

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.017

# 硫自养波形潜流人工湿地的脱氮机理及工况优化

何启帆, 王江坤, 刘慧敏, 聂慧, 汤毅, 林犇, 刘之豪, 任拥政  
(华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 将硫自养反硝化工艺与潜流人工湿地相结合,考察了其对低碳氮比污水中氮的去除效果。结果表明,增加曝气装置后硫自养波形潜流人工湿地的脱氮效果可以得到保障,在气水比为 8:1、水力负荷为  $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  时, TN 去除率为  $(70 \pm 5)\%$ , 出水 TN 浓度低于  $8 \text{ mg/L}$ ;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率在 90% 以上, 出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度低于  $3 \text{ mg/L}$ ; COD 去除率为  $(50 \pm 2)\%$ , 出水 COD 浓度低于  $40 \text{ mg/L}$ ; pH 值可维持在 7~9。同时,石灰石填料具有同步除磷的效果。该工艺具有脱氮效率高、效果好、运行费用低的特点。

**关键词:** 硫自养反硝化; 波形潜流人工湿地; 气水比; 水力负荷; 脱氮机理; 工况优化  
**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0104-06

## Nitrogen Removal Mechanism and Operating Condition Optimization of Sulfur Autotrophic and Wavy Subsurface Flow Constructed Wetland Process

HE Qi-fan, WANG Jiang-kun, LIU Hui-min, NIE Hui, TANG Yi, LIN Ben,  
LIU Zhi-hao, REN Yong-zheng

(School of Environmental Science & Engineering, Hua Zhong University of Science and Technology,  
Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The effect of nitrogen removal in wastewater with low C/N ratio was investigated by combining sulfur autotrophic denitrification process with enhanced subsurface flow constructed wetland. It was shown that the nitrogen removal could be guaranteed in wavy subsurface flow constructed wetland with additional aeration device. When the ratio of aeration gas to water was 8:1 and the hydraulic load was  $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , TN removal rate was  $(70 \pm 5)\%$  and effluent TN was lower than  $8 \text{ mg/L}$ ;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  removal rate maintained over 90% and effluent  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  was lower than  $3 \text{ mg/L}$ ; COD removal rate was  $(50 \pm 2)\%$  and effluent COD was lower than  $40 \text{ mg/L}$ ; and pH could maintain within 7~9. At the same time, the limestone filler had the effect of simultaneous phosphorus removal. The process was economical, efficient, and effective in nitrogen removal.

**Key words:** sulfur autotrophic denitrification; wavy subsurface flow constructed wetland; aeration gas to water ratio; hydraulic load; nitrogen removal mechanism; operating condition optimization

目前的脱氮方法主要有物理化学法、生物法和生物化学法三类。其中物理化学法能耗大、不经济,

并可能产生二次污染;生物法因其经济性而应用最广<sup>[1-2]</sup>,目前大多采用异养反硝化技术和工艺,虽然脱氮效果较好,但处理低 C/N 值污水时需要投加大量碳源,污泥产量高,增加了处理成本<sup>[3]</sup>。人工湿地用于污水处理具有一定优势,其对 BOD<sub>5</sub>、SS 去除效率高,同时能耗较低,但对于氮的脱除效率不高<sup>[4]</sup>。为改善脱氮效果,对波形潜流人工湿地进行曝气充氧, TN 去除率可达 30% 左右;曝气充氧加上部分回流后, TN 去除率提高至 50% 左右<sup>[5-6]</sup>。可见,采用传统异养反硝化技术的人工湿地对低 C/N 值污水中氮的去除率很难进一步提高。

于是针对低 C/N 值污水,生物化学法即自养反硝化技术受到重视,硫自养反硝化作为一种代表性的自养反硝化技术,具有无需外加碳源、出水无二次污染、对低 C/N 值污水脱氮效果好等优点。但硫自养反硝化也存在碱度消耗大、产酸等问题。因此笔者将充氧波形潜流人工湿地与硫磺-石灰石自养反硝化系统(SLAD)结合,探究其对实际低碳氮比污水中氮的去除效果、影响因素和作用机理。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 原水水质

