

## 超声波辐照污泥比例对短程硝化的影响

章 璋<sup>1,2</sup>, 朱易春<sup>1,2</sup>, 王佳琪<sup>2</sup>, 连军锋<sup>2</sup>

(1. 江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学 赣江流域水质安全保障工程技术研究中心, 江西 赣州 341000)

**摘 要:** 对短程硝化污泥施以不同辐照比例(0、40%、60%、100%)的超声波处理,通过调节曝气量研究辐照污泥比例对短程硝化的影响。在1.6 L/min曝气量的冲击下,即使加入超声波辐照也不能阻止短程硝化被破坏。将曝气量降至0.8 L/min后超声波辐照组均能在5 d内快速恢复短程硝化。之后提高曝气量至1.2 L/min进行冲击,仅辐照污泥比例为60%和100%时能维持短程硝化。在这2个阶段,辐照比例为100%的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率在各组反应器中保持最高,分别维持在 $(81.4 \pm 2.0)\%$ 和 $(72.4 \pm 3.3)\%$ 。随着辐照比例的增加,亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)活性降低而氨氧化菌(AOB)活性变化不明显,同时扫描电镜观察发现,污泥中螺旋菌比例减少,而球菌和短杆菌比例增加。

**关键词:** 超声波; 短程硝化; 辐照污泥比例;  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率; NO<sub>B</sub>活性

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0028-08

## Effect of Ultrasound Irradiated Sludge Ratio on Partial Nitrification

ZHANG Zhang<sup>1,2</sup>, ZHU Yi-chun<sup>1,2</sup>, WANG Jia-qi<sup>2</sup>, LIAN Jun-feng<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Environmental Geotechnology and Engineering Disaster Control, Ganzhou 341000, China; 2. Research Center for Water Quality Security Technology at Ganjiang River Basin, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** The partial nitrification sludge was irradiated by ultrasound, and the effect of irradiated sludge ratio (0, 40%, 60% and 100%) on partial nitrification was studied by adjusting the aeration amount. The results showed that under the impact of aeration amount of 1.6 L/min, even if ultrasonic irradiation was added, the destruction of partial nitrification could not be prevented. After the aeration amount was reduced to 0.8 L/min, the ultrasonic irradiation group could quickly recover partial nitrification within 5 days. After increasing the aeration amount to 1.2 L/min for impact, partial nitrification could be maintained only when the irradiated sludge ratio was 60% and 100%. In these two stages, the  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  accumulation rate with 100% irradiation ratio was the highest in each reactor, which was  $(81.4 \pm 2.0)\%$  and  $(72.4 \pm 3.3)\%$ , respectively. With the increase of the irradiation ratio, the activity of nitrite oxidizing bacteria (NO<sub>B</sub>) decreased and that of ammonia oxidizing bacteria (AOB) did not change significantly, and scanning electron microscopy showed that the *Spirulina* decreased, while the ratio of coccus and bacillus increased.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51868025); 江西省自然科学基金资助项目(20181BAB206038); 江西省研究生创新专项资金资助项目(YC2017-S309)

通信作者: 朱易春 E-mail: zyc@mail.jxust.cn

**Key words:** ultrasound; partial nitrification; irradiated sludge ratio;  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  accumulation rate; NOB activity

短程硝化是新型生物脱氮工艺的必要步骤<sup>[1]</sup>,其通过抑制  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  氧化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的过程,使污水处理中氮的氧化保持在亚硝化阶段。与传统工艺相比,短程硝化能够节约 25% 耗氧量、减少 40% 碳源消耗,有着广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

目前研究较多的短程硝化控制方法均存在缺陷。如采用温度控制时,需要长期保持高温(31 ~ 33 ℃)或低温(11 ~ 15 ℃)状态<sup>[3]</sup>,恢复常温将导致短程硝化被破坏<sup>[4]</sup>;采用溶解氧(DO)控制时,需要使 DO 保持在 0.5 ~ 1.0 mg/L 以抑制亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)活性,当 DO 浓度过高时会使 NO<sub>B</sub> 的活性恢复,导致短程硝化被破坏<sup>[5]</sup>,而长期保持低 DO 状态则易发生污泥膨胀<sup>[6]</sup>;采用游离氨(FA)抑制时,NO<sub>B</sub> 会对 FA 的抑制产生适应性<sup>[7]</sup>;采用 A/O 交替控制时,在短时间内不能将 NO<sub>B</sub> 从系统中筛出<sup>[8]</sup>,运行环境变化后短程硝化将被破坏。超声波辐照是一种新型的实现短程硝化的方法<sup>[9]</sup>,适宜强度的超声波能够通过抑制 NO<sub>B</sub> 活性并增强氨氧化菌(AOB)活性实现短程硝化<sup>[10]</sup>。目前超声波作用于短程硝化的研究较少,其中超声波辐照污泥比例是超声波应用于污水处理中的一个重要参数,辐照比例过低则表现不出效果,过高则耗费大量能源,甚至导致处理效果降低<sup>[11]</sup>。为此,通过在 SBR 反应器中进行不同的超声波辐照污泥比例试验,研究超声波辐照污泥比例对短程硝化的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

