

生物脱氮中 N_2O 产生过程的微生物作用

王 赛,王淑莹,彭永臻,巩有奎

(北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室 北京 100124)

摘 要 N_2O 是一种重要的温室气体。微生物的生物硝化反硝化过程是 N_2O 产生的主要来源。从微生物学的角度阐述了脱氮过程中 N_2O 的产生过程,并分析了不同脱氮过程中各菌种对 N_2O 产生过程的作用。硝化过程中 N_2O 主要产生于氨氧化细菌的氨氧化过程,亚硝酸盐氧化细菌的存在可以减少 N_2O 的产量;反硝化过程中亚硝酸盐的积累,低氧和碳源不足都会导致 N_2O 产生量的增加;另外,其他一些参与氮循环的微生物也会产生 N_2O 。文章最后给出了污水脱氮过程中 N_2O 减量化的策略以及今后研究的方向。

关键词 N_2O ;生物脱氮;硝化过程;反硝化过程;微生物

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

文章编号 1000-3770(2011)05-0001-005

N_2O 是一种强力的温室气体,其增温潜势分别为 CO_2 的 200~300 倍, CH_4 的 4~12 倍。大气中 N_2O 体积分数每增加一倍,将会使全球地表气温平均上升 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当 N_2O 进入到平流层后,可经太阳紫外光照射分解成 NO 与臭氧分子发生反应,导致臭氧层的破坏^[1]。近 20 年来,大气中 N_2O 以 0.25%~0.30% 的年增长率急剧上升, N_2O 体积分数的增加将对人类生存环境及氮素生态平衡等产生严重影响。

微生物是最重要的生物源,生物脱氮过程就是在硝化反硝化等多种微生物的协同合作下完成的。而大气中 90% 以上的 N_2O 来自于为微生物的硝化反硝化作用^[2]。环境因素对微生物代谢途径及其 N_2O 的产生具有重要的影响。随着研究的不断深入,人们对脱氮过程的微生物学机理有了新的认识,开发了许多新型的处理工艺。同时,因此,研究生物脱氮过程中微生物种群结构及其 N_2O 的产生机理,更好的利用微生物脱氮实现 N_2O 减量化有着重要的实际意义。

传统生物脱氮过程是在硝化细菌和反硝化细菌的作用下,通过生物硝化和反硝化,将污水中的含氮化合物转化为气态氮化物。

1 硝化细菌与 N_2O 的产生

把氨氮氧化为亚硝酸盐和硝酸盐的生物反应称

为生物硝化作用。硝化作用是一个序列反应,由两类细菌共同完成。在好氧条件下,氨氧化细菌(AOB)以氧作为电子受体,以氨氮作为电子供体把氨氮氧化成亚硝酸盐;亚硝酸盐氧化细菌(NO_B)把亚硝酸盐氧化成硝酸盐。

1.1 氨氧化菌

氨氧化菌(AOB)可分为自养型和异养型 2 种,现有的研究表明,自养型氨氧化菌是硝化过程中的主要菌群。自养生长时,以氨为惟一能源,以 CO_2 为惟一碳源。氨氧化菌可划分为 3 个属,即 *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus* 和 *Nitrospira*。在 *Nitrosomonas* 中 *N. europaea* 是最早被分离并研究的菌种。

氨氧化阶段可能产生 N_2O 的途径有:(1)氨氧化中间产物羟胺 NH_2OH 和亚硝酸盐的化学分解作用^[3];(2)限氧条件下自养菌 AOB 好氧反硝化作用。目前大量的研究表明,AOB 好氧反硝化过程可能是生物脱氮过程中 N_2O 的主要来源。AOB 可以在低氧条件下,以氨、氢或者其他有机碳源作为电子供体将亚硝酸盐还原为 N_2O 或者是 N_2 ^[4]。Marlies^[5]在利用 SBR 反应器研究混合硝化系统的生物脱氮过程中发现,系统中有 2.8% 的氨氮最后转化为 NO_2^- ,其中,AOB 的反硝化作用是 N_2O 产生的主要原因。研究指出,硝化菌中只有自养氨氧化菌能够在氨氧化过程

收稿日期 2010-07-02

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAC19B03)北京市教委科技创新平台项目(PXM2008_014204_050843)

