

彭永臻, 马斌. 2009. 低 C/N 比条件下高效生物脱氮策略分析 [J]. 环境科学学报, 29(2): 225– 230

Peng Y Z, Ma B. 2009. Review of biological nitrogen removal enhancement technologies and processes under low C/N ratio [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(2): 225– 230

低 C/N 比条件下高效生物脱氮策略分析

彭永臻^{1, 2*}, 马斌¹

1 哈尔滨工业大学, 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090

2 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 100022

收稿日期: 2008-03-01 录用日期: 2008-10-31

摘要: 针对低 C/N 比污水传统生物脱氮碳源不足、脱氮效率不高, 提出从充分利用碳源和减少生物脱氮碳源需求量两个方面, 来实现高效生物脱氮. 在充分利用碳源方面, 介绍了好氧缺氧分段进水工艺、脉冲式 SBR 工艺等改进型生物脱氮工艺; 在减少生物脱氮碳源需求量方面, 介绍了短程硝化反硝化、厌氧氨氧化、完全自养脱氮等新型生物脱氮技术. 并对这些技术和工艺的原理、优势、存在的问题以及应用情况进行了简要的分析.

关键词: 低 C/N 比; 高效脱氮; 改进型生物脱氮工艺; 新型生物脱氮技术

文章编号: 0253-2468 (2009) 02- 225- 06 中图分类号: X 703 文献标识码: A

Review of biological nitrogen removal enhancement technologies and processes under low C/N ratio

PENG Yongzhen^{1, 2*}, MA Bin¹

1 School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090

2 Key Laboratory of Beijing Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022

Received 1 March 2008; accepted 31 October 2008

Abstract Considering the shortage of organic materials for biological nitrogen removal from wastewater under low C/N ratios, two methods are proposed in order to achieve high efficiency of biological nitrogen removal, making full use of the carbon source and reducing the requirement of carbon source. To make full use of carbon sources, modified biological nitrogen removal process are introduced, including the anoxic/oxic step feeding process and the pulsed SBR process. To reduce the carbon source requirement in biological nitrogen removal, novel biological nitrogen removal processes are introduced, including shortcut nitrification and denitrification, the anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) process and completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process. The mechanisms, the advantages, the unsolved problems and the applications of these technologies and processes are analyzed.

Keywords low C/N ratio; high efficiency nitrogen removal; modified biological nitrogen removal process; novel biological nitrogen removal technologies

1 引言 (Introduction)

水体富营养化问题日益突出, 近年来由其引发的一系列问题严重影响了居民的日常生活. 氮磷是引起水体富营养化的主要因素, 因此, 污水中氮磷达标排放就显得尤为重要. 生物脱氮技术是当前应用最广泛的污水脱氮技术, 既通过硝化菌和反硝化

菌来实现氮的去除, 而充足的碳源是反硝化菌高效脱氮的关键. Kuba 等 (1996) 提出当进水 C/N 比低于 3~4 时, 需投加外碳源来保证生物脱氮效果. 而化工废水、养殖废水、垃圾渗滤液及部分城市的生活污水的 C/N 比都低于此值, 具体 C/N 比见表 1. 在实际工程中, 低 C/N 比污水为了达到氮的高效去除, 通常是投加甲醇或乙醇, 这样既消耗了有限的

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50778005); 新加坡环境与水工业协会创新发展项目 (No. EDB/S07/I-53974092); 北京市自然科学基金 (No. 8062006)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50778005), the Environment and Water Industry (EWI) Development Scheme of Singapore (No. EDB/S07/I-53974092) and the Natural Science Foundation of Beijing, China (No. 8062006)

作者简介: 彭永臻 (1949—), 男, 教授 (博士), E-mail: pyz@bjut.edu.cn * 通讯作者 (责任作者)

Biography: PENG Yongzhen (1949—), male, professor (Ph.D.), E-mail: pyz@bjut.edu.cn * Corresponding author

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有机资源, 又增加了污水厂的运行费用. 如何在不投加或少投加外碳源条件下使低污水 C/N 比达到高效脱氮的目的? 笔者认为可以从两个方面来考

虑: 一是改进常规工艺, 充分利用现在碳源; 二是研究新理论、新工艺减少生物脱氮对碳源的需求.