系统进水取自华中科技大学校内湖溪河靠近居民区的一段, pH 值为  $7.52 \pm 0.28$ , DO、COD、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP 分别为  $(1.0 \pm 0.5)$ 、84.85~128.77、11.20~17.46、 $(9.00 \pm 0.66)$ 、0.36~1.20、0.34~1.16 mg/L。前期每隔一个星期取出水样,中后期加大取样频率,每 3 d 取样一次。待装置达到暂稳状态(一个星期内去除率变化不超过 10%)后进行沿程实验。

### 1.2 实验装置

以波形潜流人工湿地为主要实验装置,其由 PVC 板材制作而成,主体尺寸  $B \times L \times H = 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 。装置具有独特的流态(下流-上流),分为独立的 A、B 两室, A 室的  $B \times L \times H = 200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ , B 室尺寸为  $B \times L \times H = 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ ,中间用 PVC 板隔开,底部连通,污水由 A 室上方表面布水,自上向下流动,从下方洞口进入 B 室,再向上流动,由 B 室上方表面收集排出,流态为波形潜流(见图 1)。表层预留有 100 mm 的配水区 and 超高保护区。基质表层上方 50 mm 处安装圆形穿孔布水管(DN20, 45°角交错开孔,孔径为 10 mm,孔距为 10 mm),保证装置布水均匀;

距底部 50 mm 处设置曝气管,借助空气泵往湿地内部供氧。整个装置沿 A 室和 B 室的不同高度分别设置取水样口,自填料顶部起每隔 100 mm 设置一个,每边设 8 个取样口。沿程实验以 B 室底端取样点(图 1 中沿程比例 0 位置)为起点,出水端(沿程比例 1.0 位置)取样点为终点。

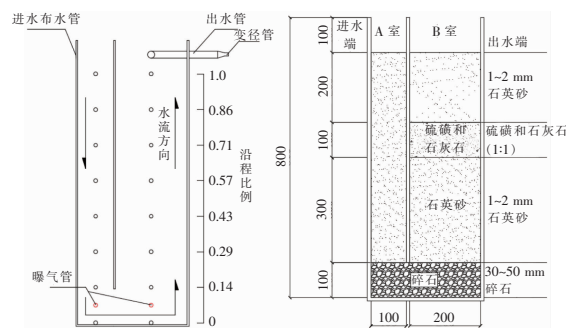


图1 实验装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of experimental device

PVC 板材壁厚为 10 mm, A 室装填粒径为 1~2 mm 的石英砂,装填高度为 600 mm; B 室从上到下依次装填高度为 200 mm 的石英砂、100 mm 的硫磺和石灰石(体积比为 1:1,粒径分别为 2~3、20~50 mm)、300 mm 的石英砂;底部孔洞高为 100 mm,且铺有与孔洞等高的碎石。

根据曝气管根数的不同,设置了 3 组实验装置(如图 2 所示),实验地点选在华中科技大学校内湖溪河靠近居民区一段,其水质接近黑臭,整体流程为:潜污泵抽取湖溪河水至高位水箱,利用虹吸通过配水管向 3 组装置连续进水。其中,1<sup>#</sup>装置为前后两端均曝气,2<sup>#</sup>装置仅前端曝气,而 3<sup>#</sup>装置作为空白对照,未进行曝气。通过 3 组实验装置构成的系统,探究水力负荷、曝气量以及温度对运行效果的影响。

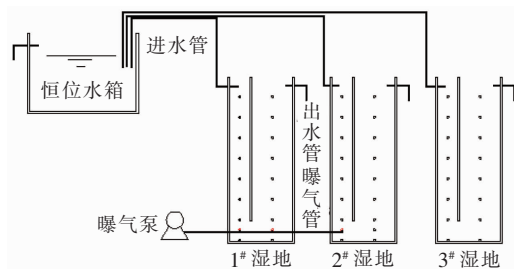


图2 实验装置示意

Fig.2 Schematic diagram of experimental device

### 1.3 测定项目及方法

水质指标的测定参照国家标准方法。其中,溶

解氧和温度:上海雷磁 JPB-607A 分析仪, pH 值: PHS-3E 分析仪, COD: 重铬酸钾微波消解法, TN: 过硫酸钾消解紫外分光光度法,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ : 麝香草酚分光光度法,  $\text{SO}_4^{2-}$ : 铬酸钡分光光度法。