作者简介:王 赛(1986—),女,硕士研究生,研究方向污水生物脱氮过程中氧化亚氮释放过程及机理研究

联系电话:13426251895;E-mail: wssara@126.com

中产生 N_2O ,其中最典型的的就是 *N. europaea*^[3,6]。系统中 NO 和 N_2O 能影响细菌的氨氧化速率。添加 NO 和 N_2O 均可大幅度提高 *N. europaea* 的氨氧化活性,但细菌的细胞产率和能源利用效率略有下降。试验中 *N. europaea* 可以将 50% 的氨转化成 N_2 和微量的 N_2O 。添加的 N_2O 越多,氮损失越大^[7]。此外,从土壤中分离的 *Nitrosomonas* 菌种在 DO 为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时产生的 N_2O 占亚硝酸盐含量的 2.5%^[6],而另一项研究中 *Nitrosomonas* 在同样的溶解氧浓度下产生的 N_2O 占总氮的 11%^[8]。

除在好氧条件下脱氮,氨氧化菌 *N. europaea* 还能通过严格厌氧过程氧化氨氮获取能量,在 N_2O 存在的条件下,将氨氮转化为 N_2O 和 N_2 ,即厌氧氨氧化反应^[9]。但 Zart D 等认为 *N. europaea* 发生的厌氧氨氧化过程并不会生成 N_2O ^[10]。

1.2 亚硝酸盐氧化菌

亚硝酸盐氧化菌(NO_B)是自养型细菌,以亚硝酸盐为惟一能源, CO_2 为惟一碳源。亚硝酸盐氧化菌分为 4 个属,即 *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospina*, *Nitrospira*。迄今,还没有发现能产生 N_2O 的亚硝酸氧化菌属。Bock^[11]对亚硝酸盐氧化菌 *Nitrobacter* 中分离出的菌种进行的研究表明,好氧条件下亚硝酸盐氧化细菌不能进行反硝化产生 N_2O 。

大量的研究证明,硝化过程中 N_2O 的产量与亚硝酸盐浓度有很大关系^[12]。因此,利用向生物脱氮系统内投加 NO_B,提高亚硝酸盐的氧化速率以抑制亚硝酸盐的积累,能够达到 N_2O 减量的目的^[13]。在所有环境因素中, DO 浓度对系统 AOB 和 NO_B 之间的竞争生长起着至关重要的作用。硝化过程中,AOB 和 NO_B 的氧饱和常数 K_s 不同,AOB 对溶解氧的亲合力较强,因此在低氧时氨氮被氧化为亚硝酸盐并导致亚硝酸盐的积累,这在一定程度上提高了系统 N_2O 的产量。有报道指出, DO 质量浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,硝化菌会发生反硝化作用并产生微量的 N_2O ^[14]。Laanbroek 等^[15]研究中发现亚硝酸盐氧化菌 *Nitrobacter winogradskyi* 在与 AOB 争夺溶解氧方面明显不占优势。但在 *N. europaea* 和 *N. winogradskyi* 共同存在的系统中,由于 *N. winogradskyi* 氧化亚硝酸盐过程,降低了亚硝酸盐的浓度,因此减少了 N_2O 的释放量^[16]。

A Olav Slikers^[17]还考察了硝化过程产生的 NO 和 N_2O 对 NO_B 产生抑制作用。系统污泥由氨氧化细菌 *Nitrosomonas*, 亚硝酸盐氧化菌主要是 *N.*

europaea, 还有少量的 *Nitrobacter* 组成。反应过程中产生的 N_2O 没有对 NO_B 产生抑制,这与纯菌种 *Nitrobacter vulgaris* 在 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}NO$ 存在下没有被抑制的结果一致。这就说明了 NO_B 在氧化亚硝酸盐的过程中可以排除 N_2O 对其带来的影响,使系统稳定并且可以一定程度的减少 N_2O 的产生。

2 反硝化菌与 N_2O 的产生

反硝化作用是反硝化菌的厌氧呼吸过程,该过程中,反硝化菌以硝酸盐作为电子受体,以有机物为电子供体进行缺氧呼吸过程,其代谢终产物为 N_2 。反硝化过程所涉及到的气态氮化物有 NO 、 N_2O 和 N_2 。其中, NO 对生物具有较强毒性,因此,以 NO 为最终产物的细菌往往难以存活,反硝化过程中积累的代谢中间产物主要为 N_2O 。反硝化菌没有专门的分类,属种绝大多数分布于细菌界,少数分布于古生菌界。细菌界分为非 *Proteobacter* 门细菌和 *Proteobacter* 门细菌。其中,多数细菌集中分布在 *Proteobacter* 门。

