

曝停比对低温单级自养脱氮系统效能影响研究

韩 懿¹, 张建兵², 黄 巍³, 林子源³, 周 健³

(1. 天津城建大学 环境与市政工程学院, 天津 300384; 2. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051; 3. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 针对现有单级自养脱氮技术普遍需要中高温(25~35℃)运行条件、处理成本高的突出问题,以高浓度氨氮($\geq 2\,000\text{ mg/L}$)废水为研究对象,考察曝停比对低温(15℃)单级自养脱氮系统脱氮效能的影响。结果表明,曝停比对系统的脱氮效能有影响,在15℃、DO为2.5 mg/L条件下,反应器曝停比分别为2 h:2 h、4 h:4 h、6 h:6 h、12 h:12 h时,系统出水TN浓度分别为267.5、238.0、275.1、367.6 mg/L,去除率分别为86.6%、88.1%、86.2%和81.6%;曝停比为4 h:4 h时,系统对TN的去除率较高。反应器曝停时间越长,反应器内液相DO、ORP值越低,液相DO、ORP水平影响自养脱氮系统微环境区域分布比例。

关键词: 高氨氮废水; 单级自养脱氮; 曝停比; 低温

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0070-04

Effect of Aeration/Idle Time Ratio on Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System at Low Temperature

HAN Yi¹, ZHANG Jian-bing², HUANG Wei³, LIN Zi-yuan³, ZHOU Jian³

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China; 3. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The existing single-stage autotrophic nitrogen removal technology generally requires high temperature (25–35℃) operating conditions and high costs of treatment. Using high ammonia nitrogen wastewater ($\geq 2\,000\text{ mg/L}$), influence of aeration/idle time ratio on the single-stage autotrophic nitrogen removal system was investigated and confirmed. Under the temperature of 15℃ and DO of 2.5 mg/L, when the time ratios were 2 h:2 h, 4 h:4 h, 6 h:6 h and 12 h:12 h, the effluent concentrations of TN were 267.5 mg/L, 238.0 mg/L, 275.1 mg/L and 367.6 mg/L, and removal rates were 86.6%, 88.1%, 86.2% and 81.6%, respectively. When the time ratio was 4 h:4 h, the TN removal rate was the highest. The longer the idling, the lower the DO and the ORP in the liquid phase, which subsequently affected the microenvironment distribution ratio of the autotrophic nitrogen removal system.

Key words: high ammonia nitrogen wastewater; single-stage autotrophic nitrogen removal; aeration/idle time ratio; low temperature

单级自养脱氮工艺是将短程硝化和厌氧氨氧化整合在一个反应器内,通过控制反应器内的溶解氧水平,营造适合亚硝化细菌(AOB)和厌氧氨氧化细菌(AnAOB)共存的微环境,实现AOB和AnAOB协同生长^[1]。与两级自养脱氮系统相比,无需设置专门的硝化反应器,具有流程简单、高效、投资运行成本低等优点。

采用限制性供氧策略是单级自养脱氮工艺的重要特点之一,反应器内DO浓度水平是单级自养脱氮工艺顺利进行的关键控制条件,它不仅关系着能否顺利淘汰亚硝酸盐氧化菌(NO_B),也决定了系统生物膜内部能否形成良好的好氧-厌氧微环境,确保亚硝化和厌氧氨氧化耦合反应得以顺利进行。曝气方式是控制反应器内DO的关键运行参数,在需要好氧-缺氧-厌氧微环境共存的废水生物处理工艺中尤为重要。由于单级自养脱氮系统需要实现好氧AOB、厌氧AnAOB的共存生长,因此,在反应器内营造好氧-缺氧-厌氧共存的微环境非常关键,曝气方式的选择就显得尤为重要。采用间歇曝气的方式更有助于反应器内形成厌氧-好氧共存的微环境,因此开展间歇曝气方式对单级自养脱氮系统脱氮效能影响的研究是非常必要的。

同时,温度不仅决定能否淘汰NO_B以阻滞全程硝化反应的发生,也会影响亚硝化反应和厌氧氨氧化反应的速率以及系统的脱氮性能。目前大多研究者在20~35℃的温度范围内构建反应器并开展研究。在该温度范围内,AOB和AnAOB的最佳温度相近,AOB比NO_B生长迅速,并且能刺激AnAOB的生长^[2]。而低温(10~20℃)条件下单级自养脱氮工艺效能研究的相关报道较少。