接种污泥取自某污水处理厂 UNITANK 反应池,MLSS 为 1 860 ~ 2 120 mg/L,MLVSS 为 1 260 ~ 1 550 mg/L,SV<sub>30</sub> 为 20% ~ 28%,SVI 在 108 ~ 145 mL/g 之间。

### 1.2 短程硝化污泥的驯化

在自制的 10 L SBR 反应器中通过 A/O 交替运行来培养驯化短程硝化污泥,使用人工配水,进水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 分别为 300、60、6 mg/L,通过  $\text{NaHCO}_3$  调节反应器 pH 值为 7.5 ~ 8.5,通过空调维持水温在 25.5 ~ 26.5 ℃。运行方式如图 1 所示,每天运行 3 个周期,曝气阶段的曝气量为 8 L/min,反应器换水率为 50%,除了每天测量消耗的污泥和排

水阶段带出的污泥外未进行排泥。

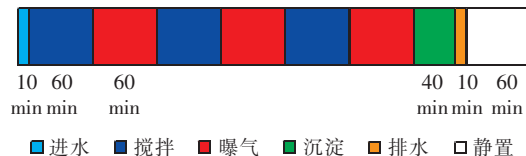


图1 反应器运行方式

Fig. 1 Operation model of SBR

### 1.3 超声试验装置

试验装置为 JY88 - IIN 型探头式超声发生器,频率为 20 kHz,最大功率为 250 W,探头直径为 6 mm。试验中将超声波探头伸入盛有污泥的烧杯中进行辐照,探头位于烧杯中央,伸入液面下约 1 cm。

### 1.4 试验方法

量取短程硝化污泥于 4 组 1 L 的 SBR 反应器,进水水质和运行方式与污泥驯化阶段相同。在静置阶段进行超声处理,其中,1 组不进行辐照处理作为对照,另外 3 组则进行辐照处理,辐照污泥比例分别为 40%、60% 与 100%,超声间隔周期为 24 h。声能密度和辐照时间选择课题组前期研究中确定的最优参数<sup>[12]</sup>,分别为 0.05 W/mL 和 20 min。

### 1.5 测定方法

DO、pH 值采用 903 pH/DO 分析仪检测;MLSS、MLVSS 采用重量法测定;COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  分别采用快速密闭消解法、纳氏试剂分光光度法、紫外分光光度法、N - (1 - 萘基) - 乙二胺光度法分析;AOB 和 NOB 的比耗氧速率( $\text{SOUR}_{\text{AOB}}$  和  $\text{SOUR}_{\text{NOB}}$ )采用文献[13]中方法测量;污泥形态采用 XSP - 13CC 生物显微镜和扫描电镜观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 驯化阶段污泥状况

A/O 交替运行是实现短程硝化的有效方法<sup>[14-15]</sup>。当反应环境从缺氧变为好氧状态时,NO<sub>B</sub> 比 AOB 需要更长的时间恢复活性<sup>[16]</sup>,随着反应器的不断运行,AOB 的活性不断增强而 NO<sub>B</sub> 活性逐渐下降,最终实现对 NO<sub>B</sub> 的抑制,从而将氨氮的氧化控制在亚硝化阶段<sup>[17]</sup>。将污水厂污泥接种到反应器中并采用 A/O 交替运行进行驯化,驯化后的污泥 MLSS 为 3 400 mg/L 左右,SVI 为 125 mL/g 左