2.1 反硝化菌的缺氧反硝化

早期的研究表明,生物反硝化作用是生物脱氮中 N_2O 产生的主要过程^[18]。 N_2O 是反硝化过程的中间产物,其产生量的多少与氧化亚氮还原酶 Nos 及其活性有直接关系。除此之外,自然界中还存在一些不具备氧化亚氮还原酶的菌种,该菌种反硝化最终代谢产物为 N_2O (表 1)。Liang F Dong 等^[19]研究中亚硝酸盐的还原速率比硝酸盐还原速率大 10 倍,试验发现一种只能利用亚硝酸盐并且以 N_2O 作为最终产物的专性亚硝酸盐反硝化菌。在这之前,Lloyd^[20]就已经分离出专性亚硝酸盐反硝化菌 *Alcaligenes faecalis*,该菌种反硝化过程最终产物为 N_2O 。除此之外,试验证实 *Aquaspirillum itersonii* 同样也是以 N_2O 作为最终产物。

表 1 不含氧化亚氮还原酶(Nos)的菌种

分类	名称	文献
氨氧化菌	<i>Nitrosomonas europaea</i>	E M Baggs ^[22]
	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	Baek S H ^[23]
	<i>Pseudomonas stutzeri</i>	Takaya N ^[24]
反硝化菌	<i>Paracoccus denitrificans</i>	Takaya N ^[24]
	<i>Roseobacter denitrificans</i>	Shiba T ^[25]
	<i>Alcaligenes faecalis</i>	Lloyd ^[20]
	<i>Aquaspirillum itersonii</i>	Lloyd ^[20]
	反硝化真菌	Takaya N ^[26]
其他	氨化细菌	Richardson ^[27]

反硝化过程中,碳源是影响反硝化过程的重要

因素。碳源种类的不同对氧化亚氮还原酶活性的影响程度不一样。Lemmer^[21]发现,不同类型的反硝化菌对同一碳源有不同的反硝化速率,反硝化过程中 N_2O 的释放速率与碳源的种类和数量有直接的关系。*Paracoccus* 菌株和 *Hydrogenophaga* 菌株在醋酸为碳源的条件下产生的 N_2O 比以甲醇为碳源时产生的略多。

2.2 反硝化菌的好氧反硝化

随着研究的不断深入,发现了许多可以进行好氧反硝化的异养反硝化菌。多年来,一直认为 Nos 对氧敏感,只有在缺氧的条件下 Nos 才具有活性。后来的研究发现 *Thiosphaera pantotropha* 和 *Rhodobacter capsulatus* 的氧化亚氮还原酶并不受溶解氧的抑制。在有氧状态下,只要能获得电子,*T. pantotropha* 就能把 N_2O 还原成 N_2 ^[28]。*P. denitrificans* 是在活性污泥中分离出来的一种好氧反硝化菌,它甚至可以在饱和溶解氧的环境下还原硝酸盐^[29-30]。从 *Hydrogenophaga* 属中分离出的 *Comamonas* 可以同时利用氧和硝酸盐作为电子受体,产生 N_2 且不导致亚硝酸盐的积累,该过程中 *Comamonas* 中的氧化亚氮还原酶没有受到溶解氧的影响。但是与 *Hydrogenophaga* 属普遍存在于活性污泥中不同,*Comamonas* 在活性污泥中并不常见^[31]。最近的研究中还发现一些新兴的好氧反硝化菌,如 *Microvirgula aerodenitrificans*^[32]和 *Thaurea mechernichensis*^[33]。前者在好氧条件下的反硝化效果与 *P. denitrificans* 类似。报道中称这些菌种都能有效地去除硝酸盐,但是没有涉及溶解氧对还原产物 N_2O 和 N_2 的影响。

