

环境温度下中试氧化沟短程硝化的启动及运行

李俊¹, 陈益明², 张健², 刘福长¹, 张新颖¹

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省环境科学研究院, 福建 福州 350013)

摘要: 在高温(29~31℃)环境下,采用控制反应器中溶解氧浓度及结合投加抑制剂NaCl的方式,经过32d的批式操作,在中试规模氧化沟反应器中成功启动短程硝化。33d之后,氨氮降解率超过50%,亚硝化率稳定维持在90%以上。随着季节性降温,在常低温情况下(18~27℃)进行二次启动,第27天亚硝化率大于50%,自第35天开始,通过在氧化沟内形成溶解氧梯度并延长反应时间的方式,在第42天之后亚硝化率稳定在90%以上。对污泥微生物进行高通量测序分析后发现,亚硝化单胞菌(*Nitrosomonas*)占9.39%,证明在中试氧化沟内成功实现了亚硝化菌的富集。之后转为连续流运行,在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 约为70 mg/L、HRT为11.2~12.7 h的条件下,氧化沟的亚硝化效果最好。对比两次启动过程,常低温下短程硝化启动成功的耗时较高温的长,高温状态下污泥比氨氧化速率为0.037 kgN/(kgMLSS·d),而常低温下为0.030 kgN/(kgMLSS·d)。

关键词: 短程硝化; 中试; 氧化沟; 环境温度; 比氨氧化速率

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)03-0007-07

Start-up and Operation of Partial Nitrification in Pilot-scale Oxidation Ditch under Ambient Temperature

LI Jun¹, CHEN Yi-ming², ZHANG Jian², LIU Fu-chang¹, ZHANG Xin-ying¹

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Provincial Academy of Environmental Science, Fuzhou 350013, China)

Abstract: Through oxygen-limited control and NaCl dosing, partial nitrification was successfully achieved in a pilot-scale oxidation ditch after sequencing batch start-up for 32 d under high-temperature (29–31℃). The removal rate of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and nitrite accumulation rate (NAR) was maintained over 50% and 90% respectively after 33 d. As the temperature seasonally decreasing, partial nitrification was successfully start-up at the second time in the regular-low temperature (18–27℃). On the 27th day, NAR was over 50%. From the 35th day, the measures such as formation of oxygen gradient mode and extending the reaction time were adopt in the oxidation ditch, and NAR was maintained over 90% on the 42th day. Though high-throughput sequencing analysis of microorganisms in activated sludge, it was found that *Nitrosomonas* had a propotion of 9.39%, indicating the successful accumulation of *Nitrosomonas* in the pilot-scale oxidation ditch. Then the oxidation ditch was transfered to continuous flow operation, the best nitrification effect was achieved when influent $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was about 70 mg/L and HRT

was 11.2 – 12.7 h. Comparing two start-up processes, start-up in the regular-low temperature was more time-consuming than that in high-temperature. The specific ammonia oxidation rate is 0.037 kgN/(kgMLSS · d) and 0.030 kgN/(kgMLSS · d) at the high and regular-low temperature respectively.

Key words: partial nitrification; pilot-scale; oxidation ditch; ambient temperature; specific ammonia oxidation rate

将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的氧化产物控制为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 是实现短程硝化的关键。将短程硝化与厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 联用, 能够极大降低反应过程中的曝气量及运行费用, 且具有无需外加碳源等优点^[1,2]。因此, 短程硝化工艺的启动和运行控制成为了国内外研究的热点。

