

污水短程硝化影响因素的对比分析

付昆明, 廖敏辉, 任 奕, 杨宗玥, 仇付国, 姜 珊
(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷污水处理技术
研发中心, 北京 100044)

摘 要: 短程硝化的实现与维持, 将会推动基于短程硝化发展起来的工艺得以工程化应用。对不同研究者就此不一致的结论进行了阐述, 并对各影响因素促进短程硝化的可行性进行了对比分析。要实现短程硝化, 同时控制中温条件、游离氨、污泥龄是最容易的, 其次是同时控制中温条件和污泥龄, 另外还可同时控制中温条件和游离氨或溶解氧在生物膜污泥中实现短程硝化。常温条件下, 仅仅依靠较低的溶解氧浓度无法维持短程硝化的稳定, 必须配合其他因素的控制。各因素按可行性的高低及稳定性的好坏综合排序依次分别为中温条件、游离氨、污泥龄、溶解氧、间歇曝气、游离亚硝酸、pH 值。

关键词: 短程硝化; 厌氧氨氧化; 亚硝酸菌; 硝酸菌; 游离氨; 游离亚硝酸

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)04-0024-06

Comparative Analysis of Factors Influencing Short-cut Nitrification in Wastewater Treatment

FU Kun-ming, LIAO Min-hui, REN Yi, YANG Zong-yue, QIU Fu-guo, JIANG Shan
(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment < Ministry of Education >, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: To achieve and maintain the short-cut nitrification will promote the process which based on the short-cut nitrification to project application. This paper elaborated on the inconsistent conclusions regarding the short-cut nitrification among different researchers, and made a comparative analysis on the feasibility of various factors promoting the short-cut nitrification. To achieve short-cut nitrification, measures such as controlling the medium temperature condition, free ammonia, sludge retention time simultaneously were the easiest way, followed by controlling the medium temperature condition and sludge retention time simultaneously. In addition, controlling the medium temperature condition and free ammonia or dissolved oxygen simultaneously could achieve short-cut nitrification in the biofilm sludge. Under the normal temperature conditions, the stability of short-cut nitrification could not be maintained if it only relied on the lower dissolved oxygen. Therefore, the lower dissolved oxygen must be coordinated with other factors to ensure short-cut nitrification. The comprehensive sequence were followed by the medium temperature condition, free ammonia, sludge retention time, dissolved oxygen, intermittent

aeration, free nitrous acid, pH according to the feasibility and the stability of the various factors.

Key words: short-cut nitrification; anammox; ammonia oxidizes bacteria; nitrite oxidizing bacteria; free ammonia; free nitrous acid

近些年来,水体富营养化程度加剧,污水中的氮含量超标是造成水体富营养化的主要原因之一。对于氮的去除,通常采用传统的硝化反硝化工艺进行处理,但该工艺往往面临碳源不足的问题。为了解决这一问题,短程硝化应运而生。所谓短程硝化,是指将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化至 $\text{NO}_2^- - \text{N}$, 而不继续氧化至 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的过程,该过程是通过改变工艺参数以抑制硝酸菌(NO₃)的活性,维持亚硝酸菌(AOB)的优势地位。相较传统的硝化反硝化工艺,短程硝化反硝化工艺具有节省25%曝气能耗、40%碳源需求的优点。

厌氧氨氧化(ANAMMOX)工艺的兴起,使得短程硝化的重要性更加突出:ANAMMOX反应以短程硝化的终产物 NO_2^- 为电子受体(而不是 NO_3^-),在无氧条件下将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 直接氧化为 N_2 ,具有无需有机碳源、节省曝气量和剩余污泥少等优点^[1]。因此,将短程硝化和ANAMMOX两种反应结合起来更具可持续性,目前有许多以此机理为基础的脱氮工艺,例如两段式的短程硝化-厌氧氨氧化工艺^[2]、一段式的全程自养脱氮工艺^[3]等。