复杂的微生物环境中反硝化菌多种多样,都不同程度的影响着反硝化中间产物的生成,比单一的微生物环境更能有效地进行反硝化^[34-35]。反硝化菌种类繁多,目前人类的认识水平还有限,大量的菌种以及更深层次的反硝化机理等待人们去开发和了解,反硝化菌对 N_2O 产生量的贡献也有待进一步研究。

3 其它产生 N_2O 的脱氮细菌

氨氧化古细菌和异养硝化菌也可以发生硝化反应,虽然目前关于两种细菌产生 N_2O 的研究并不多见,但他们仍有可能产生 N_2O 。Anderson^[36]的纯菌种培养试验表明,异养菌的硝化速率是自养菌的 1/(100~1000) 倍,但异养硝化菌 *A. faecalis* 硝化过程产生的 N_2O 比自养菌 *N. europaea* 产生的多。此类细菌在硝化反应和 N_2O 产生量方面报道较少,需进一步研究。

有报道称 N_2O 同样可以产生于异化性硝酸盐还

原过程的另一途径,由硝酸盐呼吸细菌把硝酸盐还原成氨。尤其是在污泥中发现的肠道细菌,是最易繁殖的产生 N_2O 的细菌之一^[37]。在厌氧条件下,肠道细菌 *Klebsiella pneumoniae* 还原亚硝酸盐,产生 N_2O 和氨。其中 N_2O 占亚硝酸盐还原量的 5%^[38]。普通的肠道细菌 *Escherichia coli* 和真菌 *Aspergillus* 和 *Penicillium* 都可以在好氧条件下还原亚硝酸盐产生 N_2O ^[9]。

最近在脱氮除磷系统中也发现有 N_2O 的产生。Romain^[35]的反硝化除磷系统中, N_2O 主要是由 *Competibacter* 和聚糖菌产生的,由于微生物单一导致 N_2O 的积累。但是聚糖菌产生的 N_2O 可以被系统中其他微生物还原,从而达到减少 N_2O 产量的目的。同步硝化反硝化除磷(SNDPR)的研究中,氮是通过亚硝酸盐去除的,起反硝化作用的是反硝化聚糖菌(DGAOs)而不是反硝化聚磷菌(DPAOs),最终代谢产物是 N_2O ^[39]。Zheng^[40]的研究指出,DGAOs 在亚硝酸盐质量浓度为 1~2 mg·L⁻¹ 时产生 N_2O 。但是,还没有在亚硝酸盐积累的情况下,DPAOs 能否在反硝化中产生 N_2O 的报道。

Marlies^[12]在厌氧氨氧化系统中检测到微量的 NO 和 N_2O ,但并不清楚是否由厌氧氨氧化菌产生。在接种的 99.99%厌氧氨氧化菌种条件下进行批次试验,没有 N_2O 的产生,在厌氧氨氧化菌中没有发现产生 N_2O 的生理功能。试验中产生的 N_2O 可能是通过其他反应生成的。进一步的研究发现,厌氧氨氧化的产物之一亚硝酸盐可以被用作电子受体转化为气态产物 N_2 和微量的 N_2O 。

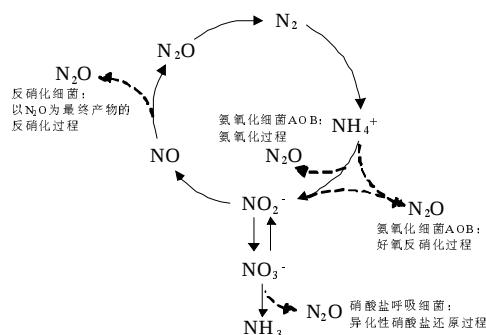


图 1 氮循环中 N_2O 的作用细菌及途径

Fig.1 The microorganism and producing ways of N_2O in nitrogen cycle

4 结 语

微生物的硝化反硝化过程是 N_2O 的主要产生源。在硝化反应中,对于大部分细菌而言, N_2O 是作为副产物产生的,而不是以中间产物出现的。氨氧化菌 AOB 在低氧和亚硝酸盐积累的条件下发生的好氧反硝化是硝化阶段产生 N_2O 的主要原因。某些好