#### 1.4 装置的启动与运行方式

装置于 2017 年 2 月 15 日开始启动, 以水力负荷为  $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  连续进水运行, 其中 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 湿地分别以气水比为 16:1 和 8:1 进行连续曝气, 而 3<sup>#</sup> 湿地则未曝气。运行前期 (35 d) 平均水温在  $11.5^\circ\text{C}$  左右, 随后逐渐升高, 整个驯化过程中最高温度维持在  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 期间原水的溶解氧在 2~4 mg/L 变化。

实验分为两个阶段, 即启动阶段和稳定运行阶段。启动阶段水力负荷为  $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 装置的气水比分别为 16:1 和 8:1, 3<sup>#</sup> 装置未曝气。3 组装置均未种植物, 以避免植物根系对脱氮过程的影响。检测指标包括 DO、pH 值、水温、总氮、氨氮、硝态氮、COD、硫酸根浓度等。稳定运行阶段, 改变条件后对上述指标进行检测。稳定运行阶段又可分为 3 个阶段, 相应的水力负荷分别为  $0.8$ 、 $0.5$ 、 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 每阶段周期为 15~20 d。湿地表面积为  $0.06 \text{ m}^2$ 。3 个装置的曝气量保持前述不变, 不同阶段探究水力负荷的影响, 同一阶段探究曝气量的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 运行效果

原水中营养物质丰富, 菌群种类多, 反应器在无外加碳源、无活性污泥引入条件下连续进水, 实现动态自然挂膜。启动前期平均水温为  $11.5^\circ\text{C}$ , 随后升高为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 后期逐渐上升, 最高达到  $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。启动阶段进水溶解氧为 2~4 mg/L, 后期在 2~6 mg/L 波动。

#### 2.1.1 对 COD 的去除

启动 1 周左右, 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 装置即有明显的 COD 去除效果。运行至第 10 天, 1<sup>#</sup> 装置的 COD 去除率达到 67.3%, 2<sup>#</sup> 装置达到 63.3%。随后有所波动, 并逐渐稳定。其中, 1<sup>#</sup> 装置的 COD 去除率为  $(46 \pm 3)\%$ , 出水 COD 浓度低于 50 mg/L; 2<sup>#</sup> 装置的去除率为  $(50 \pm 2)\%$ , 出水 COD 浓度低于 40 mg/L, 达到一级 A 排放标准 (见图 3)。

2<sup>#</sup> 装置的出水 COD 浓度更为稳定, 这是因为运行初期生物膜较为脆弱, 较大的曝气量会造成水流

紊动和生物膜脱落, 影响装置对悬浮态污染物的吸附。随着时间推移, 温度不断升高, 微生物活性增强, 所以在运行约 55 d 后, 出水 COD 浓度继续降低, 去除率提高, 最高达 80% 以上。

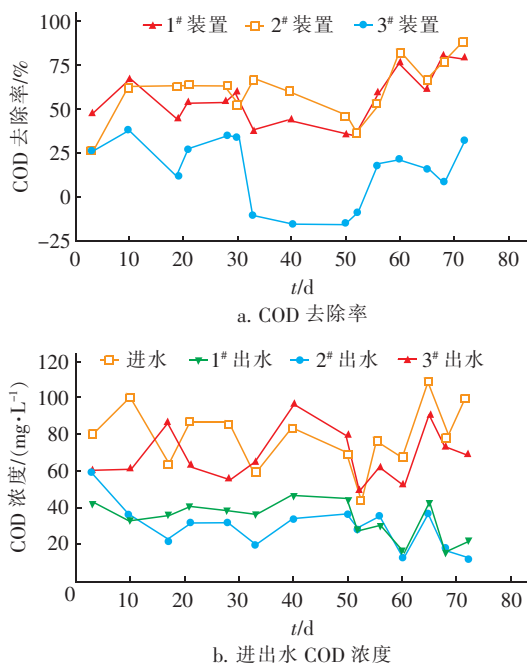


图3 启动阶段各装置对 COD 的去除效果

Fig.3 COD removal by different devices in the startup phase

未曝气的 3<sup>#</sup> 装置则细菌增殖缓慢, 对 COD 的去除率低。运行至第 33 天时甚至出现了负去除率, 可能因为基质堵塞, 累积的污染物重新释放到水中。