表 1 各种污水的 C/N 比
Table 1 C/N ratio of wastewater

垃圾渗滤液 (陈卫国等, 2002)	煤气废水 (方建章等, 1999)	养殖废水厌氧消化液 (邓良伟等, 2002)	北京市北小河城市污水处理厂初沉池出水 (Yang et al., 2007)
3.00	2.67	1.49	2.35

2 改进型生物脱氮工艺 (Modified biological nitrogen removal process)

在许多国家, 特别是中国, 大约有 80% 的城市污水处理厂采用前置反硝化工艺进行生物脱氮 (Ma et al., 2005). 前置反硝化工艺在生物脱氮方面具有一定的优势: 污水首先进入缺氧池优先进行反硝化反应以提高总氮去除率, 反硝化反应能去除水中大半的有机碳源, 大大缩短了好氧池的停留时间和池容. 由于前置反硝化工艺的构成, 出水硝态氮浓度与回流液中的硝态氮的浓度相等, 因此, 在前置反硝化工艺中, 不会达到很高的总氮去除率 (Baeza et al., 2004). 针对此问题, 可以通过分段进水方式解决, 即后一段进水为前一段产生的硝酸盐进行反硝化提供碳源, 从而使得原水中的碳源得到充分利用, 因此, 无硝化液回流的基础上, 实现碳源的充分利用, 达到高效脱氮的目的. 分段进水又分为时间顺序上的分段进水即脉冲式 SBR 法和空间顺序上的分段进水即缺氧好氧分段进水工艺.

2.1 缺氧好氧分段进水工艺

缺氧好氧分段进水工艺是国外近年来新开发并广泛研究的生物脱氮工艺, 三段分段进水工艺示意图如图 1 所示, 部分进水和回流污泥进入第一段缺氧区, 其它进水按照一定的流量分配进入各段缺氧区. 该工艺原水分批进入各段缺氧区, 系统中每一段好氧区产生的硝化液, 直接进入下一段缺氧区利用原水中的碳源进行反硝化作用, 从而实现原水

碳源的充分利用, 达到高效脱氮的目的. 若能满足上一段硝化产生的硝酸盐在下一段被完全反硝化掉, 即不产生硝酸盐的积累且最后一段的进水流量最小的条件, 则可达到该工艺的最高脱氮率. 祝贵兵等 (2005) 研究表明, 在一定的 C/N 比条件下, 通过调整进水流量分配和好氧缺氧容积比, 可以达到高于 95% 的脱氮率.

缺氧好氧分段进水工艺在充分利用碳源的同时, 无需硝化液回流, 减少了工艺的运行费用. 在污泥回流比为 50% 的条件下, 分段进水工艺无需硝化液回流就可达到高于 85% 的总氮去除率, 但前置反硝化工艺只能达到 40% 的总氮去除率. 对于前置反硝化工艺, 如要达到 80% 的总氮去除率, 除需要 50% 的污泥回流比, 还需要 350% 的硝化液回流 (Zhu et al., 2007). 回流污泥直接进入第一段的缺氧段, 而进水分批进入各段缺氧区, 从而工艺中形成污泥浓度梯度, 在不增加污泥回流量和二沉池负荷的条件下, 增加了系统中的平均污泥浓度, 进而增加单位池容的处理能力.

缺氧好氧分段进水工艺具有以上优点的同时, 也存在自身的不足. 由于工艺结构的特点, 分段进水工艺好氧区与缺氧区交替出现, 从而使得好氧区污泥进入下一段缺氧区时, 携带的溶解氧会破坏下一段缺氧区的缺氧环境, 进而造成异养菌和反硝化菌竞争可快速降解的碳源, 使得原水中的碳源不能够被有效利用, 脱氮效率下降. 针对此问题, 王伟等 (2006) 将好氧段 DO 控制在 $0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 仍可达到高于 95% 的氨氮去除率.

2.2 脉冲式 SBR 工艺

脉冲式 SBR 工艺就是在传统 A/O 方式运行的 SBR 工艺的基础上, 改变运行方式而开发出的一种新型生物脱氮工艺. 三段进水脉冲式 SBR 工艺的运行方式如图 2 所示.