右。反应器的处理效果如图2所示。

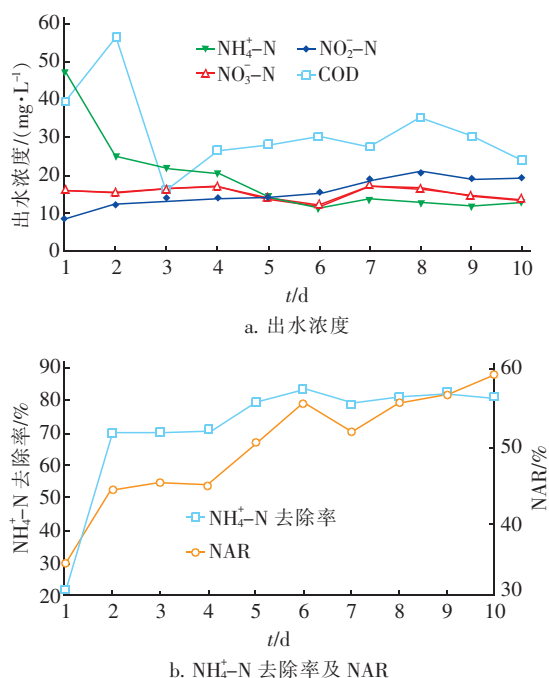


图2 A/O交替驯化过程中出水水质

Fig. 2 Pollutants removal and NAR during alternate A/O operation

图2显示出水COD在2d后即维持在50 mg/L以下,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。经过5d的驯化后,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N由47.2 mg/L降至12.9 mg/L,去除率在第2天就提高到70.0%,之后稳步提高,在5d后稳定在(80.7 ± 1.7)%。亚硝酸盐积累率(NAR)能够反映短程硝化的程度<sup>[18-19]</sup>,当NAR大于50%时表示反应器实现了短程硝化<sup>[20-21]</sup>。通过A/O交替运行驯化污泥,NAR在5d内由34.8%提高到50.4%,并在之后保持在50%以上,实现了短程硝化的运行。

## 2.2 不同辐照污泥比例对出水水质的影响

将驯化成功的污泥分别接种到4组1L的SBR反应器,按照辐照比例分别为0、40%、60%、100%进行处理,检测各反应器出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度和NAR。

NOB有着比AOB更高的氧半饱和常数,高DO有利于NOB活性的恢复<sup>[22-23]</sup>,不利于短程硝化的运行,而Zheng等<sup>[9]</sup>在DO > 4 mg/L的情况下通过超声波辐照使短程硝化成功运行。故在1~7d控制曝气量为1.6 L/min(驯化阶段单位体积曝气量

的2倍)对短程硝化进行冲击,考察超声波辐照污泥比例对短程硝化的影响。4组反应器的出水氨氮浓度在1~3d均整体降低,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率均由80%左右提高至90%以上,并在4~7d基本保持稳定(见图3)。虽然4组反应器的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率在将曝气量提高到1.6 L/min后均有所提高,但出水NAR在第1天便低于50%,并呈现持续下降趋势。通过对反应器中DO的监测发现,4组反应器运行周期内最大DO均超过6 mg/L,说明超声波辐照在过高曝气量的环境下不能阻止短程硝化的破坏。

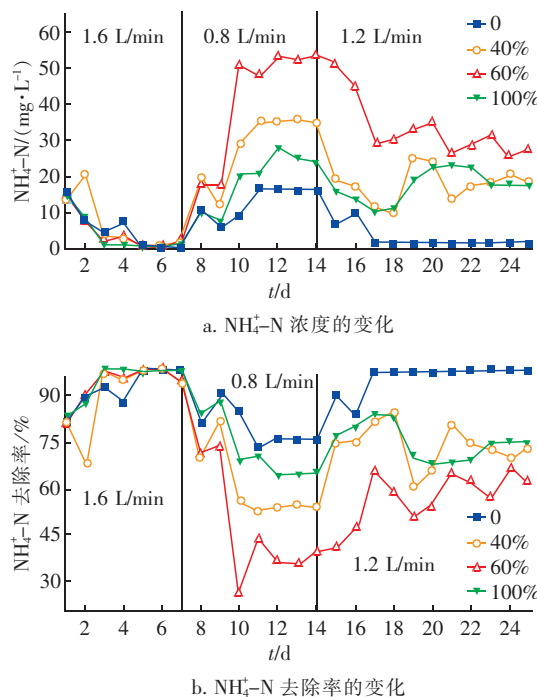


图3 不同辐照比例下对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除效果

Fig. 3 Ammonia nitrogen removal under different irradiation ratios

在反应器运行的第8~14天,将曝气量由1.6 L/min恢复至污泥驯化时的0.8 L/min(4组反应器最大DO不超过5 mg/L),测试超声波辐照对短程硝化恢复的影响。试验组的NAR逐渐开始提高,且均在第12天后稳定在50%以上,恢复了短程硝化,其中辐照污泥比例为100%的NAR最高,维持在(81.4 ± 2.0)%;而对照组的NAR在降低曝气量后也有所提高并维持在(21.3 ± 2.5)%,但未能恢复短程硝化(见图4)。由于A/O交替运行需要经过长期运行才能实现对菌群的筛选<sup>[24]</sup>,在经过高曝气量的冲击后NOB活性得到恢复,A/O交替运行不能快速将NOB活性完全抑制,导致对照组不能将短程