Chang等人^[3]在20℃条件下,采用上流式生物滤池反应器,在进水NH₄⁺-N浓度为400 mg/L时,对TN的去除率达到了70%。Hendrickx等人^[4]通过接种厌氧氨氧化颗粒污泥并在20℃条件下驯化253 d,在系统进水NH₄⁺/NO₂⁻值约为1的条件下实现了低温自养脱氮,TN去除负荷为0.3 kgN/(m³·d)。上述研究均未涉及运行工况对低温单级自养脱氮系统的具体影响,且未能实现低温条件下的高效脱氮。

鉴于此,笔者针对现有单级自养脱氮技术普遍需要中高温(25~35℃)运行条件、处理成本高的突出问题,以研发低碳源高浓度氨氮(≥2 000 mg/L)

废水低温(15℃)单级自养脱氮技术为目标,采用序批式生物膜反应器(SBBR),在前期高氨氮废水单级自养脱氮系统构建研究的基础上^[5],重点考察低温(15℃)条件下曝停比对单级自养脱氮系统效能的影响,以及对系统液相溶解氧、氧化还原电位(ORP)的影响,旨在为单级自养脱氮技术的拓展应用提供支持。

1 试验材料及方法

1.1 原水水质

试验采用人工配制氨氮废水,通过向自来水中投加适量NH₄HCO₃配制而成,同时考虑到微生物生长代谢需要,向配水中加入适量常量元素和微量元素,废水中氨氮浓度为(2 000±20) mg/L。

1.2 试验装置

试验装置如图1所示。SBBR反应器由时控开关、调压器、空气泵、微孔曝气砂头组成,反应器高为50 cm、内径为20 cm、有效容积为10 L,内设组合填料,挂膜密度为50%,通过恒温生化培养箱保持反应器温度恒定。

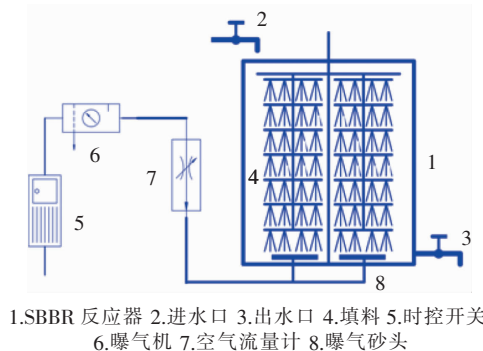


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

1.3 试验方法

通过平行对比试验,考察曝停比对单级自养脱氮系统脱氮效能的影响。采用前期构建(15℃)并稳定运行的单级自养脱氮微生物系统反应器,控制曝停比分别为2 h:2 h、4 h:4 h、6 h:6 h、12 h:12 h(分别记为1[#]~4[#]反应器),反应器运行周期为24 h,周期运行工况:瞬间进水-反应24 h(按不同曝停比间歇曝气)-瞬间排水,排水比为1/8,NH₄⁺-N容积负荷为0.25 kgN/(m³·d),将反应器温度控制在(15±1)℃。试验期间每周测定NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN、pH值等指标,并对不同曝停比条件下系统的DO、ORP进行测试。

2 结果与分析

不同曝停比对反应器出水氮化合物及总氮去除率的影响见图2。当进水氮负荷为 $0.25 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,4种间歇曝气工况均可稳定运行,并且脱氮效果良好,反应器在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $(2\,000 \pm 20) \text{ mg/L}$ 、温度为 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、DO为 2.5 mg/L ,曝停比分别为 $2 \text{ h} : 2 \text{ h}$ 、 $4 \text{ h} : 4 \text{ h}$ 、 $6 \text{ h} : 6 \text{ h}$ 、 $12 \text{ h} : 12 \text{ h}$ 的条件下,SBBR低温单级自养脱氮系统对TN的去

除率分别为 86.6% 、 88.1% 、 86.2% 、 81.6% ,反应器出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均为前期略有波动、后期逐渐趋于稳定,变化趋势基本相同;出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度均保持在 3.0 mg/L 以下;出水TN平均浓度分别为 267.5 、 238.0 、 275.1 、 367.6 mg/L 。随着曝停时间从 $2 \text{ h} : 2 \text{ h}$ 增长到 $12 \text{ h} : 12 \text{ h}$,系统脱氮效果呈先升高后降低趋势,当曝停比为 $4 \text{ h} : 4 \text{ h}$ 时系统脱氮效果最好。