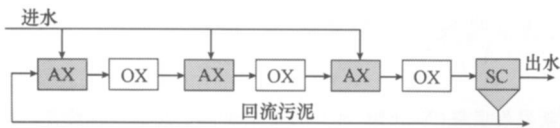


图 1 典型缺氧好氧分段进水深度脱氮工艺示意图 (AX: 缺氧池; OX: 好氧池; SC: 二沉池)

Fig. 1 Schematic diagram of the step-fed biological nitrogen removal process

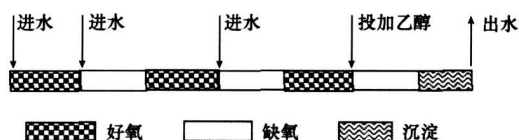


图 2 三段进水脉冲式 SBR 工艺示意图

Fig. 2 Operational mode of the pulsed SBR

该工艺通过时间上的分段进水运行方式, 充分利用原水中的有机物作为反硝化作用的有机碳源, 节省了曝气量和外加碳源的投加量, 从而使得低 C/N 比条件下高效脱氮成为可能。针对不同 C/N 比的污水, 可以通过调节每段进水流量, 使得每段进水中的可生物降解 COD 被前次进水产生的硝酸盐的反硝化作用充分利用, 从而减少了剩余碳源对好氧自养硝化菌的抑制作用, 从而达到高效脱氮的目的。

郭建华等 (2007) 对脉冲式 SBR 脱氮工艺研究表明, 每段硝化反应和反硝化反应都比较彻底, 仅需投加少量的外碳源就可使出水 $TN < 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 平均去除率高达 97.3%。李凌云等 (2007) 通过考察脉冲式 SBR 工艺处理城市生活污水过程中 ORP、DO、pH 与有机物、营养物质的去除间的关系, 建立了脉冲式 SBR 工艺的模糊控制, 使该工艺在深度脱氮的前提下, 运行更加稳定, 处理成本更低。

Yang 等 (2007) 在脉冲式 SBR 工艺处理城市污水的实验中, 利用实时控制实现污泥菌群的改变, 使得硝酸盐菌被淘汰, 亚硝酸盐菌成为优势菌, 最终实现亚硝酸盐积累高达 95% 的短程硝化反硝化, 进而使得脉冲式 SBR 工艺更加节省碳源。

3 新型生物脱氮技术 (Novel biological nitrogen removal technology)

最近的有关研究结果表明, 生物脱氮过程出现了一些超出人们传统认识的现象 (Verstraete and

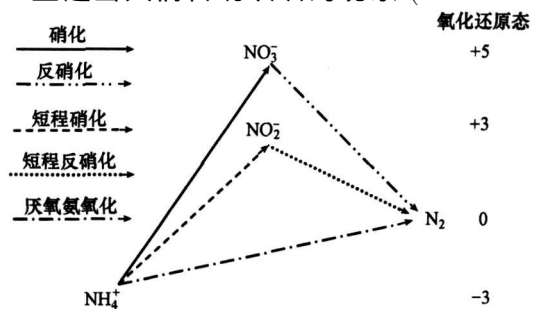


图 3 污水生物脱氮的可能途径

Fig. 3 Possible conversions of biological nitrogen during its

removal from wastewater

Philips 1998), (见图 3)。如: 硝化过程不仅由自养菌完成, 某些异养菌也可以参与硝化作用; 某些微生物在好氧条件下可以同时进行硝化和反硝化反应; 氨氧化也可以在厌氧条件下发生。这些现象的发现, 使得一些新型的生物脱氮工艺出现。

3.1 短程硝化反硝化工艺

短程硝化反硝化就是将硝化反应控制在亚硝酸盐阶段, 然后直接进行反硝化作用, 如图 4 所示。

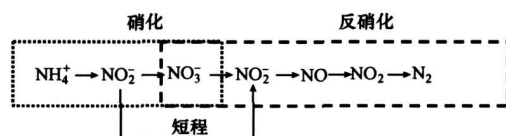


图 4 短程硝化反硝化工艺

Fig. 4 Biological nitrification-denitrification via the nitrite pathway

与传统硝化反硝化脱氮工艺相比, 短程硝化反硝化工艺减少了从 NO_3^- 还原到 NO_2^- 的过程, 可以节省 40% 的碳源, 这就使得此脱氮工艺是可用于低 C/N 污水的脱氮处理。此外此工艺还可以节省 25% 的曝气量; 亚硝酸盐反硝化速率以 1.5 到 2 倍的硝酸盐反硝化速率进行; 减少 CO_2 的排放量达到 20%; 硝化过程中减少 33% ~ 35% 的污泥产量, 在反硝化过程中减少 55% 的污泥产量。