目前用于短程硝化启动的反应器集中于 SBR、CSTR、A/O 等。荣宏伟等^[3]在 SBR 反应器中实现了短程硝化的启动并探究了温度的影响。吴鹏等^[4]控制反应器温度为 30 ℃, 在小试连续流 CSTR 反应器中成功启动短程硝化。于令芹等^[5]在 A/O 反应器中实现了生活污水短程硝化反硝化启动。也有研究者在 SBBR、MBR 等^[6,7]反应器中对短程硝化的控制条件做了探究。但以上研究多为实验室小试, 目前关于短程硝化中试及其应用的研究还较少。考虑到国内有约 20% 的污水处理厂采用氧化沟及其变型工艺, 为能够与生产实践紧密结合, 本研究采用中试规模氧化沟实现短程硝化, 探讨不同温度下短程硝化的启动方式和运行条件, 以期短程硝化在实际工程中的应用提供理论依据和技术支持。

1 试验材料及方法

1.1 氧化沟装置及流程

试验所用氧化沟装置见图 1。采用 Carrousel 氧化沟形式, 沟断面尺寸为 0.3 m × 1.8 m (超高为 0.3 m), 沟直段长 2.5 m, 总长约 12.5 m, 有效池容约为 5.6 m³。沟中设置两台潜水搅拌机, 采用 3 台电磁式鼓风机曝气。

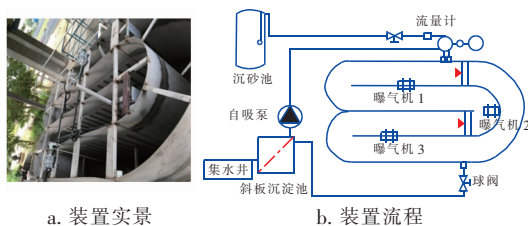


图 1 氧化沟装置

Fig. 1 Diagram of oxidation ditch

中试氧化沟装置放于福州市闽侯上街大学城

污水处理厂沉砂池旁, 利用潜污泵抽沉砂池出水至储水池, 并通过流量计控制流量, 设置配药桶配制高浓度的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液, 通过蠕动泵抽至储水池, 与沉砂池出水在此混匀作为氧化沟连续流状态下的进水。氧化沟出水溢流至斜板沉淀池, 池内污泥通过自吸泵回流至进水端, 出水排到厂区集水井。

1.2 分析方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$: N-(1-萘基)-乙二胺光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$: 麝香草酚分光光度法; pH 值和 DO: 电极法。

1.3 试验方法

整个试验于 2016 年 7 月开始第一次启动, 持续 55 d, 在第 56 天氧化沟装置出现跑泥现象, 因此在 10 月进行了二次启动, 持续 85 d。

1.3.1 第一次启动运行条件

为实现短程硝化的快速启动, 第一次启动过程采用自来水配水并以批式运行, 工序包括进水 (2 h)、曝气推流 (14 h)、沉淀 (1 h)、排水 (2 h) 和闲置 5 个阶段, 排水比约为 2/5, 每天运行一个周期。当亚硝化率 (NAR) > 90% 并稳定运行 7 个周期时直接以厂区沉砂池出水作为原水, 转为连续流运行, 进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度通过配药桶调节。初始接种污泥全部为污水厂 CASS 池稳定运行的硝化污泥, 起始污泥浓度为 3 530 mg/L。工况参数见表 1。

表 1 短程硝化第一次启动运行参数

Tab. 1 The first-time operational parameter of partial nitrification

时间/d	运行方式	进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	HRT/h	曝气量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	曝气方式
1 ~ 17	批式	105	14	2	连续均匀
18 ~ 22	批式	105	14	2	间歇
23 ~ 26	批式	105	14	2.5	连续均匀
27 ~ 38	批式	150	14	2.5	连续均匀
39 ~ 55	连续流	90	15.1 ~ 17.5	2.5	连续均匀

1.3.2 第二次启动运行条件

第二次启动借鉴第一次启动方式, 采用自来水

配水和批式操作方式,工序包括进水(1.5 h)、曝气推流、沉淀(0.5 h)、排水(1 h)和闲置5个阶段,排水比约为2/5,每天运行一个周期。当 $\text{NAR} > 90\%$ 并稳定运行7个周期时直接以厂区沉砂池出水作为原水,转为连续流运行,进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度通过配药桶调节。初始接种污泥一半为第一次启动成功的短程硝化污泥,一半为污水厂CASS池稳定运行的硝化污泥,起始污泥浓度为 $3\,538\text{ mg/L}$ 。工况参数见表2。

