

温度冲击对低强度超声波促进短程硝化的影响

田 帅^{1,2}, 朱易春^{1,2}, 黄书昌^{1,2}, 连军锋^{1,2}, 李 鑫^{1,2}

(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: 采用低强度超声波辐照污泥, 考察了 SBR 内亚硝酸盐积累率 (NAR)、氮素转化、比耗氧速率 (SOUR)、污泥性能的变化, 探究温度冲击对低强度超声波促进短程硝化的影响。结果表明, 温度由 18 ℃ 升高至 28 ℃ 后, 对照组的短程硝化消失, 超声组的 NAR 仍保持在 90% 以上, 实现了稳定的短程硝化。对照组和超声组的 SOUR_{AOB} 分别为 3.76、3.80 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$, 但超声组的 SOUR_{NOB} 为 3.95 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$, 显著低于对照组的 7.90 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$ 。对照组的污泥容积指数 (SVI) 由 200 mL/g 持续升高至 500 mL/g 以上, 发生了污泥膨胀, 而超声组的 SVI 值一直保持在 200 mL/g 左右。通过扫描电镜发现, 超声波辐照增加了污泥中的短杆菌和球菌数量, 促进了氨氧化菌 (AOB) 活性, 同时有效抑制了亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 活性。因此, 可通过低强度超声波辐照提高短程硝化的抗温度冲击性能, 以保证短程硝化的稳定运行。

关键词: 短程硝化; 低强度超声波; 温度冲击; 亚硝酸盐积累率; 氨氧化菌; 亚硝酸盐氧化菌

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)19-0020-06

Effect of Temperature Shock on Partial Nitrification Enhanced by Low Intensity Ultrasound

TIAN Shuai^{1,2}, ZHU Yi-chun^{1,2}, HUANG Shu-chang^{1,2}, LIAN Jun-feng^{1,2}, LI Xin^{1,2}

(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 sludge was irradiated by low intensity ultrasound. Variations of nitrite accumulation rate (NAR), nitrogen transformation, specific oxygen uptake rate (SOUR) and sludge properties were investigated, and the effect of temperature shock on partial nitrification (PN) enhanced by low intensity ultrasound was explored. The results showed that PN in the control group was disappeared after the temperature increased from 18 ℃ to 28 ℃. However, the NAR of the ultrasound group remained above 90%, indicating a stable PN was achieved. The SOUR_{AOB} of the control group and the ultrasound group were 3.76 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$ and 3.80 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$, respectively, while the SOUR_{NOB} of the ultrasound group was 3.95 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$, which was significantly lower than that of the control group [7.90 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$]. The sludge volume index (SVI) of the control group increased from

200 mL/g to more than 500 mL/g, indicating sludge bulking occurred. By contrast, the SVI value of the ultrasound group was maintained at about 200 mL/g. Scanning electron microscopy (SEM) showed that ultrasonic irradiation increased the number of *Brevibacterium* and cocci of the sludge, and the activity of ammonia oxidizing bacteria (AOB) was improved and that of nitrite oxidizing bacteria (NOB) was effectively inhibited. Therefore, temperature shock resistance of PN could be improved by low intensity ultrasonic irradiation, and stable PN was maintained.

Key words: partial nitrification; low intensity ultrasound; temperature shock; nitrite accumulation rate; ammonia oxidizing bacteria; nitrite oxidizing bacteria

短程硝化是将硝化作用控制在亚硝化阶段,通过特定的调控手段抑制亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻)的活性并促使氨氧化菌(AOB)成为优势菌群,以实现 NO₂⁻-N 的大量积累;相比于传统的全程硝化,短程硝化可减少 25% 的曝气量,节约 40% 的碳源,降低污泥产量^[1]。目前实现短程硝化的可行性方法主要是调控溶解氧(DO)、温度、污泥龄(SRT)、游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)等参数^[2-4]。然而,通过参数控制法实现短程硝化后极易出现失稳、甚至污泥膨胀等现象^[5]。另外,亚硝化菌具有生长速率低、生物量小和对环境因素敏感的特性^[6],维持长期稳定的短程硝化尚无有效的控制方法。