表 2 不同脱氮过程 N_2O 产生情况
Tab.2 N_2O production in different nitrogen removal

脱氮过程	产生 N_2O 的菌种	菌名称	原因	参考文献
硝化过程	自养硝化菌	<i>Nitrosomonas eutropha</i>	发生好氧反硝化	Butler ^[3]
	异养硝化菌	<i>A. faecalis</i>	—	Anderson ^[6]
		<i>Aquaspirillum itersonii</i>	代谢终产物是 N_2O	Lloyd ^[20]
反硝化过程	反硝化细菌	<i>Paracoccus Hy-drogenophaga</i>	碳源种类影响反硝化效果	Lemmer ^[21]
氨化过程	氨化细菌	<i>Klebsiella pneumonia</i>	没有氧化亚氮还原酶系统	Satoh ^[38]
反硝化除磷过程	GAOs	<i>Competibacter</i>	系统内微生物环境单一	Romain ^[35]
同步硝化反硝化过程	DGAOs	—	—	Raymond ^[39]
厌氧氨氧化过程	—	—	产物亚硝酸盐经还原转化为 N_2O	Marlies ^[12]

氧反硝化菌没有氧化亚氮还原酶是导致好氧反硝化中 N_2O 积累的原因之一。在反硝化过程中, N_2O 是反硝化的中间产物之一。研究认为反硝化过程是脱氮工艺中 N_2O 产生的主要过程, 环境条件的变化对反硝化菌产生 N_2O 的影响很大。另外, 其他不同菌种的微生物对 N_2O 释放量也有贡献。

生物脱氮过程中微生物种群影响并决定了温室气体 N_2O 的产生。在全球气候变暖的大背景下, 改善生物脱氮系统中 N_2O 产生情况具有实际的效果和重要的意义。在微生物的角度从以下几个方面可以实现 N_2O 的减量:

(1) 运用分子生物学手段可以鉴定硝化菌、反硝化菌和其他细菌的种群结构以及 N_2O 的产生机理。选择脱氮效果好, N_2O 产生量小, 对环境有较强适应能力并具竞争力的优势菌, 淘汰不利菌种, 实现种群优化。

(2) 处理系统中应控制适宜的环境条件, 减少对微生物酶活性的影响, 从而减少 N_2O 的产生。

(3) 处理系统要避免菌种单一, 复杂多样的微生物环境可以在一定程度上实现 N_2O 减量化。

目前人类对微生物的认识水平还很有限, 自然界中还存在尚未发现的种群。对于脱氮过程中微生物产生 N_2O 应引起足够的重视之外, N_2O 产生量的控制问题还需要深度系统的研究。从微生物的角度可以实现 N_2O 减量化的目的, 在今后的研究工作中, 生态学和分子生物学是确定生物种群、产生途

径、代谢过程和 N_2O 产生量之间关系的重要手段和主要方向。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 1995: the science of climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 21-24.
- [2] 刘秀红, 杨庆, 吴昌永, 等. 不同污水生物脱氮工艺中 N_2O 释放量及影响因素[J]. 环境科学学报, 2006, 26(12): 1940-1947.
- [3] M D Butler, Y Y Wang, E Cartmell, et al. Nitrous oxide emissions for early warning of biological nitrification failure in activated sludge[J]. Water Research, 2009, 43(5): 1265-1272.
- [4] Schmidt I van Spanning RJM, Jetten MSM. Denitrification and ammonia oxidation by *Nitrosomonas europaea* wild-type, and NirK and NirB-deficient mutants[J]. Microbiology, 2004, 150: 4107-4114.
- [5] Marlies J Kampschreur, Tan NCG, Kleerebezem R, et al. Effect of dynamic process conditions on nitrogen oxides emission from a nitrifying culture[J]. Environment Science Technology, 2008, 42(2), 429-435.
- [6] B B Colliver, T Stephenson. Production of nitrogen oxide and dinitrogen oxide by autotrophic nitrifiers [J]. Biotechnology Advances, 2000, 18(3): 219-232.
- [7] Yoshida N. ^{15}N -depleted N_2O as a product of nitrification[J]. Nature, 1988, 335(6190): 528-529.
- [8] Bock E, Wagner M. Oxidation of inorganic nitrogen compounds as energy source[M]// Balows A, Truper HG, Dworkin M, et al. The prokaryotes: an evolving electronic database for the microbiological community. 3rd ed. Springer-Verlag New York, NY, 2001.
- [9] Schmidt I, Bock E, Jetten MSM. Ammonia oxidation by *nitrosomonas eutropha* with NO_2 as oxidant is not inhibited by acetylene [J]. Microbiology, 2001, 147: 2247-2253.
- [10] Zart D, Schmidt I, Bock E. Significance of gaseous NO for ammonia oxidation by *nitrosomonas eutropha* [J]. Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology, 2000, 77(1): 49-55.
- [11] Bock E, Schmidt I, Stuvén R, et al. Nitrogen loss caused by nitrifying nitrosomonas cells using ammonia or hydrogen as electron donors and nitrite as electron acceptor[J]. Arch Microbiol., 1995, 163(1): 16-20.
- [12] Marlies J Kampschreur, Wouter R L vander Star, Hubert A Wielders, et al. Dynamics of nitric oxide and nitrous oxide emission during full-scale reject water treatment[J]. Water Research, 2008, 42(3): 812-826.
- [13] Yasuyuki Fukumoto, Kazuyoshi Suzuki, Takashi Osada, et al. Reduction of nitrous oxide emission from pig manure composting by addition of nitrite -oxidizing bacteria [J]. Environment Science Technology, 2006, 40(21), 6787-6791.
- [14] Gaelle Tallec, Josette Garnier, Gilles Billen, et al. Nitrous oxide emissions from denitrifying activated sludge of urban wastewater treatment plants, under anoxia and low oxygenation[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(7): 2200-2209.