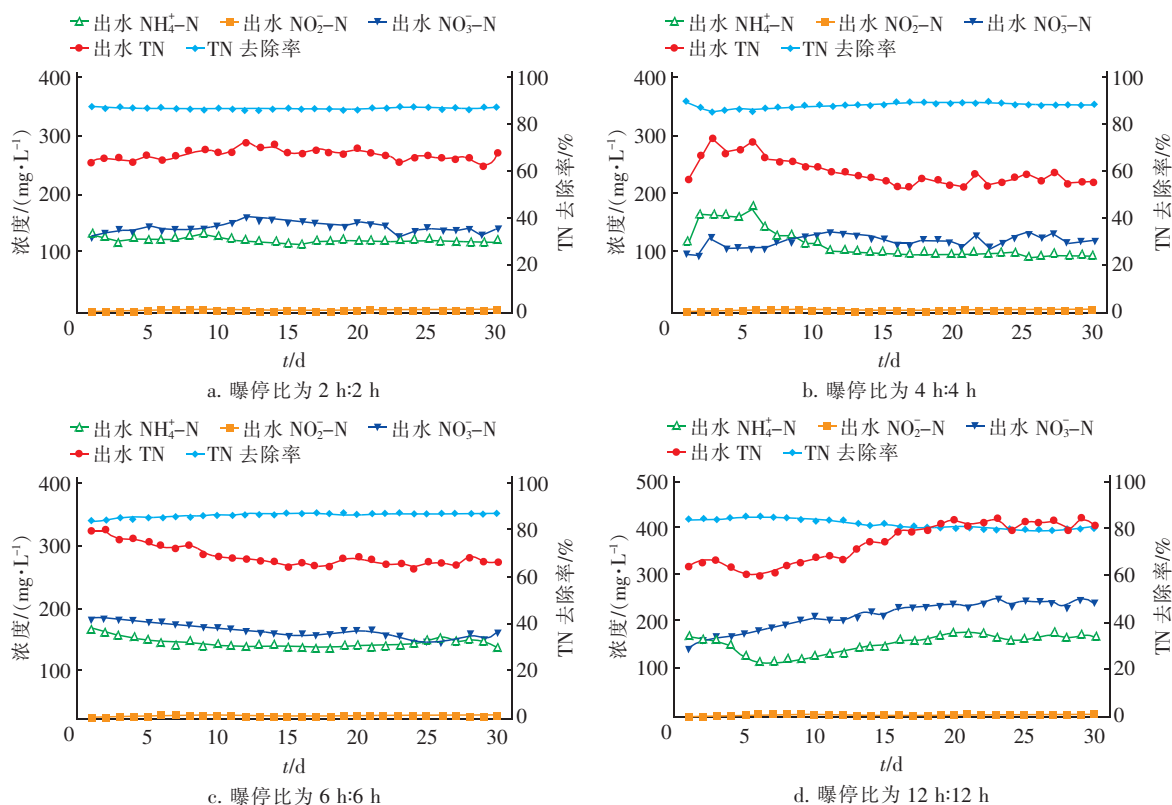


图2 不同曝停比条件下反应器出水氮化合物浓度及TN去除率的逐日变化

Fig. 2 Daily variation of effluent nitrogen compounds concentration and TN removal rate with different aeration/idle time ratios

分析认为:一方面,氧在生物膜内部的传递需要时间,当曝、停时间较长时,在较长的曝气过程中氧在系统生物膜内部的传递较好,系统生物膜内部DO浓度较均匀,不利于生物膜内部好氧-厌氧微环境的形成;且随着曝气时间的增长,连续曝气时间过长,导致NOB活性得到了一定恢复,将亚硝化产物 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 进一步氧化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度升高。同时,在较长的停曝过程中,AnAOB将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和在曝气阶段产生的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 转化为 N_2 ,随着停曝时间的增加,可利用的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度不断下降,在停曝的后半程,可利用的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度过低,从而限制了厌氧氨氧化反应。而当曝、停时间间

隔较短时,溶解氧难以被充分消耗,进而影响生物膜内部厌氧微环境的形成,系统内生物膜长时间保持好氧状态,NOB的活性也得到了一定的恢复,将亚硝化产物 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 进一步氧化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。在曝、停间隔时间相对适宜的 $4 \text{ h} : 4 \text{ h}$ 条件下,更有利于反应器内好氧-厌氧微环境的形成及亚硝化和厌氧氨氧化过程的进行,因此脱氮效果更好。