#### 2.1.2 对氮的去除

整个实验阶段对装置进出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 进行监测, 分析得到二者去除率随时间的变化情况, 结果如图 4 所示。运行前 10 d, 3 个装置的氨氮去除率均较低, 主要因为尚未形成生物膜, 以及曝气造成水流紊动。随着运行时间增加和持续曝气, 硝化细菌开始起主导作用, 氨氮被氧化, 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 装置的去除率迅速提高至 80% 左右。3<sup>#</sup> 装置由于未曝气, 氨氮去除效率低, 甚至出现了出水浓度高于进水的情况, 这是因为在氨化作用下部分有机氮被转化为了氨氮。第 40~100 天, 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 装置的氨氮去除率稳定在 90% 以上, 出水氨氮浓度均在 3 mg/L 以下, 大部分时间在 2 mg/L 以下, 达到地表 V 类水质标准。而 3<sup>#</sup> 装置的去除率持续低下。100 d 后, 在高水力负荷条件下, 氨氮去除率略有降低且存在波动。

启动阶段 1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 装置的 TN 去除率明显高于 3<sup>#</sup>

装置。第60天左右,可认为启动阶段结束,TN去除率达到稳定,为 $(70 \pm 5)\%$ ,出水TN浓度在8 mg/L以下,远低于污水一级A排放标准。3<sup>#</sup>装置的TN去除率低于20%,这是因为该装置中的溶解氧不足以满足微生物生长需求,抑制了硝化作用,又造成异养反硝化微生物无法生长。

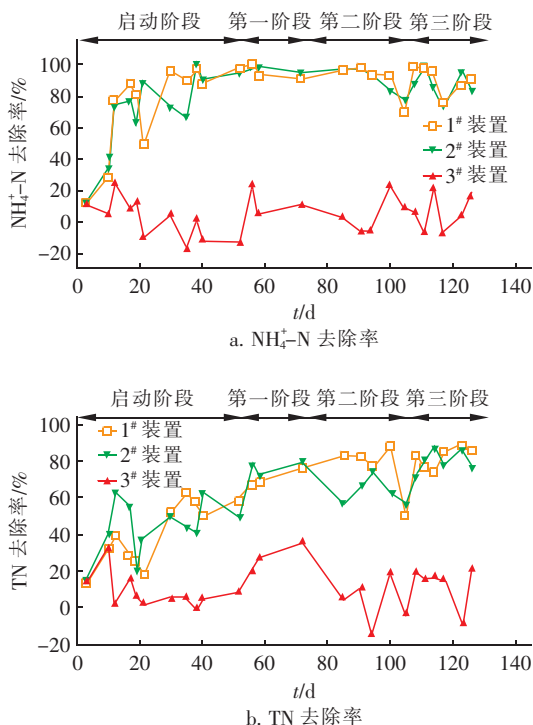


图4 各装置对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除效果

Fig. 4 Removal rates of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN

## 2.2 水力负荷对脱氮的影响

以2<sup>#</sup>装置为研究对象,固定气水比为8:1,考察不同水力负荷下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的沿程去除情况,结果见图5。在水力负荷为 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为0.83 mg/L,去除率达到91.29%,具有较好的去除效果;水力负荷降至 $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降至0.51 mg/L,去除率增至94.32%;水力负荷增至 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度增至1.90 mg/L,去除率降至80.37%。由此可见,在低水力负荷下去除效果较好。去除率随着水力负荷的增加而降低,原因与进入湿地的负荷总量有关,因此,建议湿地的水力负荷不宜超过 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,以免造成负荷的积累及出水水质的恶化。