温度是实现及维持短程硝化稳定性的关键因素,在 11~15℃ 与 31~33℃ 条件下,AOB 的生长速率快于 NOB,而在 16~30℃ 条件下,NOB 的生长速率快于 AOB^[7]。近年来研究发现,适当能量的超声波可促进 AOB 生长并抑制 NOB 增殖,从而实现短程硝化的快速启动^[8]。朱易春等人^[9]采用声能密度为 0.05 W/mL 的超声波辐照污泥,在促进 AOB 活性的同时抑制了 NOB 活性,从而实现短程硝化。升温或降温均会影响污泥活性,温度波动产生的温度冲击不可避免地会对生物反应器造成影响。然而,目前温度冲击对低强度超声波维持短程硝化稳定性的影响尚不明确。笔者所在课题组在 SBR 中采用超声波与间歇曝气模式耦合,发现由声能密度为 0.25 W/mL 的超声波实现的短程硝化最为稳定,并进一步研究了温度冲击对超声波促进短程硝化的影响,同时探究了 AOB 和 NOB 活性的变化规律,以为超声波在生物脱氮技术中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 接种污泥和进水水质

接种污泥取自实验室 SBR 中驯化 3 个月的短程硝化污泥,污泥的亚硝化活性和硝化活性即

SOUR_{AOB} 和 SOUR_{NOB} 分别为 3.93、8.01 mgO₂/(gMLSS·h),亚硝酸盐积累率(NAR)达到 50%,污泥浓度为 3 500 mg/L。模拟低 C/N 值进水,进水氨氮为 60 mg/L,进水 COD 控制在 150 mg/L,进水总磷为 1.5 mg/L。反应器内 pH 值控制在 7.5~8.5。

1.2 试验装置

试验装置包括对照组与超声组两个 SBR 装置,氨氮负荷均为 0.18 kg/(m³·d),污泥龄均为 20 d。SBR 反应器的直径为 20 cm,总高度为 30 cm,有效容积为 5.0 L,换水率为 50%,如图 1 所示。反应器共运行 87 d,分为两个阶段,第 1 阶段(1~47 d)在 18℃ 下运行,第 2 阶段(48~87 d)在 28℃ 下运行。反应器进水、排水各 5 min,采用缺氧/好氧交替运行模式,交替循环 5 次后沉淀(50 min)排水,随后静置 2 h,每个周期为 8 h,每天运行 3 个周期。其中缺氧/好氧时间比为 1:1,即缺氧 30 min、好氧曝气 30 min,在缺氧阶段设置搅拌,好氧阶段的曝气量为 1.0 L/min。在反应器静置阶段进行超声波辐照试验。

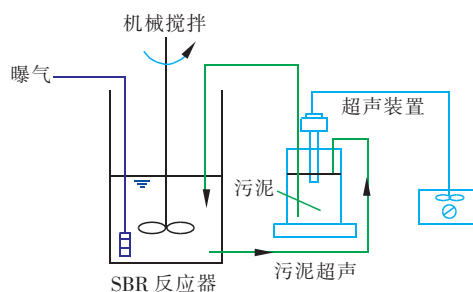


图 1 SBR 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of SBR device

1.3 超声波辐照试验

超声波装置采用探头式超声波发生器,频率为 20 kHz,探头直径为 6 mm,辐照间隔周期为 1 d。在 SBR 沉淀排水后的静置阶段,取反应器中全部泥水混合物(污泥浓度为 5 000 mg/L)于烧杯中,使探头

浸入液面下 10 mm 进行超声。超声波参数如下:声能密度为 0.25 W/mL,辐照时间为 10 min。

1.4 测定指标与方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、MLSS 等均采用国家标准方法测定,总无机氮(TIN)为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 三者之和; SOUR_{AOB} 和 SOUR_{NOB} 的测定及计算方法参见文献[10];污泥的胞外聚合物(EPS)提取采用热提取法^[11],其中蛋白质采用考马斯亮蓝试剂法测定,多糖采用硫酸-苯酚法测定;采用扫描电子显微镜(SEM)观察污泥的微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 温度冲击对短程硝化的影响

一般认为,当亚硝酸盐积累率高于 50% 且稳定产生较高浓度的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 时,即实现了短程硝化^[9]。图 2 为不同温度条件下反应器内亚硝酸盐积累率和 TIN 浓度的变化特性。第 1 阶段(1~47 d)运行温度为 18 ℃,初期(1~10 d)属于污泥驯化阶段,对照组和超声组的 NAR 整体均呈上升趋势,同时 TIN 浓度逐渐减小;而后(11~47 d)对照组的 NAR 稳定在 60% 以上,超声组的 NAR 达到 80% 以上,超声波辐照维持了更高的亚硝酸盐积累率。