短程硝化的实现与维持是应用上述工艺的先决条件,但受诸多因素的影响,例如游离氨、游离亚硝酸、溶解氧、间歇曝气、污泥龄、温度、pH值等。不同研究者对此进行了大量的研究,所得结论往往存在不一致的地方,甚至有时候是相互矛盾的。在综合不同短程硝化影响因素研究的基础上,对各个不一致的结论进行了阐述,对各影响因素促进短程硝化的可行性进行了对比分析,以期找到一条可行性高且稳定性好的短程硝化之路。

1 影响因素

1.1 游离氨

一定浓度的游离氨(Free Ammonia, FA)对AOB和NOB均存在抑制作用,NOB对FA的抑制更为敏感,其在FA浓度很低时就会被抑制,而FA对AOB的抑制在FA浓度较高时才会显现^[4-5]。因此,可以根据这两种细菌对不同浓度FA的敏感性来实现短程硝化。尽管利用FA进行AOB和NOB的选择性抑制已经有了广泛研究,但是不同研究者就FA

对这两种细菌产生抑制作用的浓度阈值存在较大的分歧。例如,在AOB方面,最受研究者关注的是1976年Anthonisen等^[4]的结论,其研究表明抑制AOB的FA浓度为10~150 mg/L,Wei等^[6]的研究表明FA浓度达到 (86.3 ± 3.29) mg/L时AOB受到部分抑制。在NOB方面,仍然是1976年Anthonisen等^[4]的结论最为经典,其研究表明抑制NOB的FA浓度为0.1~1.0 mg/L,Mauret等^[7]的研究结果相对较高,为6.6~8.9 mg/L,Pambrun等^[8]将FA浓度提高至11 mg/L时NOB的活性减少了一半。

1.2 游离亚硝酸

与FA对AOB和NOB的影响类似,游离亚硝酸(FNA)对AOB和NOB也有类似的影响。NOB对FNA的敏感性较AOB强,且FNA浓度越高,FNA对NOB的抑制越强。不同研究者就FNA抑制NOB的浓度阈值也不相同,例如,Anthonisen等^[4]的研究表明抑制NOB的FNA浓度为0.22~2.80 mg/L, Pedrouso等^[9]在FNA浓度为0.02 mg/L时将以*Nitrospira*为主的NOB种群成功淘洗出反应器。张宇坤等^[10]的研究表明,当FNA浓度 ≥ 0.03 mg/L后,NOB的活性随之降低;当FNA浓度 ≥ 0.2 mg/L时,NOB失活。Wang等^[11]的研究表明,当FNA浓度达到1.35 mg/L时,AOB的活性仍为对照组的50%,而NOB在FNA浓度为0.24 mg/L时基本失活。Ma等^[12]的研究表明,FNA浓度由0.12 mg/L升至0.87 mg/L,AOB的活性由对照组的117%降至64%,而NOB的活性由对照组的96%降至10%。

1.3 DO

不同DO条件下AOB和NOB的新陈代谢速率存在较大的差异,AOB的氧亲和力较NOB高,NOB在较低DO条件下竞争氧的能力较弱。Poot等^[13]在以颗粒污泥的形式实现短程硝化时发现,随着DO浓度从颗粒污泥表面到颗粒污泥中心逐渐降低,AOB主要分布在颗粒污泥表面,而NOB更加靠近颗粒污泥中心。Wang等^[14]在DO浓度从1.4 mg/L降至0.7 mg/L时,观察到 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率逐渐升高。比利时Gent大学开发的OLAND(Oxygen Limited Autotrophic Nitrification Denification)工艺即