在水力负荷为 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水TN浓度为4.25 mg/L,去除率为62.06%;水力负荷降至

$0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水TN浓度降至2.38 mg/L,去除率增至74.64%;水力负荷增至 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水TN浓度增至6.16 mg/L,去除率降至45.92%。各水力负荷下去除率沿程呈小幅增加的趋势,当经过硫磺段时,去除效果有一个明显的飞跃,这与硫自养反硝化有关。TN去除率随着水力负荷的增加而降低,这与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除规律相似,水力负荷增大后硝化过程会变弱,另外由于水力负荷的提高导致硝化液与硫磺段的接触时间减少,从而导致脱氮效果降低。综合考虑,较低的水力负荷有利于脱氮,宜控制其不超过 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

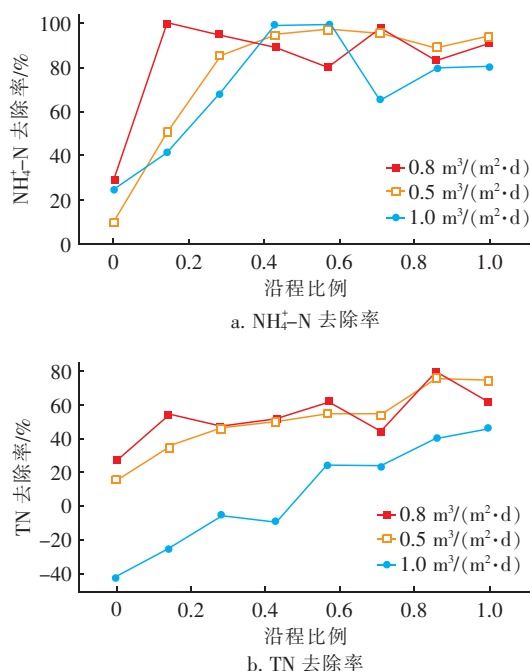


图5 2<sup>#</sup>装置沿程 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除

Fig. 5 Removal rates of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN along height of device 2<sup>#</sup>

## 2.3 曝气量对脱氮的影响

图6给出了水力负荷为 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时不同装置对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除情况。可以看出,1<sup>#</sup>与2<sup>#</sup>装置的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率均达到了80%以上,比3<sup>#</sup>装置的去除率提高了约60%。1<sup>#</sup>与2<sup>#</sup>装置对氨氮的去除效果无明显差异,据此可以认为在 $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 水力负荷下,曝气能有效提高 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率,但气水比对去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的影响不大。1<sup>#</sup>与2<sup>#</sup>装置对TN的去除率均达到70%左右且比较接近,均较3<sup>#</sup>装置要高。据此认为,曝气有利于硝化过程及脱氮,但在一定水力负荷下,曝气量的大小



对脱氮效果影响不大,综合考虑能耗和去除效果,认为最佳气水比为 8:1。

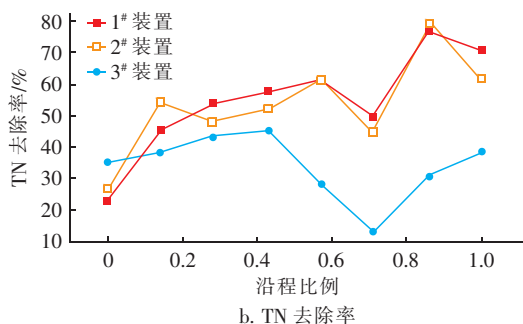
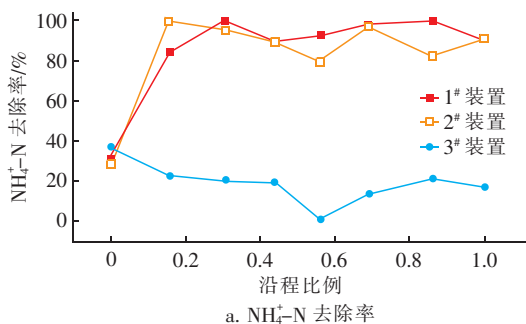