硝化恢复至驯化阶段的效果。

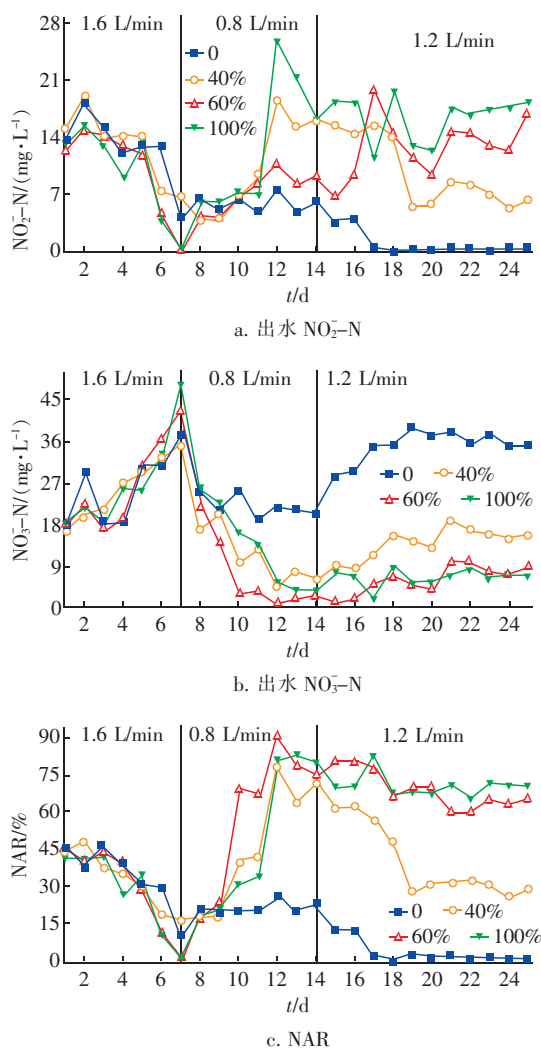


图4 不同辐照比例下反应器出水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NAR 的变化

Fig. 4 Effluent NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NAR under different irradiation ratios

虽然超声波辐照污泥能够快速恢复短程硝化,但是辐照污泥比例为40%、60%、100%的反应器对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除率分别维持在(54.3±0.1)%、(37.4±2.2)%、(64.5±0.8)%,均低于对照组的(76.0±0.1)%,这可能是由于NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的积累使AOB对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的氧化速率因产物浓度过高而减慢。除了NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N积累的影响之外,超声波对细胞的损伤作用也是导致试验组的氨氮去除效果较差的原因<sup>[25]</sup>,在辐照比例为60%时超声波对AOB的损伤较40%时更严重,这导致了其氨氮去除效果最差。而使超声波辐照产生作用需要达到一定的能量

阈值<sup>[12]</sup>,辐照比例为100%时有着充足的能量输入,使氨氮去除效果在超声组中最好。

在第15~25天,将曝气量由0.8 L/min提高至1.2 L/min(4组反应器最大DO不超过6 mg/L),进一步考察超声波辐照对短程硝化的影响。4组反应器的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率均有所提高,这与通过提高曝气量来提高NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N氧化效果的研究一致<sup>[26-27]</sup>。其中,辐照比例为60%的反应器对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除率在4组中依旧最低,仅为(62.5±3.8)%;辐照比例为100%的反应器对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除率在试验组中最高,为(72.4±3.3)%。虽然在提高曝气量后各组的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率均有所提高,但是各反应器的短程硝化效果均有所下降甚至被破坏,其中对照组的NAR于第17天后降至零左右,基本保持全程硝化;辐照比例为40%的反应器在提高曝气量后NAR在15~19 d逐渐下降,短程硝化被破坏,于第19天后维持在(29.8±2.3)%;而辐照比例为60%和100%的反应器在提高曝气量后NAR有所下降,但依旧能维持短程硝化,分别于19 d后稳定在(64.5±4.0)%和(69.3±2.3)%。上述结果表明,在适当的曝气条件下(DO不超过6 mg/L)通过超声波辐照能够提高NAR,其提高程度与辐照污泥比例成正比,但是在超声波强化短程硝化的同时会影响对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除效果,其中辐照比例为100%的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除效果在试验组最好,而曝气量过高时(DO超过6 mg/L)通过超声波辐照也依旧会使短程硝化被破坏。

### 2.3 辐照污泥比例对污泥活性的影响

为进一步分析辐照污泥比例对短程硝化的影响,对污泥中AOB和NOB的SOUR进行测定,以分析污泥的活性,结果如图5所示。其中,SOUR<sub>NOB</sub>随着辐照污泥比例的增加而下降,当辐照污泥比例为100%时SOUR<sub>NOB</sub>仅为对照组的21.8%,这表明超声波辐照对污泥中的NOB具有抑制作用,且抑制强度随着辐照污泥比例的增加而增加;而超声波辐照对AOB活性的强化效果并不明显,辐照污泥比例为40%和60%的SOUR<sub>AOB</sub>均低于对照组,辐照污泥比例为100%的SOUR<sub>AOB</sub>仅比对照组高8.7%。烧杯试验与反应器的运行存在一定差异性<sup>[28]</sup>,在反应器运行过程中造成的NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N积累对AOB产生游离亚硝酸抑制<sup>[29]</sup>,使得反应器中的活性更低,导致试验组的氨氮去除率低于对照组。