表2 短程硝化第二次启动运行参数

Tab. 2 The second-time operational parameter of partial nitrification

时间/d	运行方式	进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	HRT/h	曝气量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	曝气方式
1~12	批式	120	15	2	连续均匀
13~15	批式	120	15	2.5	连续均匀
16~22	批式	160	15	2.5	连续均匀
23~34	批式	160	15	2.5/2	分时段变气量
35~41	批式	160	15	2.5/2	分廊道变气量
42~49	批式	160	19	2.5	连续均匀
50~59	连续流	98.8	11.2~14	2.5	连续均匀
60~69	连续流	73.3	9~10	2.5	连续均匀
70~77	连续流	71.8	11.2~12.7	2.5	连续均匀
78~85	连续流	70.8	14.7~17	2.5	连续均匀

2 结果与讨论

2.1 氧化沟短程硝化启动

2.1.1 高温下短程硝化的启动与运行

氧化沟于2016年7月启动,水温为 $30.3 \sim 31.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。多数研究表明^[8~10],维持反应器中DO在较低水平是实现短程硝化的关键因素,因此控制氧化沟各廊道的DO为 0.2 mg/L 。为更好地实现短程硝化,启动阶段采用限时曝气措施,并参照相关研究结论^[11],将氨氮氧化率维持在50%左右。试验结果见图2。开始启动短程硝化前,先对反应器中的接种污泥进行两个周期的闷曝。由图2可知,在启动初期(1~17 d),控制进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 105 mg/L 左右,每台曝气机的曝气量为 $2\text{ m}^3/\text{h}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化率约为50%,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $(52.3 \pm 11.5)\text{ mg/L}$,去除的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 几乎全转为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,无 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累。

有研究者指出,间歇曝气有助于 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积

累^[12]。因此,在第18~22天按 $40\text{ min}/20\text{ min}$ 的曝气/非曝气时间比控制氧化沟内间歇曝气转换。此阶段由于曝气时间减少,氨氮氧化率降为 $25.7\% \sim 36.9\%$,但 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 依然没有累积。有研究表明,一定浓度的NaCl有助于淘汰亚硝酸盐氧化菌(NO_B),加快短程硝化^[13]。因此在第23天按 2.5 g/L 的量投加抑制剂NaCl,并调高每台曝气机的曝气量至 $2.5\text{ m}^3/\text{h}$,曝气量的增加使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解率升高到73%左右,每个周期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的降解量也增加到约 82 mg/L 。为了提高NaCl对NO_B的抑制效果,在23~27 d单个周期反应结束后不排水,继续加药反应,两个周期换一次水,由此导致在此阶段进出水的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 不断增加。