图6 各装置沿程  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TN 的去除

Fig. 6 Removal rates of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and TN along height of different devices

## 2.4 机理探究

### 2.4.1 脱氮机理

在启动阶段运行稳定后对 2# 装置进行取样,分析  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 TN 的沿程变化规律,探讨装置内氮的转化和脱除机理,结果见图 7。在起端 0~0.2 阶段,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度迅速下降, TN 也有所减少,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度相应明显上升,在接近沿程 0.2 处,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  降低到接近于零,而  $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 TN 仍保持较高的水平,这是由于此段紧邻曝气段,水中的溶解氧浓度较高,有利于硝化反应的进行,而且对于低 C/N 值污水,由于有机负荷不高,硝化过程可以在很短的时间内完成,而反硝化反应则受到抑制。需要指出的是,在起端溶解氧较高的情况下, TN 也有所下降,这是因为充氧人工湿地在自然驯化的过程中筛选出了一些能够在高溶解氧条件下进行反硝化的脱氮硫杆菌,这与相关文献的报道一致<sup>[7]</sup>。

随后,在沿程 0.2~0.6 段  $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 TN 浓度下降明显,因为随着取样点远离曝气段,水中溶解氧浓度逐渐下降,附着在填料表面的微生物处于缺氧环境,硝酸盐在异养反硝化的作用下被转化为氮气,总氮去除率逐渐提高。

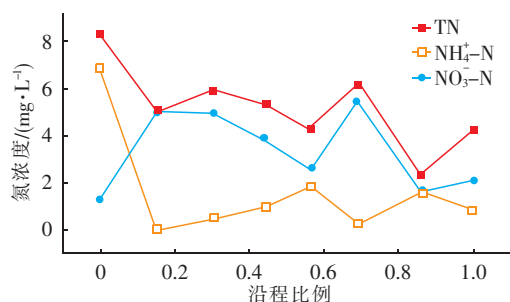
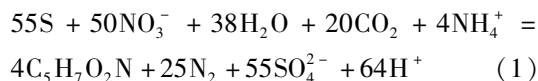


图7 2#装置内氮浓度的沿程变化

Fig. 7 Concentrations of nitrogen-containing substances along height of device 2#

沿程 0.6~0.8 段为硫磺-石灰石段,此时  $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 TN 有一个显著下降的过程,而在此段可生化的有机物基本分解完全,异养反硝化不足以支撑如此明显的下降过程,说明发生了硫自养反硝化。在硫自养反硝化过程中,硫磺作为电子供体,硝酸盐为电子受体,其反应方程式如下:



在硫磺-石灰石段前后,均出现  $\text{NO}_3^--\text{N}$  和 TN 异常回升现象,其可能原因是部分硫自养反硝化菌转移到此处,因缺少硫源死亡后,菌体裂解导致有机氮和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量增加<sup>[8]</sup>。

### 2.4.2 pH 值的变化

图 8 为 1# 装置沿程 pH 值变化。在硫磺段 pH 值下降,表明该段反应中产生了大量的  $\text{H}^+$ ,通过反应方程式计算,每反硝化 1  $\text{mg/L}$  的硝态氮要消耗 4.57  $\text{mg/L}$  碱度(以  $\text{CaCO}_3$  计),但由于有石灰石补充碱度, pH 值仍维持在合理范围内(7~9)。同时,石灰石溶解出的  $\text{Ca}^{2+}$  可与水中的磷酸盐形成沉淀,达到同步除磷的效果。实验表明,在 25~30  $^{\circ}\text{C}$  时,硫自养装置对 TP 的去除率为 18.7%~44.0%,而非硫自养装置的 TP 平均去除率仅为 5.8%。