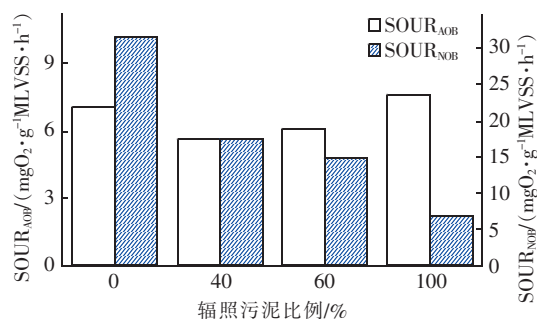


图5 不同辐照比例下 AOB 和 NOB 的比耗氧速率

Fig. 5 SOUR of AOB and NOB under different irradiation ratios

超声波对短程硝化的影响主要表现为对 NOB 活性的抑制, Zheng 等<sup>[9]</sup> 在使用超声波辐照短程硝化污泥时, 也发现超声波对 NOB 的抑制强于对 AOB 的强化, 其中 NOB 的比亚硝酸盐氧化速率较对照组降低 85%, AOB 的比氨氧化率较对照组仅提高 24.5%。超声波应用于短程硝化的最优辐照污泥比例与超声波强化污泥活性存在差异性, 超声波强化污泥活性的最优辐照污泥比例通常会较低, 王佳琪等<sup>[28]</sup> 在处理低 C/N 值污水时发现辐照污泥比例为 15% 时效果最好, 闫怡新等<sup>[11]</sup> 在辐照污泥比例为 10% 时反应器 OUR 达到最大。但是使用超声波强化短程硝化与普通的强化污泥活性不同, 在此过程中超声波的主要作用是对菌群进行筛选<sup>[29]</sup>, 而不是对整体菌群的强化, 辐照比例不达到 100% 就不能最大抑制 NOB 活性, 同时会降低 AOB 活性, 影响对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 的去除效果。

#### 2.4 辐照污泥比例对污泥结构的影响

图 6 显示了第 25 天时 4 组反应器中污泥的光学显微镜观察结果, 发现对照组污泥的菌胶团主要包裹在丝状菌上, 以丝状菌为骨架生长; 辐照比例为 40% 的污泥中依旧可以在菌胶团边界发现部分丝状菌, 但是数量明显减少, 且菌胶团结合紧密程度明显较对照组降低; 辐照比例为 60% 的污泥中菌胶团紧密程度较 40% 时增加, 表明细胞合成代谢能力增强, 这种合成能力增强可能是由于超声波辐照对污泥损伤导致的<sup>[25]</sup>; 而辐照比例为 100% 的污泥菌胶团较松散, 表明细胞的合成代谢能力减弱, 这种减弱可能是由于 NOB 活性减弱导致的, 这与之前检测中 NOB 活性在 100% 时降低最大相一致。赵青等<sup>[30]</sup> 发现短程硝化污泥胞外聚合物的分泌低于全程硝化也印证了这一点。

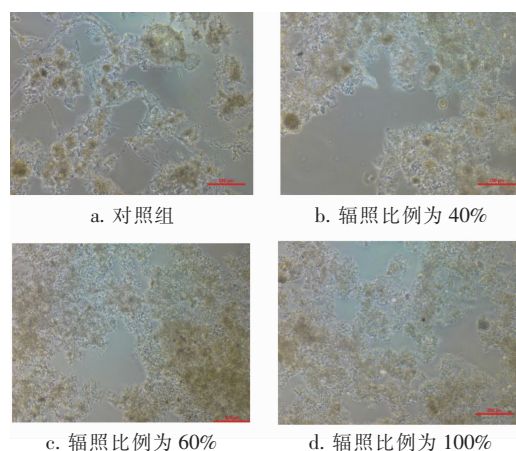


图6 不同辐照比例下显微镜观察的污泥形态

Fig. 6 Microscopic photos of sludge morphology under different irradiation ratios

为进一步分析辐照污泥比例对污泥结构的影响, 分别对 4 组反应器污泥进行扫描电镜分析, 结果见图 7。对照组污泥形成的菌胶团有丝状菌伸出, 且附着了大量螺旋菌和少量杆菌; 辐照比例为 40% 的污泥中球菌和短杆菌比例增多, 污泥结构由丝状菌为骨架的网状结构向团状转变; 辐照比例为 60% 的污泥中短杆菌含量显著提高, 螺旋菌数量显著降低, 污泥聚集成团并被 EPS 紧密包裹; 辐照比例为 100% 的污泥中基本为球菌和短杆菌, 菌群被 EPS 所包裹, 但菌胶团聚集程度较 60% 时有所降低, 存在大量空隙, 螺旋菌基本消失, 这与 Zheng 等<sup>[10]</sup> 通过超声波辐照将螺旋状的硝化杆菌属 *Nitrospira* 全部淘汰所表现出的结果一致。