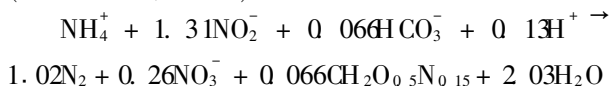
短程硝化反硝化的实现关键在于亚硝酸盐的积累, 也就是通过控制污泥中亚硝酸盐菌和硝酸盐菌的数量与活性的不平衡, 实现硝化阶段的亚硝酸盐的稳定积累。影响二者平衡的因素有: 温度、溶解氧浓度、pH 值、污泥龄及游离氨等。①温度: 亚硝酸盐菌和硝酸盐菌的最佳温度范围不同, 且在升高温度时二者比增长速率的增加值也不同, 低于 15°C 或高于 30°C 都能实现亚硝酸盐的积累。②溶解氧浓度: Laanbroek 等 (1994) 测得: 亚硝酸盐菌和硝酸盐菌的氧饱和常数分别为: $0.2 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.2 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在低 DO 条件下, 亚硝酸盐菌对氧的利用率较硝酸盐菌高, 增值速率也就较硝酸盐菌大, 从而可以淘汰硝酸盐菌, 实现亚硝酸盐的积累。③pH 值: 亚硝酸盐菌和硝酸盐菌适宜生长的 pH 范围不同, 分别为 $7.0 \sim 8.5$ 和 $6.0 \sim 7.5$ 当 pH 值为 $7.4 \sim 8.3$ 时, 亚硝酸氮生成速率较高, 在 pH 值 8.0 附近达到最大, 而硝酸氮生成速率在 pH 值 7.0 附近达到最大, 因此, pH 值也是影响亚硝酸盐积累的重要因素。④污泥龄: 亚硝酸盐菌的倍增时间短于硝酸盐菌, 控制污泥龄可以逐渐洗出硝酸盐菌而保留

亚硝酸盐菌,从而实现亚硝酸盐的积累. ⑤游离氨: Anthonisen等(1976)通过序批实验发现, NH_3 对硝酸盐菌的抑制浓度为 $0.1 \sim 1.0 \text{ mg L}^{-1}$,对亚硝酸盐菌的抑制浓度为 $10 \sim 150 \text{ mg L}^{-1}$,可将 NH_3 浓度控制在 $5 \sim 10 \text{ mg L}^{-1}$ 有利于实现亚硝酸盐的积累.

Sharon工艺是第一个实现短程硝化反硝化并被应用的工艺,与传统工艺相比, Sharon工艺具有高氨氮、高操作温度、短污泥龄的鲜明特点,这些特点使之能够淘汰掉硝酸盐菌,实现稳定的短程硝化反硝化,但同时也限制了其应用范围. Yang等(2007)利用脉冲式 SBR 工艺,在 $11.9 \sim 26.5^\circ\text{C}$ 、 $\text{DO} \geq 2.5 \text{ mg L}^{-1}$ 条件下,应用实时控制策略处理城市污水中试中,实现 180d短程硝化反硝化稳定运行,亚硝酸盐积累率高达 95%.

3.2 厌氧氨氧化工艺

厌氧氨氧化工艺 ANAMMOX (Anaerobic Ammonium Oxidation)是荷兰 Delft工业大学于 21 世纪初开发的一种新型生物脱氮技术 (Graaf *et al.*, 1995),现已应用于污泥消化液的脱氮处理. 该工艺的微生物学原理为:在厌氧条件下由厌氧氨氧化菌以亚硝酸盐作为电子受体将氨氮直接氧化为氮气. 二氧化碳是厌氧氨氧化菌生长的主要碳源和能源. 厌氧氨氧化反应过程的化学计量学可由下式表示 (Jetten *et al.*, 2007):