- [15] Laanbroek HJ, Gerards S. Competition for limiting amounts of oxygen between *nitrosomonas europaea* and *nitrobacter winogradsky* grown in mixed continuous cultures [J]. Arch Microbiol, 1993, 159 (5): 453-459.
- [16] Kester RA, deBoer W, Laanbroek HJ. Production of NO and N_2O by pure cultures of nitrifying and denitrifying bacteria during change in aeration [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63(10): 3872-3877.
- [17] Slikkers AO, Haaijer SCM, Stafsnes MH, et al. Competition and coexistence of aerobic ammonium and nitrite-oxidizing bacteria at low oxygen concentrations [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 68(6): 808-817.
- [18] F Beline, J Martinez, C Marol, et al. Application of the ^{15}N technique to determine the contributions of nitrification and denitrification to the flux of nitrous oxide from aerated pig slurry [J]. Water Research, 2001, 35(11): 2774-2778.
- [19] Dong LF, Nedwell DB, Underwood GJC, et al. Nitrous oxide formation in the Colne Estuary, England: the central role of nitrite [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(3): 1240-1249.
- [20] Lloyd D L. Temperature effects on competition, selection and physiology of estuarine nitrate-respiring bacteria [D]. Colchester, United Kingdom: University of Essex, 2000.
- [21] Lemmer H, Zaglauer A, Metzner G. Denitrification in a methanol-fed fixed-bed reactor: part 1 physico-chemical and biological characterization [J]. Water Research, 1997, 31(8): 1897-1902.
- [22] E M Baggs. A review of stable isotope techniques for N_2O source partitioning in soils: recent progress, remaining challenges and future considerations [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2008, 22(11): 1664-1672.
- [23] Baek SH, Hartsock A, Shapleigh JP. Agrobacterium tumefaciens C58 uses ActR and FnrN to control nirK and nor expression [J]. Journal of Bacteriology, 2008, 190(1): 78-86.
- [24] Takaya N, Catalan-Sakairi MAB, Sakaguchi Y, et al. Aerobic denitrifying bacteria that produce low levels of nitrous oxide [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(6): 3152-3157.
- [25] Shiba T. *Roseobacter-litoralis* gen-nov sp-nov, and *roseobacter-denitrificans* sp-nov, aerobic pink-pigmented bacteria which contain bacteriochlorophyll-a [J]. Systematic and Applied Microbiology, 1991, 14(2): 140-145.
- [26] Takaya N, Shoun H. Nitric oxide reduction, the last step in denitrification by *fusarium oxysporum*, is obligatorily mediated by cytochrome P450nor [J]. Molecular and General Genetics, 2000, 263(2), 342-348.
- [27] Richardson D, Felgate H, Watmough N, et al. Mitigating release of the potent greenhouse gas N_2O from nitrogen cycle could enzymic regulation hold the key [J]. Trends in Biotechnology, 2009, 27 (7): 388-397.