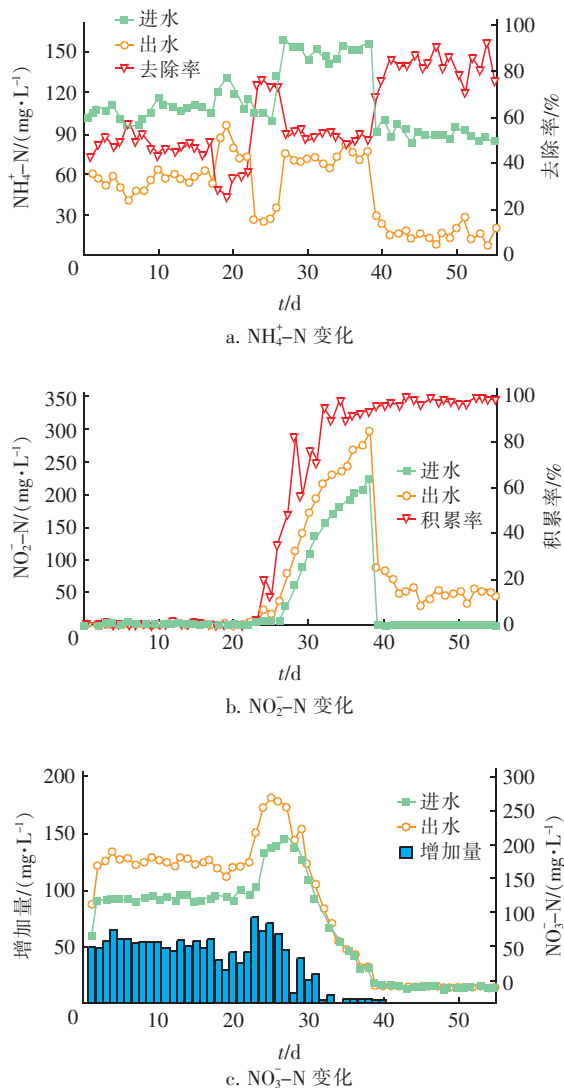


图2 第一次运行过程中三氮浓度变化

Fig. 2 Variation of nitrogen at the first-time operation

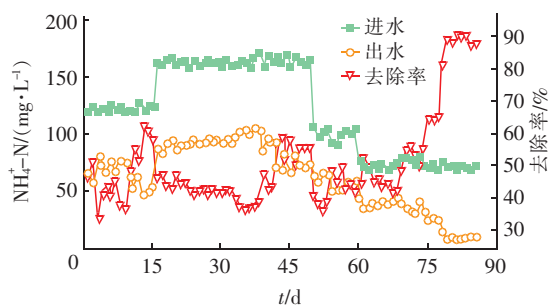
加入 NaCl 后, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累量不断增加, 到第 26 天 NAR 达到 48%。第 27 天后, 增加进水氨氮浓度至约 150 mg/L, 在此阶段 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解率维持在 50% 左右, NAR 不断提升。在第 28 天 $\text{NAR} > 50\%$, 认为短程硝化初步启动成功, 并在第 32 天 NAR 达到了 90%, 之后也一直维持在 90% 以上。NaCl 的投加加快了反应器内氨氧化菌(AOB)的富集以及 NOB 的淘汰, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 开始出现累积后, 每周期 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的增加量不断减小, 至第 38 天, 氨氮降解了 78.6 mg/L, NAR 为 93.9%, 而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 只增加了 5 mg/L。

为能更好模拟实际工程中氧化沟的运行情况, 在第 39 天将氧化沟转为连续流运行。在 39 ~ 55 d 控制进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 (91.4 ± 7.5) mg/L、进水流量为 320 ~ 370 L/h、HRT 为 (16.3 ± 1.2) h 情况下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为 68.3% ~ 92.8%, 连续流运行前 3 d, 由于批式运行过程中反应器内积累的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 未充分清洗, 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 不断减小, 之后出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 维持在 (44.3 ± 13.5) mg/L, 出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 小于 2 mg/L。第 45 天和 51 天, 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 突然降低, 是由于氧化沟内污泥流失导致, 但很快就能恢复, 说明反应器内的亚硝化菌有较高的生物活性, 亚硝化反应能快速调整到正常水平。第 56 天由于反应器内污泥再次流失, 开始进行第二次短程硝化污泥驯化。