厌氧氨氧化技术在低碳源污水脱氮处理方面有明显优势,如:厌氧氨氧化在厌氧的条件下进行,无需氧气的供应;厌氧氨氧化以亚硝酸盐作为电子受体直接对氨氮进行氧化,无需有机碳源;厌氧氨氧化菌生长慢、产率低,工艺剩余污泥产量少;厌氧氨氧化菌代谢活性高、对基质亲和力强,工艺容积转化率高. 厌氧氨氧化工艺存诸多优点的同时,也存在不足:厌氧氨氧化菌生长慢就意味着反应器启动时间较长;厌氧氨氧化产生硝酸盐氮就意味着出水中含有部分硝酸盐氮,尤其是高氨氮废水出水,需要补充后处理保证出水总氮达标;厌氧氨氧化适宜在高温条件下进行,这就意味着此工艺应用有一定的局限性;厌氧氨氧化以亚硝酸盐为基质,就意味着首先应该实现短程硝化,若以 Sharon 工艺提供亚硝酸盐,则高温、高氨氮的条件也就限制了其应用范围.

厌氧氨氧化工艺的关键就是获得足够量的厌

氧氨氧化菌,将其有效地持留在反应器内,以发挥其厌氧氨氧化效能. 影响厌氧氨氧化菌生长的因素有温度、pH 值、溶解氧浓度、基质浓度和污泥龄等.

①温度:在 $6 \sim 43^\circ\text{C}$ 范围内都能够进行厌氧氨氧化,但是适宜温度为 $30 \sim 40^\circ\text{C}$,超过 40°C 时,厌氧氨氧化菌的活性会急剧下降 (Thandrup *et al.*, 2002); ②pH 值: pH 值对厌氧氨氧化菌及其基质都有影响,厌氧氨氧化菌的适宜 pH 值为 $6.7 \sim 8.3$ 最大反应速率出现在 pH 为 8.0 左右 (Strous *et al.*, 1997), pH 值对厌氧氨氧化菌基质的有效成分 NH_3 和 HNO_2 的分配百分比有很大影响; ③溶解氧浓度:氧能够抑制厌氧氨氧化菌的活性,但是这种抑制作用会在氧消失之后而消失; ④基质浓度:氨氮浓度对厌氧氨氧化的影响较小,氨氮浓度低于 1000 mg L^{-1} 时都不会产生抑制作用,但硝酸盐浓度对反应影响较大,其浓度超过 10 mg L^{-1} 时就会产生抑制作用; ⑤污泥龄:厌氧氨氧化菌的倍增时间长达 11d 因此,工艺污泥龄越长越好.

操家顺等(2007)用 SBR 作为 Anammox 反应器处理低氨氮污水,在进水 NH_4^+ 和 NO_2^- 都为 12 mg L^{-1} 的条件下, NH_4^+ 平均去除率达 94.5%, NO_3^- 平均去除率达 97.4%,这表明厌氧氨氧化处理低氨氮污水是有可能的. Yang 等(2007)在水温为 $11.9 \sim 26.5^\circ\text{C}$ 时,处理城市污水实现亚硝酸盐积累 95% 以上,说明亚硝酸盐菌在此温度范围内仍可以保持一定的活性. 厌氧氨氧化菌的活化能和亚硝酸盐菌的相当,从理论上讲,二者对温度的敏感性也是相当的,笔者认为厌氧氨氧化工艺在此温度范围内,处理低氨氮城市污水也应该能达到一定的效果,但实际效能有待进一步验证.

3.3 完全自养脱氮工艺

CANON (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite) 工艺是 2002 年首先由荷兰 Delft 工业大学提出的新型生物脱氮工艺. 此工艺的微生物学原理为:亚硝酸细菌在好氧条件下把氨氧化成亚硝酸盐;厌氧氨氧化菌在厌氧条件下把氨和亚硝酸盐转化成氮气;利用亚硝酸细菌和厌氧氨氧化菌的协同作用 (Canon 反应),最终把氨氧化成氮气.

由于亚硝酸细菌和厌氧氨氧化菌都是自养型细菌,因此, CANON 反应无需有机碳源,能够在完全无机的条件下进行,可以节省 100% 的外碳源投加量;氨被氧化到亚硝酸盐阶段,同时厌氧氨氧化又在无氧条件下进行,因此,该工艺可节省 63% 的供

氧量; 同时还有污泥产量低等优点. 然而也因厌氧氨氧化菌也存在一些不足, 如高操作温度局限了其应用范围; 低倍增率使得工艺启动时间较长等.

