 1070-1076.
- [13] 李强, 段浩宇, 高镜清, 等. 矿渣硅酸盐水泥除磷性能研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2022, 43(3): 73-80.
- LI Q, DUAN H Y, GAO J Q, et al. Research on phosphorus removal performance of portland blast furnace slag cement[J]. *Journal of Zhengzhou university (engineering science)*, 2022, 43(3): 73-80.
- [14] 李芳芳, 施春红, 周北海, 等. 硫磺和黄铁矿为填料的生物滤池自养反硝化强化处理二沉尾水[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(11): 1693-1700.
- LI F F, SHI C H, ZHOU B H, et al. Enhanced treatment of secondary effluent via autotrophic denitrification biofilter process using sulfur and pyrite as fillings[J]. *Research of environmental sciences*, 2016, 29(11): 1693-1700.
- [15] 刘佃娜, 何圣兵, 周伟丽, 等. 硫自养反硝化强化垂直流人工湿地脱氮性能研究[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(3): 14-18.
- LIU D N, HE S B, ZHOU W L, et al. Nitrogen removal performance of vertical flow constructed wetland enhanced with sulfur autotrophic denitrification[J]. *China water & wastewater*, 2014, 30(3): 14-18.
- [16] 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.
- [17] HU Y S, WU G X, LI R H, et al. Iron sulphides mediated autotrophic denitrification: an emerging bioprocess for nitrate pollution mitigation and sustainable wastewater treatment[J]. *Water research*, 2020, 179: 115914.
- [18] 张飞剑, 彭云清, 章茹. 潮汐流人工湿地处理南方农村黑臭水体实验研究[J]. *水处理技术*, 2022, 48(4): 114-118, 123.
- ZHANG F J, PENG Y Q, ZHANG R. Experimental study on the black and odorous water body in southern rural areas by tidal flow constructed wetland[J]. *Technology of water treatment*, 2022, 48(4): 114-118, 123.
- [19] LIN S, MACKEY H R, HAO T W, et al. Biological sulfur oxidation in wastewater treatment: a review of emerging opportunities[J]. *Water research*, 2018, 143: 399-415.
- [20] 刘绪振, 赵长盛, 刘婷, 等. 硫自养反硝化工艺研究现状及展望[J]. *工业水处理*, 2023, 43(7): 21-31.
- LIU X Z, ZHAO C S, LIU T, et al. Research status and prospect of sulfur autotrophic denitrification process [J]. *Industrial water treatment*; 2023, 43(7): 21-31.
- [21] SILVEIRA N C, OLIVEIRA G H D, DAMIANOVIC M H R Z, et al. Two-stage partial nitrification-Anammox process for nitrogen removal from slaughterhouse wastewater: evaluation of the nitrogen loading rate and microbial community analysis[J]. *Journal of environmental management*, 2021, 296: 113214.
- [22] WANG T, GUO J B, SONG Y Y, et al. Efficient nitrogen removal in separate coupled-system of anammox and sulfur autotrophic denitrification with a nitrification side-branch under substrate fluctuation[J]. *Science of the total environment*, 2019, 696: 133929.
- [23] 马景德. FeS 自养反硝化与厌氧氨氧化耦合总氮去除及微生物特征[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- MA J D. Performance of advanced nitrogen removal and microbial characteristics via FeS-driven autotrophic denitrification coupled with anammox[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [24] ZHOU W L, LI Y, LIU X, et al. Comparison of microbial communities in different sulfur-based autotrophic denitrification reactors[J]. *Applied microbiology and biotechnology*, 2017, 101(1): 447-453.