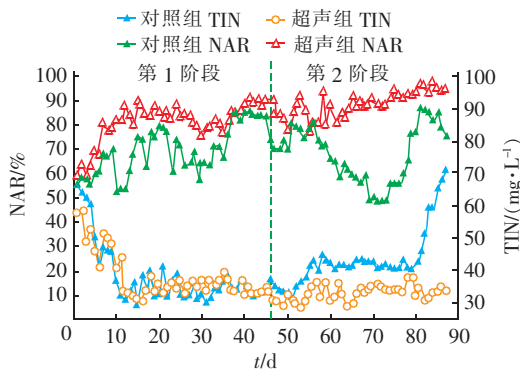


图 2 NAR 和 TIN 的变化

Fig. 2 Variation of NAR and TIN

第 2 阶段(48~87 d)运行温度为 28 ℃,由于硝化细菌对环境温度的突变极度不适应,导致对照组和超声组在第 48~52 天的 NAR 分别降低至 70% 和 80%。随着微生物对高温环境的适应,在第 53 天后,超声组的 NAR 逐渐升高至 95%,出水 TIN 浓度依旧维持在 35 mg/L 左右。温度升高后,对照组的 NAR 逐渐降低至 50% 以下,出水 TIN 浓度维持在 40 mg/L 以上,但在第 74 天后由于发生污泥膨胀,氨氮氧化能力减弱,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度快速下降,

导致 NAR 逐渐上升至 80% 以上,出水 TIN 浓度在第 80 天后持续上升至 70 mg/L,此时反应器内基本无反硝化作用。将温度由 18 ℃ 升高至 28 ℃ 后,促进了 NOB 的活性,原有的缺氧/好氧交替运行模式不足以抑制 NOB 活性,因此对照组的 NAR 逐渐下降,短程硝化系统逐渐失稳。然而,在高温条件下,超声波依然能够有效抑制 NOB 的活性,使得超声组能够维持稳定的短程硝化,并且反硝化作用基本不受影响。另外,高温条件下丝状菌容易生长繁殖^[12],反应器长期运行后丝状菌成为系统的优势菌群,对硝化细菌和反硝化菌存在拮抗作用。因此,在试验后期,对照组发生污泥膨胀,无法进行有效的硝化作用,导致出水 TIN 浓度持续上升,最终短程硝化被破坏。而超声波辐照能够有效打断丝状菌菌丝,破坏其絮体结构^[13],使 EPS 部分释放,菌胶团之间的相互作用发生改变,进而影响其沉降性能,避免发生污泥膨胀,保证了亚硝化菌对氨氮的有效氧化。

2.2 氮素转化情况

反应器内氮化物转化情况如图 3 所示。

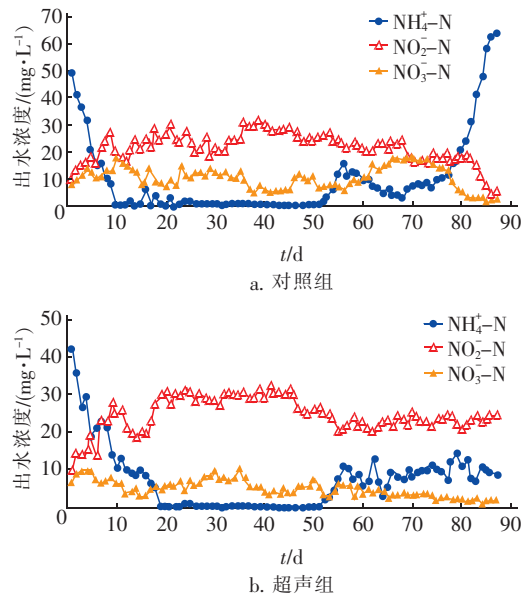


图 3 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 出水浓度的变化

Fig. 3 Variation of effluent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentrations

第 1 阶段(1~47 d),对照组的氨氮氧化能力不断增强,出水氨氮浓度逐渐降低,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度整体呈上升趋势而后维持在 25 mg/L 左右,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度维持在 10 mg/L 左右,NAR 维持在 70% 左右;超声组出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐降低至