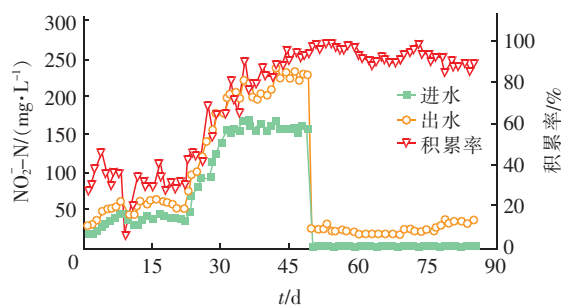
2.1.2 常低温下短程硝化的启动与运行

2016 年 10 月开始短程硝化的第二次启动, 由于季节性降温, 水温为 18 ~ 27.1 °C。试验结果见图 3。第 1 ~ 12 天, 控制进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度约为 120 mg/L, 每台曝气机的曝气量为 2 m³/h, 每个周期的反应时间为 15 h, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 减少量为 (53.3 ± 13.0) mg/L, 由于反应器内存在部分已驯化成熟的 AOB, 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 增加为 (13.2 ± 10.0) mg/L, NAR 约为 30.4%, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 增加至 (41.8 ± 21.8) mg/L。第 13 ~ 15 天, 增加曝气量到 2.5 m³/h, 氨氮氧化率从原来的 44.5% 提升到 60.4%, 每周期 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 增加量为 (18.6 ± 1.9) mg/L, NAR 与前面持平。第 16 天, 提高进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度到 160 mg/L 左右, 在 16 ~ 22 d 每周期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解量约为 73.2 mg/L, NAR 仍未提高。在 23 ~ 26 d 调整曝气方式, 晚间 23:00—7:00 曝气量为 2 m³/h, 其余时间的曝气量

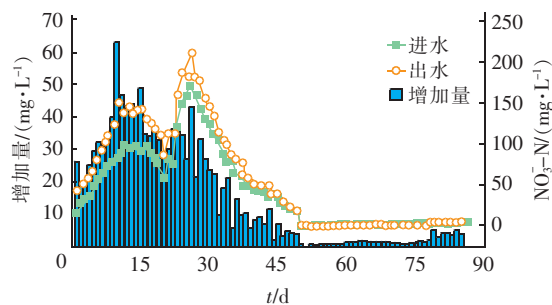
为 2.5 m³/h, 使整个反应周期反应器内的 DO 为 0.2 mg/L, 由于总曝气量减少, 每周期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解量减少到约 67 mg/L, NAR 从原来的 30% 提高到 44.4%。分析原因是晚上的水温低于白天, 而水体中的 DO 会随着温度的降低而升高, 因此晚间降低氧化沟内曝气量, 使 DO 维持较低水平有利于 AOB 的生长。



a. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 变化



b. $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 变化



c. $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 变化

图3 第二次运行过程中三氮浓度的变化

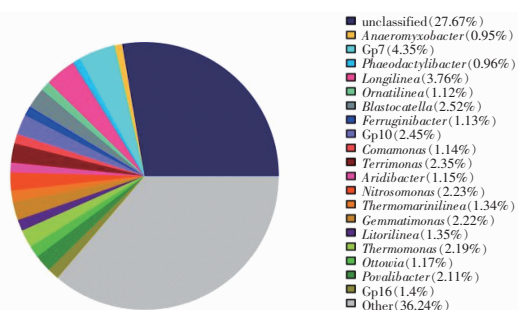
Fig. 3 Variation of nitrogen at the second-time operation

第 27 天, 为能快速实现短程硝化, 按 2.5 g/L 的量投加抑制剂 NaCl, 抑制剂的投加加快了 AOB 的富集, NAR 迅速提高到 70.4%, 认为短程硝化初步启动成功。在 27 ~ 34 d, 投加抑制剂后, 曝气量依然按照白天和晚间分开调控的措施, NAR 从 44.4% 增加到 67.8%。有研究者认为^[14], 在反应器内形