CANON 工艺关键是消除硝酸盐菌对亚硝酸盐菌和厌氧氨氧化菌的干扰, 因为硝酸盐菌和亚硝酸盐菌竞争氧, 和厌氧氨氧化菌竞争亚硝酸盐. Thirl 等 (2001) 的试验表明, 工艺中氮限制时, 硝酸盐菌会增长并干扰厌氧氨氧化的进行; 在氮饱和的条件下, 亚硝酸菌受供氧量的制约, 厌氧氨氧化菌受亚硝酸量的制约, 硝酸盐菌受供氧量和亚硝酸盐量的

双重制约, 因此维持一个限制因子就能淘汰硝酸盐菌, 保证的稳定运行.

对以上新型生物脱氮技术与传统生物脱氮工艺进行对比, 结果如表 2 所示. 从表 2 中可以看出, 各种新型生物脱氮工艺与技术在节省碳源上有明显优势, 用于低 C/N 污水高效脱氮是可行的. 此外, 在节省反应器容积、曝气量及降低污泥产量等方面也具有较大优势, 但同时还存在一定的问题, 如: 应用面窄、效率低、优势菌富集驯化时间长等, 这些不足也给以后研究指明了方向.

表 2 传统生物脱氮工艺和新型生物脱氮工艺的比较
Table 2 Comparison of conventional and novel biological nitrogen removal technologies and processes

工艺或技术	所需反应器个数	运行条件	需氧量	电子供体	需碳源量	污泥产量	菌种	反应器构造
传统工艺	2	好氧 + 缺氧	高	碳源	高	高	硝化菌 + 异养菌	活性污泥和生物膜
短程	2	好氧 + 缺氧	低	碳源	低	低	氨氧化菌 + 异养菌	活性污泥和生物膜
ANAMMOX	1	厌氧	不需要	氨氮	不需要	低	厌氧氨氧化菌	固定床或流化床、气提反应器、SBR
CANON	1	限氧	低	氨氮	不需要	低	氨氧化菌 + 厌氧氨氧化菌	固定床或流化床、SBR

4 结语 (Concluding remarks)

在低 C/N 条件下, 传统生物脱氮工艺不能达到高效脱氮目的时, 可从以下两个方面来考虑提高脱氮效率. 一、改进传统生物脱氮工艺, 充分利用原水中的碳源, 达到高效脱氮的目的; 二、应用新理论、新工艺, 减少脱氮过程中所需要的碳源, 最终也可达到高效脱氮的目标. 低 C/N 污水共性是都缺少碳源, 但其组成成分复杂多样, 为了达到高效脱氮的目的, 应结合实际污水性质及现存的污水处理设施, 选择和确定合适的处理技术和工艺.

参考文献 (References):

Anthonisen A C, Loehr R C, Parkason T B S. 1976. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid [J]. *JW at Pollut Control Fed*. 48(5): 65—71

Baeza JA, G abrielD, Lafuente J. 2004. Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic (A2/O) wastewater treatment plant (WWTP) [J]. *Process Biochemistry*, 39 (11): 1615—1624

操家顺, 王超, 蔡娟. 2007. 低浓度氨氮污水厌氧氨氧化影响因素试验 [J]. *南京理工大学学报*, 31(6): 775—779

Cao J S, Wang C, Cai J. 2007. Factors affecting the ANAMMOX process under low ammonia concentration [J]. *Journal of Nanjing*

University of Science and Technology (Natural Science), 31(6): 775—779 (in Chinese)

陈卫国, 徐涛, 彭玉凡, 等. 2002. 电催化系统-电生物炭接触氧化床处理垃圾渗滤液 [J]. *中国环境科学*, 22(2): 146—149

Chen W G, Xu T, Peng Y F, *et al*. 2002. The method of ECS-EBACOR for treating landfill leachate [J]. *China Environmental Science* 22 (2): 146—149 (in Chinese)

邓良伟, 蔡昌达, 陈铭铭, 等. 2002. 猪场废水厌氧消化液后处理技术研究及工程应用 [J]. *农业工程学报*, 18(3): 92—94

Deng LW, Cai C D, Chen G M, *et al*. 2002. Study and application of technology for post treatment of anaerobically digested effluent of piggery wastewater [J]. *Transactions of the CSAE*, 18(3): 92—94 (in Chinese)