是通过严格控制反应器内的 DO 实现稳定的短程硝化,但目前该工艺仍处于研究阶段^[15]。

1.4 间歇曝气

溶解氧的控制一般通过曝气来实现,NOB 从缺氧环境中恢复的延迟时间较 AOB 长,因此可利用这一差别适当地控制有无曝气的时长,使得好氧环境的持续时间小于 NOB 从缺氧环境中恢复所需要的时间,即通过间歇的好氧和缺氧扰动以抑制 NOB 的活性,而对 AOB 的影响较小^[16-17]。例如,Ge 等^[18]利用氮素的氧化曲线斜率绝对值表征 AOB 和 NOB 的活性,间歇曝气时的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化曲线斜率绝对值分别为 1.26 和 1.33,高于持续曝气时的 1.01,且间歇曝气时的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 氧化曲线斜率绝对值分别为 0.31 和 0.30,低于持续曝气时的 0.37,表明间歇曝气时 AOB 的活性较持续曝气时高,而间歇曝气时 NOB 的活性较持续曝气时低。Yang 等^[19]的研究表明,45 min 曝气 + 15 min 无曝气的间歇曝气方式下,AOB 的活性为 $(3.95 \pm 0.7) \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,而 NOB 的活性仅为 $(0.83 \pm 0.32) \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。Li 等^[20]的研究表明,采用间歇曝气的方法启动短程硝化 SBR 反应器时,亚硝酸率高于 87%。付昆明等^[21]研究发现,在温度为 30 ℃、DO < 0.5 mg/L、FA > 1.5 mg/L 的诸多有利条件下,生物膜系统的短程硝化恢复不易实现,但间歇曝气是一个有效的方法。

1.5 污泥龄

在 20 ~ 35 ℃ 条件下,AOB 的生长速率较 NOB 高,通过控制系统污泥龄大于 AOB 的世代时间而小于 NOB 的世代时间,实现 NOB 的“自然淘洗”,使 AOB 保持较高的浓度,实现 NO_2^- 的稳定积累^[22]。不同研究者取得较为稳定的短程硝化所采用的 SRT 不同。例如,新加坡樟宜回用水处理厂已实现短程硝化的好氧区(28 ~ 32 ℃)所采用的 SRT 为 2.5 d^[23],而 Wu 等^[24]认为 SRT 为 10 ~ 20 d 较为合适。

1.6 温度

较高的温度不仅可以促进 AOB 的活性和生长速率,也可进一步扩大 AOB、NOB 两者活性和生长速率的差异,而且可利用这一差异来维持较为稳定的短程硝化。荷兰 Delft 技术大学开发的 SHARON (Single Reactor for High Ammonium Removal Over Nitrite) 工艺即是基于这一原理在中温(30 ~ 40 ℃)条件下实现了稳定的短程硝化,且该工艺已得到工程化应用^[25]。

1.7 pH 值

AOB 和 NOB 适宜生长的 pH 范围不同,不同 pH 条件下两者的活性不一致。例如,Cho 等^[26]将 pH 值从 7 调至 8 时,亚硝化反应速率提高了两倍多, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率随之升高。Tao 等^[27]的研究表明 pH 值从 8.11 降至 7.59 时,亚硝化速率下降了 22%,pH 值为 8.11 时的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率较 pH 值为 7.59 时高。

2 不同因素的对比分析

FA 和 FNA 的计算公式如下:

$$\text{FA} = \frac{17}{14} \times \frac{\text{NH}_4^+ - \text{N} \times 10^{\text{pH}}}{e^{\frac{6344}{273+T}} + 10^{\text{pH}}} \quad (1)$$

$$\text{FNA} = \frac{47}{14} \times \frac{\text{NO}_2^- - \text{N}}{e^{\frac{-2300}{273+T}} \times 10^{\text{pH}}} \quad (2)$$

式中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ——污水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度,mg/L
T——反应温度,℃

$\text{NO}_2^- - \text{N}$ ——污水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度,mg/L

由式(1)、(2)可以看出^[4],FA 和 FNA 浓度受 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度、温度、pH 值的影响。除进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度外,温度对于污水厂来说一般无法控制,pH 值的控制可直接通过投加一定量的碱性或酸性物质来实现。例如,Wei 等^[28]通过控制 pH 值促使 FA 浓度升高时, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度由 0.58 mg/L 升高至 17.86 mg/L,而出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 由 106.9 mg/L 降低至 36.88 mg/L。