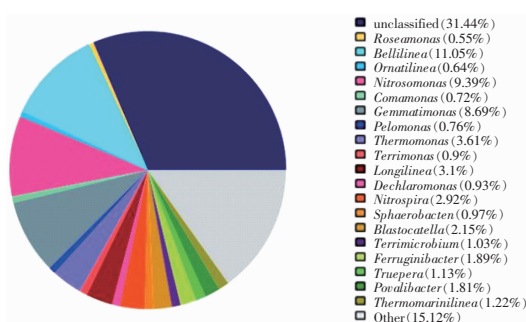
成好氧/缺氧的分区将有助于亚硝化菌的富集,因此在 35 ~ 41 d 调小氧化沟内局部的曝气量,使氧化沟各廊道形成 0.2、0.1 mg/L 的溶解氧分区,每周期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解量从 67 mg/L 减少到 61 mg/L, NAR 从 67.8% 提高到 83.5%,说明氧化沟内形成的溶解氧分区有助于提升短程硝化效果。由于曝气砂头长期浸泡损坏导致曝气不均匀,第 42 天对反应器中坏的或堵塞的曝气砂头进行更换,并在 42 ~ 49 d 将反应时长延长到 19 h, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解量增到 90.8 mg/L,每周期 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 增加量约为 5.5 mg/L,在此期间, NAR 稳定在 90% 以上,可认为在常低温情况下氧化沟中短程硝化启动成功。50 d 后氧化沟转为连续流运行。

2.2 短程硝化污泥中微生物种群分布

对第二次的接种污泥和启动成功的短程硝化污泥做 16S rRNA 基因文库高通量测序,所得 Pie Plot 分析结果如图 4 所示。



a. 接种污泥



b. 启动成功污泥

图 4 Pie Plot 统计结果

Fig. 4 Diagram of Pie Plot

如图 4(b) 所示,虽然高通量测序提供了丰富的微生物信息,但仍有 31.44% 的菌属无法归类。已鉴定的菌属中,占比前三的菌属分别是贝尔氏菌 (*Bellilinea*, 11.05%)、亚硝化单胞菌 (*Nitrosomonas*, 9.39%)、甲烷单毛菌 (*Gemmatimonas*, 8.69%)。

Bellilinea 和 *Gemmatimonas* 占比高的原因主要是采用限氧启动,反应器中长期处于低溶解氧状态,使一些厌氧菌增长繁殖。

Nitrosomonas 和 *Nitrospira* 均与硝化作用相关,其中 *Nitrosomonas* 为亚硝化菌, *Nitrospira* 为硝化菌^[15]。图 4(a) 中 *Nitrosomonas* 占比为 2.23%,而启动成功后其占比较接种污泥多 7.16%,在氧化沟装置中成功实现了亚硝化菌的富集。同时,启动成功后 *Nitrospira* 在系统中所占比例高达 2.92%,分析原因主要是启动过程的常低温环境为硝化菌提供了适宜的生长环境,较难将反应器中的硝化菌淘洗干净。

2.3 参数影响分析

2.3.1 HRT 的影响

第二次短程硝化启动成功之后,控制连续流状态下的进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度约为 70 mg/L,探讨 HRT 对短程硝化的影响。

在 60 ~ 69 d 控制进水流量为 560 ~ 620 L/h, HRT 为 9 ~ 10 h,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均降解量约为 33.09 mg/L, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 增加量为 25.37 mg/L,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 1.63 mg/L, NAR 为 91.8%。

当 HRT 为 11.2 ~ 12.7 h 时运行 8 d,进水流量减小为 440 ~ 500 L/h, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均降解量增加到 42.66 mg/L,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 23.25 mg/L,此阶段出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 略微减小到 1.16 mg/L,亚硝化效果得到改善, NAR 增加到 95.3%。分析原因可能是延长 HRT 后反应器中的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 增加,使得水中的游离亚硝酸 (FNA) 浓度提升,对 NOB 起到抑制作用。

继续增加 HRT 至 14.7 ~ 17 h,并运行 8 d,氨氮的平均降解量增加到 62.05 mg/L,出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 33.86 mg/L,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 增加到 4.06 mg/L, NAR 减小到 89.4%。分析原因可能是增加 HRT 使反应器中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的降解量增大,导致反应器中游离氨 (FA) 浓度降低,对 NOB 的抑制作用减轻,而氧化产生更多的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 NOB 提供了大量的底物,从而提高了氧化沟内 NOB 的活性。