- [28] Berks BC, Baratta D. Purification and characterization of a nitrous oxide reductase from *thiosphaera pantotropha*-Implications for the mechanism of aerobic nitrous oxide reduction [J]. European Journal of Biochemistry, 1993, 212(2): 467-476.
- [29] Baumann B, Snozzi M, Zehnder AJB, et al. Dynamics of denitrification activity of *paracoccus denitrificans* in continuous culture during aerobic-anaerobic changes [J]. Journal of Bacteriology, 1996, 178(15): 4367-4374.
- [30] Rehlfuss M, Urban J. *Alcaligenes faecalis* subsp. *phenolicus* subsp. nov. a phenol-degrading, denitrifying bacterium isolated from a graywater bioprocessor [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2005, 28(5): 421-429.
- [31] Patureau D, Davison J, Bernet N, Moletta R. Denitrification under various aeration conditions in *comamonas* sp., strain SGLY 2 [J]. FEMS Microbiol Ecol., 1994, 14(1): 71-78.
- [32] Patureau D, Godon JJ, P Dabert P, et al. *Microvirgula aerodenitrificans* gen-nov., sp-nov., a new gram-negative bacterium exhibiting co-respiration of oxygen and nitrogen oxides up to oxygen saturated conditions [J]. International Journal of Systematic Bacteriology. 1998, 48: 775-782.
- [33] Scholten E, Lukow T, Auling G, et al. *Thaurea mechernichensis* sp-nov., an aerobic denitrifier from a leachate treatment plant [J]. Int J Sys Bacteriol., 1999, 49: 1045-1051.
- [34] Van de Pas Schoonen KT, Schalk Otte S, Haaijer S, et al. Complete conversion of nitrate into dinitrogen gas in co-cultures of denitrifying bacteria [J]. Biochemical Society Transaction, 2005, 33: 205-209.
- [35] Lemaire R, Meyer R, Taske A, et al. Identifying causes for N_2O accumulation in a lab-scale sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal [J]. Journal of Biotechnology, 2006, 122(1): 62-72.
- [36] Anderson IC, Poth M, Homstead J, et al. Comparison of nitric oxide and nitrous oxide production by the autotrophic nitrifier *nitrosomonas europaea* and the heterotrophic nitrifier *alcaligenes faecalis* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, 59 (11), 3525-3533.
- [37] Gaelle Tallec, Josette Garnier, Gilles Billen, et al. Nitrous oxide emissions from denitrifying activated sludge of urban wastewater treatment plants, under anoxia and low oxygenation [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(7): 2200-2209.
- [38] Satoh T, Hom SSM, Shanmugam KT. Production of nitrous oxide from nitrite in *klebsiella pneumoniae*: mutants altered in nitrogen metabolism [J]. Journal of Bacteriology, 1983, 155(2): 454-458.
- [39] Raymond J Zeng, Romain L, Zhiguo Y, et al. Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 84(2): 170-178.
- [40] Zheng RJ, Yuan Z, Keller J. Enrichment of denitrifying glycogen accumulating organisms in anaerobic/anoxic activated sludge system [J]. Biotechnology Bioengineering, 2003, 81(4): 397-404.