污水厂的水温一般为 5 ~ 20 ℃,硝化过程在消耗碱度的同时伴随着 pH 值的降低,FA 浓度随之进一步降低。因此,通过控制 FA 浓度实现短程硝化,将面临 FA 浓度波动导致 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率波动的结果。事实上,FNA 浓度随硝化过程 pH 值的降低而升高,Pedrouso 等^[9]由此认为,通过控制 FNA 浓度实现短程硝化比通过控制 FA 浓度更合适。然而,污水厂的进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度一般较低,往往导致主流工艺生物反应器内 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累浓度难以达到通过 FNA 抑制 NOB 所需要的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累浓度。因此,Wang 等^[29-30]提出可利用厌氧消化池的出水富集一定浓度的 FA 或 FNA,通过 FA 或 FNA 侧流处理二沉池的污泥,处理后的污泥回流至主流工艺生物反应器内,以抑制生物反应器内 NOB 的活性。

然而,NOB 对 FA 和 FNA 均具有一定的适应能力。Ma 等^[12]在不同 FNA 浓度下研究 NOB 对 FNA

抑制的适应情况,污泥取自长期处理 FNA 后的 A/O 装置,结果表明 NOB 能适应 FNA,主要的 NOB 种群由 *Nitrospira* 转为 *Candidatus Nitrotoga*。

NOB 的抑制策略也与微生物菌群有关。Tangkitjawisut 等^[31]研究表明,*Nitrospira* 的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 半饱和常数为 0.71 ~ 0.98 mg/L,而 *Nitrobacter* 的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 半饱和常数为 8.36 ~ 12.20 mg/L。

短期内较低的溶解氧有利于维持较为稳定的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累,但长期的低溶解氧环境也会给短程硝化带来不良的影响。例如,Liu 等^[32]的研究表明,较低的溶解氧会抑制硝化细菌的内源性衰变,进而造成 NOB 的富集,使得 AOB 在低溶解氧条件下的相对优势减弱。研究^[33-34]表明,低溶解氧条件下丝状细菌会增殖扩散,导致活性污泥的沉降性能变差。

由此可见,众多研究者尽管做了大量关于短程硝化的研究,但仍没有就一个切实可行的 NOB 抑制策略达成共识。到目前为止许多问题没有得到进一步明确,例如 NOB 对 FA 和 FNA 的适应性、不同进水氨氮条件下 NOB 的菌群变化、长期低溶解氧环境带来的不良影响,其中前两者可以被用来解释不同研究者关于 FA、FNA、SRT 所得结论不同的原因。

就一条可行性高且稳定性好的短程硝化之路而言:①通过同时控制中温条件、FA、SRT 实现短程硝化是最容易的,其次是同时控制中温条件和 SRT,这两种方法已经得到了工程化应用,另外还可通过同时控制中温条件和 FA 或 DO 在生物膜污泥中实现短程硝化;②常温条件下,仅仅依靠较低的 DO 无法维持短程硝化的稳定,必须配合其他因素的控制,例如 SRT、pH;③AOB 较 NOB 更耐“折腾”,间歇曝气有利于短程硝化的实现;④ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低时,FNA 浓度往往难以达到抑制 NOB 所要求的浓度,因此可考虑将侧流工艺与主流工艺相结合,以实现通过 FNA 的控制达到短程硝化的目的,但该方法增加了工艺的复杂性。综上所述,各因素按可行性的高低及稳定性的好坏综合排序依次分别为中温条件、FA、SRT、DO、间歇曝气、FNA、pH 值。

3 结语

① 通过同时控制中温条件、FA、SRT 实现短程硝化是最容易的,其次是同时控制中温条件和 SRT,这两种方法已经得到了工程化应用,另外还可通过同时控制中温条件和 FA 或 DO 在生物膜污泥中实现短程硝化。

② 常温条件下,仅仅依靠较低的 DO 无法维持短程硝化的稳定,必须配合其他因素的控制。

③ AOB 较 NOB 更耐“折腾”,间歇曝气有利于短程硝化的实现。

④ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较低时,FNA 浓度往往难以达到抑制 NOB 所要求的浓度,因此可考虑将侧流工艺与主流工艺相结合,以实现通过 FNA 的控制达到短程硝化的目的,但该方法增加了工艺的复杂性。