方建章, 黄少斌. 1999. 生化法处理煤气废水 [J]. *环境污染与防治*, 21(4): 10—12

Fang J Z, Hang S B. 1999. Treatment of coal gas wastewater by biochemical process [J]. *Environmental Pollution & Control* 21 (4): 10—12 (in Chinese)

Graaf A A, Mulder A, de Bruijn P, *et al*. 1995. Anaerobic Ammonium Oxidation is a biologically mediated process [J]. *Appl Environ Microbiol* 61(4): 1246—1251

郭建华, 彭永臻, 杨庆, 等. 2007. 脉冲 SBR 处理城市污水深度脱氮的工艺特性 [J]. *中国环境科学*, 27(1): 62—66

Guo JH, Peng Y Z, Yang Q, *et al*. 2007. The characteristics of the pulsed SBR for advanced nitrogen removal of municipal wastewater [J]. *China Environmental Science*, 27(1): 62—66 (in Chinese)

Jetten M S M, Strous M, Paschoonen T K, *et al*. 1999. The Anaerobic

- Oxidation of Ammonium [J]. FEMS Microbiology Reviews 22: 421—437
- Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. 1996. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system [J]. Water Research 30(7): 1702—1710
- Laanbroek H J, Bodelier P L E, Gerards S. 1994. Oxygen consumption kinetics of *Nitrosomonas enrpaea* and *Nitrobacter hamburgensis* grown in mixed continuous cultures at different oxygen concentrations [J]. Arch Microbiol 161: 156—162
- 李凌云, 周利, 彭永臻, 等. 2007. 脉冲式 SBR法深度脱氮及在线控制的中试实验研究 [J]. 环境污染与防治, 29(9): 685—688
- Li L Y, Zhou L, Peng Y Z, *et al*. 2007. Pilot-scale experiment study of advanced nitrogen removal and on-line control of the pulsed SBR [J]. Environmental Pollution & Control 29(9): 685—688 (in Chinese)
- Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al*. 2005. Fuzzy control of nitrate recirculation and external carbon addition in A/O nitrogen removal process [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering 13(2): 244—249
- Strous M, van Gerven E, Kuenen J G, *et al*. 1997. Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (Anammox) sludge [J]. Appl Microbiol Biotechnol 63(6): 2446—2448
- Thandrup B, Dalgaard T. 2002. Production of N_2 through anaerobic ammonia oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments [J]. Appl Environ Microbiol 68(3): 1312—1318
- Third K, Slikers A O, Kuenen J G, *et al*. 2001. The CANON System (Completely Autotrophic Nitrogen removal Over Nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria [J]. Syst Appl Microbiol 24(4): 588—596
- Verstraete W, Philips S. 1998. Nitrification-denitrification processes and technologies in new contexts [J]. Environ Pollut 102 (S1): 717—726
- 王伟, 彭永臻, 王海东, 等. 2006. 溶解氧对分段进水生物脱氮工艺的影响 [J]. 中国环境科学, 26(3): 293—297
- Wang W, Peng Y Z, Wang H D, *et al*. 2006. The effect of dissolved oxygen on the lab-scale step-feed biological nitrogen removal process [J]. China Environmental Science 26(3): 293—297 (in Chinese)
- Yang Q, Peng Y Z, Liu X H, *et al*. 2007. Nitrogen removal via nitrite from municipal wastewater at low temperatures using real-time control to optimize nitrifying communities [J]. Environ Sci Technol 41(23): 8159—8164
- 祝贵兵, 彭永臻, 吴淑云, 等. 2005. 碳氮比对分段进水生物脱氮的影响 [J]. 中国环境科学, 25(6): 641—645
- Zhu G B, Peng Y Z, Wu S Y, *et al*. 2005. Influence of C/N ratio on the biological nitrogen removal in step-feed process [J]. China Environmental Science 25(6): 641—645 (in Chinese)
- Zhu G B, Peng Y Z, Wang S Y, *et al*. 2007. Effect of influent flow rate distribution on the performance of step-feed biological nitrogen removal process [J]. Chemical Engineering Journal 131 (1-3): 319—328