0.58 mg/L,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度整体呈上升趋势而后维持在 30 mg/L 左右,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度维持在 5 mg/L 左右,NAR 维持在 85% 左右。以上结果表明,超声波辐照能有效促进短程硝化。

第 2 阶段(48 ~ 87 d),对照组的出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐升高至 60 mg/L,最终反应器内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 无法被有效氧化,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度逐渐降低至 5 mg/L 左右,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度维持在 10 mg/L 以上,没有实现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的有效积累,短程硝化遭到破坏;超声组的出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐升高至 10 mg/L 随后趋于稳定,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度逐渐降低并稳定在 25 mg/L 左右,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度由最高时的 5.83 mg/L 降低至 0.64 mg/L,NAR 维持在 95% 左右。氨单加氧酶(AMO)作为 AOB 进行氧化作用的关键酶,其活性与出水水质密切相关。唐欣等人^[14]的研究表明,适当能量的超声波处理可增强 AMO 的活性。但温度由 18 °C 升高到 28 °C 后,超声波对 AMO 的促进作用减弱,使得超声组的出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高。以上结果表明,当反应器温度由 18 °C 升高至 28 °C 后,对照组的短程硝化系统失稳,而超声组实现了短程硝化系统的稳定运行。

2.3 AOB 和 NOB 活性的变化

分别在第 42 和 65 天测定 AOB 和 NOB 在两种温度下的活性。结果表明,温度由 18 °C 升至 28 °C 后,对照组的 SOUR_{AOB} 由 2.03 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$ 增大至 3.76 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$, SOUR_{NOB} 由 7.71 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$ 增至 7.90 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$, AOB 和 NOB 的活性分别增大了 85.2%、2.5%;超声组的 SOUR_{AOB} 由 11.75 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$ 减小至 3.80 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$, SOUR_{NOB} 由 3.71 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$ 略微增大到 3.95 $\text{mgO}_2/(\text{gMLSS} \cdot \text{h})$, AOB 活性减小了 67.7%、NOB 活性增大了 6.5%。由于 AOB 和 NOB 的代谢特征差异, AOB 和 NOB 的最适温度不同,从而活性随温度的变化存在差异^[15]。温度升高后,对照组和超声组的 NOB 活性均增大,但对照组的 NOB 活性显著高于超声组,亚硝酸盐的氧化速率更大,导致短程硝化被破坏。Lin 等人^[16]认为超声波会对微生物产生损伤效应,不同种类的微生物对超声波刺激的耐受性不同,NOB 可能对超声波刺激的耐受性较弱。经超声波辐照后,两种温度条件下,NOB 的活性均受到较大抑制。综

上,在两种温度条件下,超声波辐照均促进了 AOB 活性同时抑制了 NOB 活性,从而实现了稳定的短程硝化。

2.4 污泥特性变化

污泥沉降性能的好坏影响着短程硝化的实现及稳定性,其中污泥容积指数(SVI)是影响反应器稳定运行的重要参数。胞外聚合物(EPS)是在特殊环境下微生物分泌的复杂高分子不溶性有机物,研究表明,EPS 含量越高,SVI 值就越大,污泥的沉降性能就越差^[17-18]。图 4 分别为蛋白质和多糖含量的变化。可知,当温度为 18 °C 时,对照组和超声组的蛋白质、多糖含量均分别保持在 10、20 mg/gMLSS 以内;当温度升高至 28 °C 时,对照组的蛋白质含量持续增加,最高达到 89.10 mg/gMLSS ,明显高于超声组(蛋白质含量维持在 30 mg/gMLSS 左右),对照组和超声组的多糖含量均先减小而后稳定在 8 mg/gMLSS 左右。