⑤ 各因素按可行性的高低及稳定性的好坏综合排序依次分别为中温条件、FA、SRT、DO、间歇曝气、FNA、pH 值。

参考文献:

- [1] 付昆明,仇付国,左早荣. 厌氧氨氧化技术应用于市政污水处理的前景分析[J]. 中国给水排水,2015,31(4):8-13.
Fu Kunming, Qiu Fuguo, Zuo Zaorong. Prospective analysis of application of anaerobic ammonia oxidation technology to municipal wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(4):8-13 (in Chinese).
- [2] Cao Y, van Loosdrecht M C, Daigger G T. Mainstream partial nitrification - anammox in municipal wastewater treatment: Status, bottlenecks, and further studies [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2017, 101(4):1365-1383.
- [3] 左早荣,付昆明,仇付国,等. CANON 工艺的研究现状及面临困难分析[J]. 水处理技术,2013,39(9):15-19.
Zuo Zaorong, Fu Kunming, Qiu Fuguo, et al. Analysis of the research status and difficulties of CANON process [J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39(9):15-19 (in Chinese).
- [4] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B, et al. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid [J]. Water Pollut Control Federation, 1976, 48(5):835-852.
- [5] 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(9):85-98.
- [6] Wei D, Xue X, Yan L, et al. Effect of influent ammonium concentration on the shift of full nitrification to partial nitrification in a sequencing batch reactor at ambient temperature [J]. Chem Eng J, 2014, 235(1):19-26.
- [7] Mauret M, Paul E, Puech-Costes E, et al. Application of

- experimental research methodology to the study of nitrification in mixed culture [J]. *Water Sci Technol*, 1996, 34(1/2): 245–252.
- [8] Pambrun V, Paul E, Spérandio M. Modeling the partial nitrification in sequencing batch reactor for biomass adapted to high ammonia concentrations [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2006, 95(1): 120–131.
- [9] Pedrouso A, Rfo A V D, Morales N, *et al.* Nitrite oxidizing bacteria suppression based on in-situ free nitrous acid production at mainstream conditions [J]. *Sep Purif Technol*, 2017, 186: 55–62.
- [10] 张宇坤, 王淑莹, 董怡君, 等. 游离氨和游离亚硝酸对亚硝态氮氧化菌活性的影响 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1242–1247.
- Zhang Yukun, Wang Shuying, Dong Yijun, *et al.* Effect of FA and FNA on activity of nitrite-oxidising bacteria [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(5): 1242–1247 (in Chinese).
- [11] Wang Q, Ye L, Jiang G, *et al.* Side-stream sludge treatment using free nitrous acid selectively eliminates nitrite oxidizing bacteria and achieves the nitrite pathway [J]. *Water Res*, 2014, 55(10): 245–255.
- [12] Ma B, Yang L, Wang Q, *et al.* Inactivation and adaptation of ammonia-oxidizing bacteria and nitrite-oxidizing bacteria when exposed to free nitrous acid [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 245: 1266–1270.
- [13] Poot V, Hoekstra M, Geleijnse M A, *et al.* Effects of the residual ammonium concentration on NOB repression during partial nitrification with granular sludge [J]. *Water Res*, 2016, 106: 518–530.
- [14] Wang J, Yang N. Partial nitrification under limited dissolved oxygen conditions [J]. *Process Biochem*, 2004, 39(10): 1223–1229.
- [15] 叶建锋, 徐祖信, 薄国柱. 新型生物脱氮工艺——OLAND 工艺 [J]. *中国给水排水*, 2006, 22(4): 6–8.
- Ye Jianfeng, Xu Zuxin, Bo Guozhu. New type biological denitrification process—OLAND process [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(4): 6–8 (in Chinese).
- [16] Kornaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(19): 7245–7253.
- [17] Tappe W, Laverman A, Bohland M, *et al.* Maintenance energy demand and starvation recovery dynamics of *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter winogradskyi* cultivated in a retentostat with complete biomass retention [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1999, 65(6): 2471–2477.
- [18] Ge S, Peng Y, Qiu S, *et al.* Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process [J]. *Water Res*, 2014, 55: 95–105.
- [19] Yang J, Trela J, Zubrowska-Sudol M, *et al.* Intermittent aeration in one-stage partial nitrification/anammox process [J]. *Ecol Eng*, 2015, 75: 413–420.
- [20] Li H, Zhou S, Huang G, *et al.* Partial nitrification of landfill leachate with varying influent composition under intermittent aeration conditions [J]. *Process Saf Environ Prot*, 2013, 91(4): 285–294.
- [21] 付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 等. 生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程 [J]. *环境科学*, 2017, 38(4): 1536–1543.
- Fu Kunming, Zhou Houtian, Su Xueying, *et al.* Short-cut nitrification recovery and its transformation into CANON process in a biofilm reactor [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4): 1536–1543 (in Chinese).
- [22] 袁林江, 彭党聪, 王志盈. 短程硝化—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. Biological nitrogen removal by shortcut nitrification—denitrification [J]. *China Water & Wastewater*, 2000, 16(2): 29–31 (in Chinese).
- [23] Cao Yesi, Kwok Bee Hong, Yan Zhou, 等. 新加坡最大回用水处理厂污水短程硝化厌氧氨氧化脱氮工艺 [J]. *北京工业大学学报*, 2015(10): 1441–1454.
- Cao Yesi, Kwok Bee Hong, Yan Zhou, *et al.* Mainstream partial nitrification/anammox nitrogen removal process in the largest water reclamation plant in Singapore [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015(10): 1441–1454 (in Chinese).
- [24] Wu C, Peng Y, Wang S, *et al.* Effect of sludge retention time on nitrite accumulation in real-time control biological nitrogen removal sequencing batch reactor [J]. *Chin J Chem Eng*, 2011, 19(3): 512–517.
- [25] 郝晓地. 可持续污水—废物处理技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- Hao Xiaodi. Sustainable Treatment Technologies of Wastewater—Wastes [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2006 (in Chinese).
- [26] Cho K H, Kim J O, Kang S, *et al.* Achieving enhanced