反应器采用的半软性组合填料形成的生物膜厚实,易于在生物膜内形成DO梯度。对不同曝停比条件下系统液相DO、ORP进行研究,发现在4种间歇曝气工况下反应周期内均出现了DO、ORP的波动。曝气阶段反应器内液相DO浓度基本维持在

2.5 ~ 2.7 mg/L;停曝阶段,停曝时间越长则反应器内液相 DO 浓度相对越低,ORP 呈现了与 DO 基本相同的变化趋势(见表 1)。分析认为,生物膜外层的 AOB,在停曝阶段同样消耗 DO 以氧化反应器内的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,因而停曝时间越长,系统内的 DO 浓度越低,但在停曝的后半程,可利用的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度过低,从而限制了厌氧氨氧化反应。而在停曝时间较短时,反应器内 DO 水平始终处于较高水平,AOB

无法将液相 DO 消耗至较低水平,虽然在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 DO 充足的条件下 AOB 同样能健康生长并获得较好的亚硝化效果,但在曝气阶段和停曝阶段液相 DO 浓度均相对较高,可能对生物膜内部的厌氧氨氧化细菌产生一定程度的抑制,另外高 DO 条件下还存在 NOB 与 AnAOB 竞争亚硝化产物 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的可能性,因此该工况条件下出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度相对较高。

表 1 曝停比对反应周期内 DO、ORP 的影响

Tab. 1 Effect of aeration/idle time ratio on DO and ORP during a reaction period

项 目	间歇曝气工况			
	2 h : 2 h	4 h : 4 h	6 h : 6 h	12 h : 12 h
曝气阶段稳定期液相 DO/(mg · L ⁻¹)	2.5 ~ 2.7	2.5 ~ 2.7	2.5 ~ 2.7	2.5 ~ 2.7
停曝阶段稳定期液相 DO/(mg · L ⁻¹)	0.3 ~ 0.5	0.1 ~ 0.2	0.1 ~ 0.2	0 ~ 0.1
曝气阶段稳定期液相 ORP/mV	-90 ~ -70	-90 ~ -70	-90 ~ -70	-90 ~ -70
停曝阶段稳定期液相 ORP/mV	-130 ~ -110	-150 ~ -130	-160 ~ -140	-180 ~ -160

3 结 论

① 曝停比对低温单级自养脱氮系统效能有影响。在温度为(15 ± 1) °C、DO 为 2.5 mg/L 时,曝停比分别为 2 h : 2 h、4 h : 4 h、6 h : 6 h、12 h : 12 h 的条件下,SBBR 低温单级自养脱氮系统对 TN 的去除率分别为 86.6%、88.1%、86.2%、81.6%。

② 不同曝停比条件下,系统停曝时间越长,反应器内液相 DO 浓度相对越低,而在停曝时间较短时,反应器 DO 浓度始终处于较高水平,AOB 无法将液相 DO 消耗至较低水平;ORP 呈现了与 DO 相同的变化趋势。

参考文献:

[1] Qiao S, Tian T, Duan X, *et al.* Novel single-stage autotrophic nitrogen removal via co-immobilizing partial nitrifying and anammox biomass[J]. Chem Eng J, 2013, 230 (16): 19 - 26.

[2] Gao D W, Huang X L, Tao Y, *et al.* Sewage treatment by an UAFB-EGSB biosystem with energy recovery and autotrophic nitrogen removal under different temperatures[J]. Bioresour Technol, 2015, 181: 26 - 31.

[3] Chang X, Li D, Liang Y, *et al.* Performance of a completely autotrophic nitrogen removal over nitrite process for treating wastewater with different substrates at ambient

temperature[J]. J Environ Sci, 2013, 25(4): 688 - 697.

[4] Hendrickx T L G, Wang Y, Kampman C, *et al.* Autotrophic nitrogen removal from low strength waste water at low temperature[J]. Water Res, 2012, 46(7): 2187 - 2193.

[5] Zhang J, Zhou J, Han Y, *et al.* Start-up and bacterial communities of single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitrification (SNAP) for treatment of high strength ammonia wastewater [J]. Bioresour Technol, 2014, 169(5): 652 - 657.



作者简介:韩懿(1987 -), 女, 天津人, 博士, 讲师, 研究方向为水污染控制与技术、给排水工程设计。
E - mail: hanyi1127@ 126. com
收稿日期: 2018 - 01 - 12