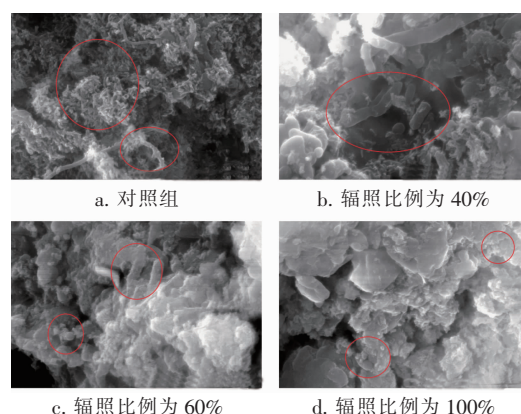


图7 不同辐照比例下污泥的扫描电镜照片

Fig. 7 SEM photos of sludge under different irradiation ratios

AOB 主要为短杆状的亚硝化单胞菌属 *Nitrosomonas* 和球状的亚硝化菌属 *Nitrosococcus*, 而

NOB 主要为杆状的 *Nitrobacter* 与螺旋状的 *Nitrospira*<sup>[31]</sup>。随着辐照污泥比例的增加,污泥菌群由杆菌和螺旋菌向着球菌和短杆菌转变程度增强,这意味着 AOB 的占比增多,NOB 占比减少。

### 3 结论

① 曝气量过高会破坏 A/O 交替运行实现的短程硝化,即使通过超声波辐照也不能恢复,为使超声波辐照产生效果应保证反应器中最大 DO 不超过 6 mg/L。

② 使用超声波辐照短程硝化污泥时,为保证较高的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率和 NAR,辐照污泥比例选择 100% 为佳。

③ 超声波对短程硝化的影响主要表现为对 NOB 的抑制,其抑制程度与辐照污泥比例成正比。

### 参考文献:

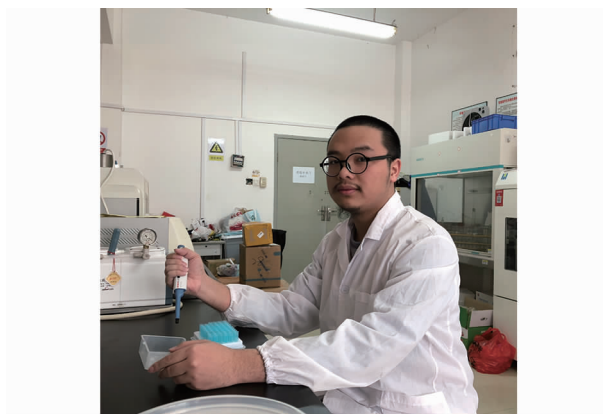
- [1] 苏子杰,左椒兰,康健雄. 短程生物脱氮技术研究进展[J]. 水处理技术,2011,37(10):15-20.  
Su Zijie, Zuo Jialan, Kang Jianxiong. The research and development of the shortcut biological nitrogen removal technology[J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(10):15-20(in Chinese).
- [2] 袁林江,彭党聪,王志盈. 短程硝化一反硝化生物脱氮[J]. 中国给水排水,2000,16(2):29-31.  
Yuan Linjiang, Peng Dangcong, Wang Zhiying. Shortcut nitrification - denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(2):29-31(in Chinese).
- [3] 张功良,李冬,张肖静,等. 低温低氨氮 SBR 短程硝化稳定性试验研究[J]. 中国环境科学,2014,34(3):610-616.  
Zhang Gongliang, Li Dong, Zhang Xiaojing, et al. Stability for shortcut nitrification in SBR under low ammonia at low temperature[J]. China Environmental Science, 2014, 34(3):610-616(in Chinese).
- [4] 罗远玲,杨朝晖,徐峥勇,等. 亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究[J]. 环境科学,2012,33(2):511-517.  
Luo Yuanling, Yang Zhaohui, Xu Zhengyong, et al. Effect of temperature on the response characteristics of shortcut nitrification granular sludge[J]. Environmental Science, 2012, 33(2):511-517(in Chinese).
- [5] Ma Y, Peng Y, Wang S, et al. Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant[J]. Water Res, 2009, 43(3):563-572.
- [6] Zhou X, Liu X, Huang S, et al. Total inorganic nitrogen removal during the partial/complete nitrification for treating domestic wastewater: Removal pathways and main influencing factors[J]. Bioresour Technol, 2018, 256(11):285-294.
- [7] 于德爽,殷金兰,王晓霞,等. 控制 DO 及 FA 条件下短程硝化过程系统稳定性研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(12):2677-2680.  
Yu Deshuang, Yin Jinlan, Wang Xiaoxia, et al. Study on stability of shortcut nitrification by controlling DO and FA[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(12):2677-2680(in Chinese).
- [8] Yang S, Yang F. Nitrogen removal via short-cut simultaneous nitrification and denitrification in an intermittently aerated moving bed membrane bioreactor[J]. J Hazard Mater, 2011, 195(1):318-323.
- [9] Zheng M, Liu Y C, Xu K N, et al. Use of low frequency and density ultrasound to stimulate partial nitrification and simultaneous nitrification and denitrification[J]. Bioresour Technol, 2013, 146:537-542.
- [10] Zheng M, Liu Y C, Xin J, et al. Ultrasonic treatment enhanced ammonia-oxidizing bacterial (AOB) activity for nitrification process[J]. Environ Sci Technol, 2015, 50(2):864-871.
- [11] 闫怡新,刘红. 低强度超声波强化污水生物处理中超声辐照污泥比例的优化选择[J]. 环境科学,2006,27(5):903-908.  
Yan Yixin, Liu Hong. Optimization of the proportion of irradiated sludge for enhancement of sludge activity in biological treatment of wastewater by low intensity ultrasound[J]. Environmental Science, 2006, 27(5):903-908(in Chinese).
- [12] 朱易春,王佳琪,章璋,等. 超声波参数对短程硝化的影响[J]. 中国给水排水,2018,34(5):26-31.  
Zhu Yichun, Wang Jiaqi, Zhang Zhang, et al. Effect of ultrasound parameters on partial nitrification[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5):26-31(in Chinese).
- [13] Zhang R, Jin R, Liu G, et al. Study on nitrogen removal performance of sequencing batch reactor enhanced by low intensity ultrasound[J]. Bioresour Technol, 2011, 102(10):5717-5721.
- [14] 高大文,彭永臻,王淑莹. 交替好氧/缺氧短程硝化反硝化生物脱氮 I. 方法实现与控制[J]. 环境科学学报,2004,24(5):761-768.  
Gao Dawen, Peng Yongzhen, Wang Shuying. Alternating oxic-anoxic shortcut nitrification-denitrification I.