- nitrification in communities of nitrifying bacteria in full-scale wastewater treatment plants via optimal temperature and pH[J]. Sep Purif Technol,2014,132:697-703.
- [27] Tao W, He Y, Wang Z, *et al.* Effects of pH and temperature on coupling nitrification and anammox in biofilters treating dairy wastewater[J]. Ecol Eng,2012,47(5):76-82.
- [28] 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.
- [29] Wang Q, Duan H, Wei W, *et al.* Achieving stable mainstream nitrogen removal via the nitrite pathway by sludge treatment using free ammonia[J]. Environ Sci Technol,2017,51(17):9800-9807.
- [30] Wang Q, Hao X, Yuan Z. Towards energy positive wastewater treatment by sludge treatment using free nitrous acid[J]. Chemosphere,2016,144:1869-1873.
- [31] Tangkitjawisut W, Limpiyakorn T, Powtongsook S, *et al.* Differences in nitrite-oxidizing communities and kinetics in a brackish environment after enrichment at low and high nitrite concentrations[J]. J Environ Sci,2016,42(4):41-49.
- [32] Liu G, Wang J. Quantifying the chronic effect of low DO on the nitrification process [J]. Chemosphere,2015,141:19-25.
- [33] Wilén B M, Balmér P. The effect of dissolved oxygen concentration on the structure, size and size distribution of activated sludge flocs[J]. Water Res,1999,33(2):391-400.
- [34] Martins A M P, Heijnen J J, van Loosdrecht M C. Effect of dissolved oxygen concentration on sludge settleability [J]. Appl Microbiol Biotechnol,2003,62(5/6):586-593.



作者简介:付昆明(1981-),男,山东莒南人,博士,副教授,主要从事水处理技术研究工作。

E-mail: fukunming@163.com

收稿日期:2018-07-08

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命