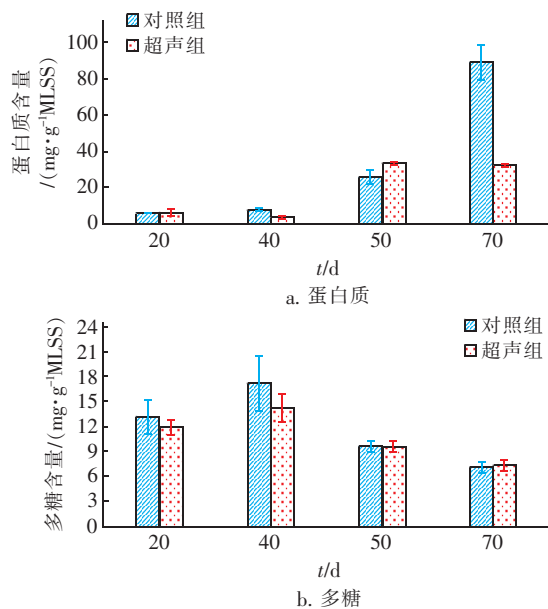


图 4 蛋白质和多糖含量的变化

Fig. 4 Variation of protein and polysaccharide contents

图 5 为 MLSS 和 SVI 值的变化情况。可知,在温度为 18 °C 条件下,对照组的 MLSS 保持在 3 500 mg/L 左右,SVI 值维持在 200 mL/g 以内,未发生污泥膨胀;超声组的 MLSS 先减小而后维持在 2 500 mg/L 左右,SVI 值维持在 200 ~ 250 mL/g,污泥处于微膨胀状态。当温度升高至 28 °C 后,对照组的 MLSS 持续降至 1 500 mg/L,SVI 值持续升至 500 mL/g,发生了污泥膨胀,短程硝化被破坏;但超声组

的 MLSS 维持在 2 000 mg/L 左右,SVI 值维持在 250 mL/g 以内,实现了稳定的短程硝化。有研究表明,高温有利于丝状菌的生长,从而出现丝状菌膨胀^[14],EPS 含量持续增加,导致污泥沉降性能恶化,泥水混合物无法有效分离,使得 MLSS 持续降低,而超声波辐照能够有效打断丝状菌菌丝,避免丝状菌在高温下过度生长,改善了污泥沉降性能,避免发生污泥膨胀。

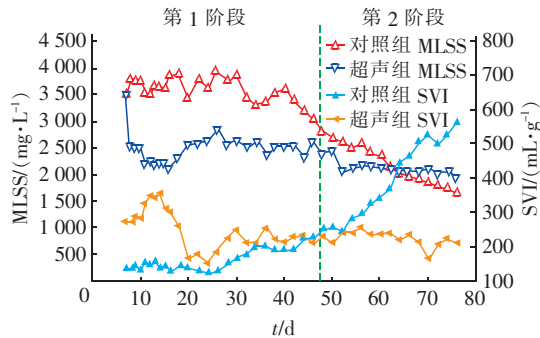


图5 MLSS 和 SVI 的变化

Fig. 5 Variation of MLSS and SVI

2.5 超声波对污泥结构的影响

图6为污泥絮体的扫描电镜照片。可知,对照组主要以丝状菌为主,温度骤变导致微生物释放大量的蛋白质并附着在丝状菌表面,从而形成丝带状的污泥絮体结构,表面相对光滑,边界清晰并且絮体之间存在空隙;而超声组主要以球菌和短杆菌为主,絮体呈现簇状结构,表面相对粗糙并且有较多突起和凹陷,但是絮体之间没有空隙。AOB 主要为短杆状的亚硝化单胞菌属和球状的亚硝化菌属,而 NOB 主要为硝化螺旋菌属。这表明周期性的超声波辐照使得污泥菌群中的短杆菌和球菌数量增多,保证了短程硝化的稳定运行。

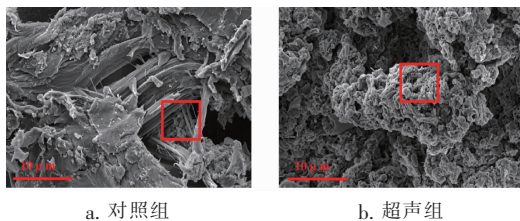


图6 污泥扫描电镜照片

Fig. 6 SEM photos of sludge

3 结论

① 在 18 ℃ 和 28 ℃ 条件下,超声组的亚硝酸盐积累率分别达到了 80% 和 95%,超声波辐照提高

了污泥的抗温度冲击性能,实现并维持了稳定的短程硝化。同时超声波辐照能够抑制丝状菌的过度生长,使污泥具有良好的沉降性能,SVI 值维持在 200 mL/g 左右。

② 周期性的超声波辐照使得污泥菌群中的短杆菌和球菌数量增多,有效抑制了 NOB 的活性。温度升高后,超声组的 $SOUR_{NOB}$ 也仅从 3.71 mgO₂/(gMLSS · h) 略微增大至 3.95 mgO₂/(gMLSS · h),保证了短程硝化的稳定运行。