(下转第 11 页)

- contaminants in water [J].Industrial & Engineering Chemistry Research,2006,45(15):5231-5238.
- [21] Takeuchi M, Yamashita H, Matsuoka M, et al. Photocatalytic decomposition of NO under visible light irradiation on the Cr-ion-implanted TiO₂ thin film photocatalyst [J].Catalysis Letters 2000,67(2-4):135-137.
- [22] Khan S, Al-Shahry M, Ingler W B. Efficient photochemical water splitting by a chemically modified *n*-TiO₂ [J].Science,2002,297(5590):2243-2245.
- [23] Ohno T, Miyamoto Z, Nishijima K, et al. Sensitization of photocatalytic activity of S- or N-doped TiO₂ particles by adsorbing Fe³⁺ cations[J].Applied Catalysis A-General,2006,302(1):62-68.
- [24] Sajjad A, Shamaila S, Tian B Z, et al. Comparative studies of operational parameters of degradation of azo dyes in visible light by highly efficient WO₃/TiO₂ photocatalyst [J].Journal of Hazardous Materials,2010,177(1-3):781-791.
- [25] Jiang Z P, Wang H Y, Huang H, et al. Photocatalysis enhancement by electric field: TiO₂ thin film for degradation of dye X-3B [J].Chemosphere,2004,56(5):503-508.
- [26] Knust K N, Foley M P, Mubarak M S, et al. Electrochemical reduction of 5-chloro-2- (2,4-dichlorophenoxy)phenol (triclosan) in dimethylformamide[J].Journal of Electroanalytical Chemistry,2010, 638(1): 100-108.
- [27] Wang J K, Farrell J. Electrochemical inactivation of triclosan with boron doped diamond film electrodes [J].Environmental Science & Technology,2004, 38(19):5232-5237.
- [28] Sires I, Oturan N, Oturan M A, et al. Electro-Fenton degradation of antimicrobials triclosan and triclocarban [J].Electrochimica Acta, 2007,52(17):5493-5503.
- [29] Nakada N, Shinohara H, Murata A, et al. Removal of selected pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and endocrine-disrupting chemicals (EDCs) during sand filtration and ozonation at a municipal sewage treatment plant[J].Water Research,2007,41(19): 4373-4382.
- [30] Wert E C, Rosario-Ortiz F L, Snyder S A. Effect of ozone exposure on the oxidation of trace organic contaminants in wastewater [J]. Water Research,2009,43(4):1005-1014.
- [31] Suarez S, Dodd M C, Omil F, et al. Kinetics of triclosan oxidation by aqueous ozone and consequent loss of antibacterial activity: Relevance to municipal wastewater ozonation[J].Water Research,2007, 41(12):2481-2490.
- [32] Adewuyi Y G. Sonochemistry: Environmental science and engineering applications [J].Industrial & Engineering Chemistry Research,2001,40(22):4681-4715.
- [33] Byun K T, Kwak H Y. Degradation of methylene blue under multi-bubble sonoluminescence condition [J].Journal of Photochemistry and Photobiology A-Chemistry,2005,175(1):45-50.
- [34] Sanchez-Prado L, Barro R, Garcia-Jares C, et al. Sonochemical degradation of triclosan in water and wastewater [J].Ultrasonics Sonochemistry,2008,15(5):689-694.

STATUS AND PROSPECT OF ADVANCED OXIDATION TECHNOLOGIES ON REMOVING TRICLOSAN IN AQUATIC ENVIRONMENT

Han Xu, Deng Huiping, Liu Hao

(Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Triclosan, as one of broad spectrum antimicrobial agent of PPCPs, was introduced in the article on its physical properties, toxicity and status in aquatic environment, briefly. Considering varieties of hazardous substances produced by triclosan in natural conditions, triclosan should be controlled and removed from sources which can guarantee the safety of drinking water. The article summarize the properties, the existing problems and the resolving methods as well as the mechanisms, influencing factors and removal effects for removing TCS by advanced oxidation processes (AOP). The paper also indicated the orientation of photocatalytic technology with preparation, mechanism, recycle and combination with other technologies and predicts that the combination of photocatalytic technologies with other technologies was an important research field applied to water treatment in future.

Keywords: triclosan; aquatic environment; AOP

(上接第5页)

MICROBIAL ACTION IN N₂O PRODUCTION FROM BIOLOGICAL NITROGEN REMOVAL

Wang Sai, Wang Shuying, Peng Yongzhen, Gong Youkui

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Nitrous oxide (N₂O) is an important greenhouse gas. Microbiological nitrification and denitrification were considered to be the major sources of N₂O. The microbial processes of N₂O production in biological nitrogen removal are elaborated from the microbiological perspective. In addition, the N₂O production by microorganisms in different nitrogen removal processes is summarized. In nitrification process, the N₂O production is mainly caused by ammonia-oxidizing bacteria (AOB). The existence of nitrite-oxidizing bacteria (NOB) could reduce the production of N₂O. The accumulation of nitrite, low DO concentration and carbon lacking can lead to large amount of N₂O production in denitrification process. Moreover, some other bacteria participate in nitrogen cycle can produce N₂O also. This article proposes strategies and main directions for N₂O reduction in nitrogen removal process.

Keywords: nitrous oxide (N₂O); biological nitrogen removal; nitrification; denitrification; microorganism