- Realization and control [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5): 761 – 768 (in Chinese).
- [15] 高大文, 彭永臻, 王淑莹. 交替好氧/缺氧短程硝化反硝化生物脱氮Ⅱ. 过程控制模式的确定[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(5): 769 – 775.
- Gao Dawen, Peng Yongzhen, Wang Shuying. Alternating oxic-anoxic shortcut nitrification-denitrification Ⅱ. Study on control mode [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5): 769 – 775 (in Chinese).
- [16] Mogens H, van Loosdrecht M C M, Ekama G A, 等. 污水生物处理: 原理、设计与模拟[M]. 施汉昌, 胡志荣, 周军, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Mogens H, van Loosdrecht M C M, Ekama G A, *et al.* *Biological Wastewater Treatment: Principle, Design and Simulation* [M]. Shi Hanchang, Hu Zhirong, Zhou Jun, *et al.*, translated. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011 (in Chinese).
- [17] 刘宏, 彭永臻, 牛立飞, 等. 交替缺氧/好氧法短程硝化及 AOB 和 NOB 活性特征[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(7): 23 – 27.
- Liu Hong, Peng Yongzhen, Niu Lifei, *et al.* Shortcut nitrification and characteristic of AOB and NOB under alternating anoxic/aerobic mode [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(7): 23 – 27 (in Chinese).
- [18] Wei D, Du B, Xue X, *et al.* Analysis of factors affecting the performance of partial nitrification in a sequencing batch reactor [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2014, 98(4): 1863 – 1870.
- [19] Gu S, Wang S, Yang Q, *et al.* Start up partial nitrification at low temperature with a real-time control strategy based on blower frequency and pH [J]. *Bioresour Technol*, 2012, 112(3): 34 – 41.
- [20] 史舟, 张轶, 雷中方, 等. DO 和进水 pH 值对短程硝化及半亚硝化出水水质的影响[J]. *复旦学报: 自然科学版*, 2012, 51(3): 349 – 356.
- Shi Zhou, Zhang Yi, Lei Zhongfang, *et al.* Effects of DO and influent pH on shortcut nitrification and partial nitritation effluent quality [J]. *Journal of Fudan University: Natural Science*, 2012, 51(3): 349 – 356 (in Chinese).
- [21] 高春娣, 王惟肖, 李浩, 等. SBR 法交替缺氧好氧模式下短程硝化效率的优化[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(2): 403 – 409.
- Gao Chundi, Wang Weixiao, Li Hao, *et al.* Optimization of efficiency on partial nitrification under the mode of alternating anoxic/oxic in sequencing batch reactor [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(2): 403 – 409 (in Chinese).
- [22] 郭海娟, 马放, 沈耀良. DO 和 pH 值在短程硝化中的作用[J]. *环境工程学报*, 2006, 7(1): 37 – 40.
- Guo Haijuan, Ma Fang, Shen Yaoliang. Effects of DO and pH on nitrosification [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2006, 7(1): 37 – 40 (in Chinese).
- [23] 吴煌州, 邱凌峰, 陈益明, 等. 不同曝气量对短程硝化特性的影响[J]. *福州大学学报*, 2014, 42(1): 161 – 166.
- Wu Huangzhou, Qiu Lingfeng, Chen Yiming, *et al.* Effect of aeration flow on the performance of partial nitrification in a sequencing batch reactor [J]. *Journal of Fuzhou University*, 2014, 42(1): 161 – 166 (in Chinese).
- [24] 蒋轶锋, 陈浚, 王宝贞, 等. 间歇曝气对硝化菌生长动力学影响及  $\text{NO}_2^-$  积累机制[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 85 – 90.
- Jiang Yifeng, Chen Jun, Wang Baozhen, *et al.* Effect of intermittent aeration on growth kinetics of nitrifiers and mechanism for  $\text{NO}_2^-$  accumulation [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 85 – 90 (in Chinese).
- [25] 谢倍珍, 刘红, 闫怡新, 等. 低强度超声波强化污水生物处理理论和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- Xie Beizhen, Liu Hong, Yan Yixin, *et al.* *Low-energy Ultrasound Enhanced Biological Technology and Mechanism for Wastewater Treatment* [M]. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese).
- [26] 白璐, 王淑莹, 高守有. 低曝气量与实时控制下的常温短程硝化研究[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(9): 30 – 33.
- Bai Lu, Wang Shuying, Gao Shouyou. Shortcut nitrification at ambient temperature with low aeration rate and real-time control [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(9): 30 – 33 (in Chinese).
- [27] 丁文川, 吴丹, 曾晓岚, 等. 不同曝气量对 SBBR 短程硝化微生物特性及氮转化的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(9): 2112 – 2118.
- Ding Wenchuan, Wu Dan, Zeng Xiaolan, *et al.* Effect of aeration flow on microbial characteristics and nitrogen transformation of shortcut nitrification processing in a sequencing batch biofilm reactor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(9): 2112 – 2118 (in Chinese).
- [28] 王佳琪, 朱易春, 李齐佳. 低强度超声在低 C/N 污水处理中的应用[J]. *工业水处理*, 2017, 37(5): 63 –