参考文献:

- [1] Wei D, Zhang K, Ngo H H, *et al.* Nitrogen removal via nitrite in a partial nitrification sequencing batch biofilm reactor treating high strength ammonia wastewater and its greenhouse gas emission [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 230:49–55.
- [2] Miao Y, Zhang L, Li B, *et al.* Enhancing ammonium oxidizing bacteria activity was key to single-stage partial nitrification-anammox system treating low-strength sewage under intermittent aeration condition [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 231:36–44.
- [3] 刘宏,彭永臻,卢炯元,等. 温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 [J]. *环境科学*, 2017, 38 (11):4656–4663.
Liu Hong, Peng Yongzhen, Lu Jiongyuan, *et al.* Effects of temperature on shortcut nitrification and nitrification activity of nitrification in an intermittent aeration sequencing batch reactor [J]. *Environmental Science*, 2017, 38 (11):4656–4663 (in Chinese).
- [4] 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, 256:285–294.
- [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] Ge S, Wang S, Yang X, *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: A review [J]. *Chemosphere*, 2015, 140: 85–98.
- [7] 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).
- [8] Zheng M, Liu Y C, Xin J, *et al.* Ultrasonic treatment enhanced ammonia-oxidizing bacterial (AOB) activity for nitrification process[J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(2): 864–871.
- [9] 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).
- [10] 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.
- [11] 龙焙, 程媛媛, 赵珏, 等. 好氧颗粒污泥处理化工废水的应用研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(5): 26–32.
- Long Bei, Cheng Yuanyuan, Zhao Jue, *et al.* Treatment of chemical wastewater by aerobic granular sludge[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(5): 26–32 (in Chinese).
- [12] Krishna C, van Loosdrecht M C M. Effect of temperature on storage polymers and settleability of activated sludge[J]. *Water Res*, 1999, 33(10): 2374–2382.
- [13] 王梦杰, 员建, 马华继, 等. 低强度超声波对膨胀活性污泥沉降性能及污泥减量的影响[J]. *化工进展*, 2017, 36(3): 1134–1139.
- Wang Mengjie, Yuan Jian, Ma Huaji, *et al.* Effects of low intensity ultrasonic treatment on settleability of bulking sludge and sludge reduction[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(3): 1134–1139 (in Chinese).
- [14] 唐欣, 乔森, 周集体. 低强度超声对短程硝化污泥活性的影响[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(1): 267–272.
- Tang Xin, Qiao Sen, Zhou Jiti. Influence of the lower intensity ultrasound on the activity of the partial nitrification sludge[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(1): 267–272 (in Chinese).
- [15] 李捷, 徐浩, 罗凡, 等. 城市生活污水短程硝化的两个关键控制因素研究[J]. *给水排水*, 2018, 44(6): 29–32.
- Li Jie, Xu Hao, Luo Fan, *et al.* Research on two key control factors of urban sewage short-cut nitrification[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(6): 29–32 (in Chinese).
- [16] Lin L, Wu J. Enhancement of shikonin production in single- and two-phase suspension cultures of *Lithospermum erythrorhizon* cells using low-energy ultrasound[J]. *Biotechnol Bioeng*, 2002, 78(1): 81–88.
- [17] Dai Q X, Ma L P, Ren N Q, *et al.* Investigation on extracellular polymeric substances, sludge flocs morphology, bound water release and dewatering performance of sewage sludge under pretreatment with modified phosphogypsum[J]. *Water Res*, 2018, 142: 337–346.
- [18] 王杰, 彭永臻, 杨雄, 等. 温度对活性污泥沉降性能与微生物种群结构的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(1): 109–116.
- Wang Jie, Peng Yongzhen, Yang Xiong, *et al.* Effect of temperature on activated sludge settleability and microbial community structure[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(1): 109–116 (in Chinese).



作者简介:田帅(1996–),男,重庆人,硕士研究生,主要从事污水处理技术研究。

E-mail: 1747255850@qq.com

收稿日期: 2019–06–02