由上可知,连续流状态下控制 HRT 可优化亚硝化效果。在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 70 mg/L 的情况下,控制 HRT 为 11.2 ~ 12.7 h 时亚硝化效果最好,亚硝化率大于 95%。

2.3.2 温度对短程硝化启动过程的影响

普遍认为,高温有利于 AOB 的积累和淘汰

NOB^[16,17],而实际操作过程中维持较高的温度将产生较高的运行费用,不利于工艺的推广。因此探讨了在高温(27.8~31.5℃)及常低温(13.8~27.1℃)下短程硝化的启动及运行情况,结果见图5。

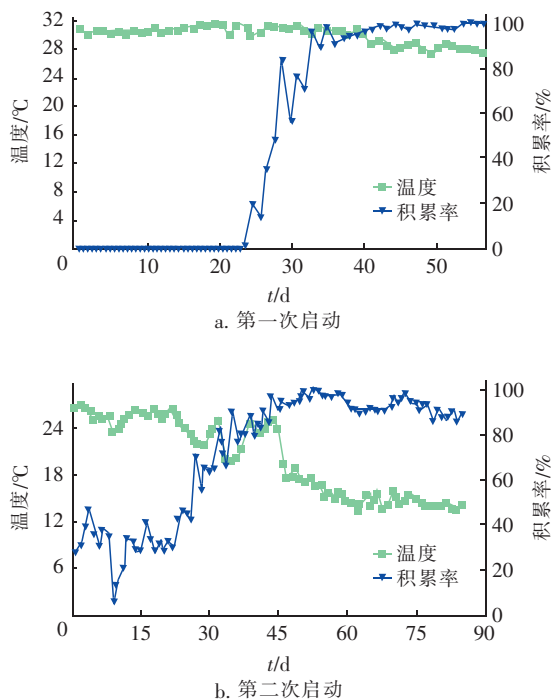


图5 温度与NAR的关系

Fig.5 Relational graph of temperature and NAR

由图5(a)可知,在高温下短程硝化启动时间将大大缩短,仅耗时28 d NAR即在50%以上,到第32天NAR>90%,之后NAR都维持在90%以上,短程硝化启动成功。

第二次启动过程中,虽然接种污泥有一部分为驯化成熟的短程硝化污泥,但仍耗时27 d才使NAR>50%。常低温不利于NOB的淘汰,通过调整曝气策略、延长曝气时长及投加抑制剂的方式,在第44天NAR>90%,短程硝化启动成功。常低温下短程硝化启动耗时较高温下多12 d,且亚硝化效果易受温度变化影响,如在第9天水温突降1.8℃,NAR从35.9%降为7.4%,分析原因为AOB受温度影响大于NOB,导致AOB活性大大降低。但当短程硝化启动成功之后,温度的突降对NAR的影响并不显著,这是由于对反应器中NOB的充分淘洗使AOB成为优势菌种。

分别对两次启动成功后的污泥进行单周期的三氮跟踪试验,第一次试验水温为30.3℃,第二次试

验水温为20.1℃,每个周期反应时长均为12 h。结果表明,在高温情况下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解了64.6 mg/L, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 增加了46.2 mg/L, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 增加了2.7 mg/L,NAR为94.5%,比氨氧化速率为0.037 kgN/(kgMLSS·d);而在常低温情况下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降解了52.9 mg/L, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 增加了40.2 mg/L, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 增加了4.5 mg/L,NAR为90%,比氨氧化速率为0.030 kgN/(kgMLSS·d),即高温下的NAR和比氨氧化速率均较大。

3 结论

① 在高温条件下,通过限氧控制及投加抑制剂的方式,经过32 d,在中试规模氧化沟中成功启动短程硝化,NAR稳定维持在90%以上。在常低温条件下,通过调整曝气方式及投加抑制剂,经过44 d完成了短程硝化的二次成功启动,实现了对亚硝化菌的富集。

② 合适的HRT有助于提高连续流状态下的亚硝化效果。在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 约为70 mg/L的情况下,控制HRT为11.2~12.7 h时亚硝化效果最佳,NAR大于95%。