67.  
Wang Jiaqi, Zhu Yichun, Li Qijia. Application of low-intensity ultrasound to the treatment of low C/N sewage [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(5): 63 – 67 (in Chinese).
- [29] 张瑞娜. 低强度超声波强化 SBR 处理含氮污水的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.  
Zhang Ruina. Study on Nitrogen Removal from Nitrogenous Wastewater Using Sequencing Batch Reactor Enhanced by Low Intensity Ultrasound [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011 (in Chinese).
- [30] 赵青, 卞伟, 李军, 等. DO/NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 实现短程硝化过程中生物膜特性[J]. *环境科学*, 2018, 39(3): 1 – 9.  
Zhao Qing, Bian Wei, Li Jun, *et al.* Characteristics of biofilm during the transition process of complete nitrification and partial nitrification [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1 – 9 (in Chinese).
- [31] 刘志培, 刘双江. 硝化作用微生物的分子生物学研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(4): 521 – 525.

Liu Zhipei, Liu Shuangjiang. Advances in the molecular biology of nitrifying microorganisms[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2004, 10(4): 521 – 525 (in Chinese).



作者简介:章璋(1994 – ),男,江西赣州人,硕士研究生,主要研究方向为脱氮除磷。

E – mail:474096947@qq.com

收稿日期:2018 – 10 – 29

(上接第 27 页)

- Zhu Jie, Chen Chen, Chen Hongbin, *et al.* Enhanced filtration control of micro-metazoan leakage in granular active carbon filter [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2013, 41(6): 862 – 868 (in Chinese).
- [12] Wu Z L, Zhu J, Tang X C, *et al.* Synergistic effect of chlorination and sand filtration for efficient elimination of invertebrate leakage in BAC filter [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2017, 79: 235 – 242.
- [13] Wang Q, You W, Li X W, *et al.* Seasonal changes in the invertebrate community of granular activated carbon filters and control technologies [J]. *Water Res*, 2014, 51: 216 – 227.
- [14] 刘广立. 膜技术在水和废水处理中的应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.  
Liu Guangli. Application of Membrane Technology in Water and Wastewater Treatment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003 (in Chinese).



作者简介:吴志玲(1989 – ),女,江苏高邮人,博士,讲师,主要从事饮用水处理及生物安全性的研究。

E – mail:w84742914@126.com

收稿日期:2019 – 01 – 14