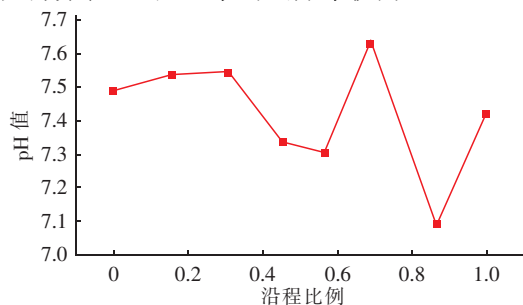


图8 1#装置沿程 pH 值变化

Fig. 8 Variation of pH along height of device 1#

### 2.4.3 硫酸根的变化

在不同工况下,各装置经硫磺段后  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度均有所升高,说明单质硫及其低价化合物被氧化,造成了出水  $\text{SO}_4^{2-}$  累积(见表1)。但在水力负荷为  $0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、气水比为 8:1 的最佳工况下,出水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度仅为  $115.84 \text{ mg/L}$ ,远低于地表水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度要求。

表1 装置进出水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度变化

Tab.1 Influent and effluent  $\text{SO}_4^{2-}$  concentrations

项 目		$\text{SO}_4^{2-}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$			
		进水	1 <sup>#</sup> 出水	2 <sup>#</sup> 出水	3 <sup>#</sup> 出水
水力负荷/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	0.5	43.98	277.55	168.90	44.58
	0.8	23.14	162.17	115.84	28.00

### 3 结论

① 硫自养波形潜流人工湿地工艺的脱氮效果较好,其脱氮机理为氨化、硝化、异养反硝化和硫自养反硝化。

② 硫自养反硝化脱氮的最佳运行工况为水力负荷  $= 0.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、气水比  $= 8:1$ 。

③ 石灰石填料有利于中和硫自养反硝化产生的酸度,维持出水 pH 值稳定,同时还具有一定的同步除磷效果。

### 参考文献:

- [1] 高建文,何圣兵,陈雪初,等. 生物滤池/生态砾石床处理含氮微污染地表水[J]. 中国给水排水,2012,28(1):26-30.  
GAO Jianwen, HE Shengbing, CHEN Xuechu, *et al.* Nitrogen removal from micro-polluted surface water by combined process of biofilter and ecological gravel bed [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(1): 26-30 (in Chinese).
- [2] VYMAZAL J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater [J]. Ecological Engineering, 2008, 35(1): 1-17.
- [3] 苏晓磊. 硫—硫铁填充床用于城市污水深度脱氮除磷的研究[D]. 北京:清华大学,2015.  
SU Xiaolei. Study on Sulfur/Sulfur - Iron Coupling Carrier for Advanced Removal of Nitrogen and Phosphorous from Municipal Wastewater [D]. Beijing:

Tsinghua University, 2015 (in Chinese).

- [4] BEZEAUUAH A N, ZHANG T C. Performance of a constructed wetland with a sulfur/limestone denitrification section for wastewater nitrogen removal [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(8): 1690-1697.
- [5] 任拥政,章北平,海本增. 局部充氧提高波形潜流人工湿地除污效能的研究[J]. 中国给水排水,2007,23(11):28-31,46.  
REN Yongzheng, ZHANG Beiping, HAI Benzeng. Study on improvement of pollutants removal efficiency by partial Aeration in wavy subsurface-flow constructed wetland [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(11): 28-31, 46 (in Chinese).
- [6] 任拥政,章北平,海本增. 利用充氧和回流强化波形潜流人工湿地的脱氮效果[J]. 环境科学,2007,28(12):2700-2704.  
REN Yongzheng, ZHANG Beiping, HAI Benzeng. Removal nitrogen in wavy subsurface-flow constructed wetland utilizing aeration and recirculation [J]. Environmental Science, 2007, 28(12): 2700-2704 (in Chinese).
- [7] 杜锋伟. 曝气生物滤池和硫自养反硝化滤池污水深度脱氮研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.  
DU Fengwei. The Biological Aerated Filter and Sulfur Autotrophic Denitrification Filter Advanced Treatment of Nitrogen in Wastewater [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).
- [8] 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 Dianna, HE Shengbing, ZHOU Weili, *et al.* Test of treatment of low concentration domestic sewage by baffled bio-film process [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(3): 14-18 (in Chinese).

作者简介:何启帆(1997-),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,研究方向为污水处理技术。

E-mail: qifanhe97@163.com

收稿日期:2020-01-05

修回日期:2020-03-10

(编辑:李德强)