③ 温度对短程硝化启动有显著影响。其一表现为在常低温启动过程中,温度突变容易引起NAR的变化;其二是常低温情况下启动短程硝化耗时较长;其三是高温情况下启动成功的污泥比氨氧化速率为0.037 kgN/(kgMLSS·d),高于常低温下的0.030 kgN/(kgMLSS·d)。

参考文献:

- [1] Fernandez I, Dosta J, Mata-Alvarez J. A critical review of future trends and perspectives for the implementation of partial nitrification/anammox in the main line of municipal WWTPs[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57:27890-27898.
- [2] Kallistova A Y, Dorofeev A G, Nikolaev Y A, et al. Role of anammox bacteria in removal of nitrogen compounds from wastewater[J]. Microbiology, 2016, 85(2):140-156.
- [3] 荣宏伟,邓杰,杨文杰,等. 低温对稳定短程硝化体系的影响[J]. 中国给水排水, 2015, 31(7):65-68.
- [4] 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,等. 连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制[J]. 环境科学, 2016, 37(4):1473-1476.
- [5] 于令芹,薛源,杨凤林,等. A/O短程硝化反硝化工艺

- 结合污泥厌氧水解处理低 C/N 比城市生活污水[J]. 环境工程,2010,28(1):32-36.
- [6] 张立秋,张朝升,张可方,等. SBBR 系统短程硝化处理低碳城市污水研究[J]. 中国给水排水,2012,28(7):12-15.
- [7] 李强,李军,李研,等. A/O-MBR 处理高氨氮废水的短程硝化研究[J]. 中国给水排水,2013,29(1):34-36.
- [8] Chuang H P, Ohashi A, Imachi H, *et al.* Effective partial nitrification to nitrite by down-flow hanging sponge reactor under limited oxygen condition [J]. Water Res, 2007,41(2):295-302.
- [9] Canziani R, Emondi V, Garavaglia M, *et al.* Effect of oxygen concentration on biological nitrification and microbial kinetics in a cross-flow membrane bioreactor (MBR) and moving-bed biofilm reactor (MBBR) treating old landfill leachate[J]. J Membr Sci, 2006,286(1/2):202-212.
- [10] 周德钧,周少奇,梅丹. 环境温度下短程硝化的低氧启动与维持[J]. 中国给水排水,2012,28(3):28-31.
- [11] 张昭,李冬,曾辉平,等. 常温下部分亚硝化的启动中试研究[J]. 中国给水排水,2012,28(17):21-25.
- [12] Cotteux E, Duchene P. Nitrification preservation in activated sludge during curative bulking chlorination [J]. Water Sci Technol, 2003,47(11):85-92.
- [13] 李梅,郑西来,李玲玲. 盐度对活性污泥驯化前后硝化特性的影响[J]. 环境工程学报,2007,1(10):108-111.
- [14] 易鹏,张树军,孟春霖,等. 城市污水连续流半亚硝化实现维持机理与工艺创新研究[J]. 环境科学学报, 2010,30(8):1608-1614.
- [15] 侯爱月,李军,卞伟,等. 不同短程硝化系统中微生物群落结构的对比分析[J]. 中国环境科学,2016,36(2):428-436.
- [16] 马娟,彭永臻,王丽,等. 温度对反硝化过程的影响以及 pH 值变化规律[J]. 中国环境科学,2008,28(11):1004-1008.
- [17] Bian W, Zhang S, Zhang Y, *et al.* Achieving nitrification in a continuous moving bed biofilm reactor at different temperatures through ratio control[J]. Bioresour Technol, 2017,226:73-79.



作者简介:李俊(1992-),男,福建龙岩人,硕士研究生,研究方向为水污染控制。

E-mail: lijun9210.ok@163.com

收稿日期:2017-05-14

防止水源枯竭和水体污染,
保证城乡居民饮用水安全