

低温废水生物脱氮工艺的研究进展

马 春, 金仁村

(杭州师范大学生命与环境科学学院, 浙江杭州 310036)

[摘要] 低温废水普遍存在, 生物脱氮工艺对温度变化敏感, 低温将会影响脱氮效率。概述了低温对硝化工艺、反硝化工艺以及厌氧氨氧化工艺的影响, 并重点探讨了在低温下保持较高脱氮效率的应对策略, 主要包括菌种流加、接种耐冷菌、生物固定化、驯化等。

[关键词] 生物脱氮; 低温; 固定化; 驯化

[中图分类号] X703.1 [文献标识码] A [文章编号] 1005-829X(2012)06-0001-05

Research progress in the biological denitrification from low temperature wastewater

Ma Chun, Jin Rencun

(School of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China)

Abstract: Low temperature wastewater exists widely. Biological denitrification process is sensitive to temperature changes. The effects of low temperature on nitrification, denitrification and anaerobic ammonia oxidation processes are summarized. The countermeasures for keeping denitrification efficiency at low temperature are discussed emphatically, mainly including sequential biocatalyst addition, seeding with psychrotrophs, biological immobilization, and acclimation.

Key words: biological denitrification; low temperature; immobilization; acclimation

氮素在水体中的过度积累造成了水体富营养化现象, 严重危害生态系统安全。一般采用生物法进行废水脱氮^[1]。硝化反硝化工艺是应用最普遍的生物脱氮工艺。最近十几年, 出现了一些新的脱氮工艺^[2]。厌氧氨氧化工艺是其中最具有代表性的突破之一。该方法是利用自养型细菌将氨直接氧化为氮气而实现脱氮的工艺, 与传统的硝化反硝化工艺相比具有耗氧量低、运行费用少和不需要外加碳源等优点, 是目前已知工艺中最经济的生物脱氮途径之一^[3]。

生物反应对环境条件敏感, 容易受温度变化影响^[1]。绝大多数微生物正常生长温度为 20~35 °C, 低温会影响微生物细胞内酶的活性, 在一定温度范围内, 温度每降低 10 °C, 微生物活性将降低 1 倍, 从而降低了对污水的处理效果^[4]。工艺投入运行后, 由于四季的交替和所处的地理位置影响, 若不加以人工调控, 温度很难保持适宜。而温度调控则会耗费大量的能源。解决这一难题的最佳途径就是开发高效稳定的低温生物处理工艺。

近年来国内外已有一些研究涉及低温废水生物脱氮技术, 提出了一些新方法。笔者将探讨低温对脱氮工艺的影响, 比较低温脱氮工艺的运行策略, 并据此指出低温脱氮工艺的研发方向。

1 低温对脱氮工艺的影响

温度是影响细菌生长和代谢的重要环境条件。绝大多数微生物正常生长温度为 20~35 °C。温度主要是通过影响微生物细胞内某些酶的活性而影响微生物的生长和代谢速率, 进而影响污泥产率、污染物的去除效率和速率; 温度还会影响污染物降解途径、中间产物的形成以及各种物质在溶液中的溶解度, 以及有可能影响到产气量和成分等^[5]。低温减弱了微生物体内细胞质的流动性, 进而影响了物质传输等代谢过程, 并且普遍认为低温将会导致活性污泥的吸附性能和沉降性能下降, 以及使微生物群落发生变化^[6]。低温对微生物活性的抑制, 不同于高温带来的毁灭性影响, 其抑制作用通常是可恢复的^[7]。

1.1 硝化工艺

生物硝化反应可以在 4~45 °C 的温度范围内进行。氨氧化细菌(AOB)最佳生长温度为 25~30 °C,亚硝酸氧化细菌(NO₂-B)的最佳生长温度为 25~30 °C^[1]。温度不但影响硝化菌的生长,而且影响硝化菌的活性。有研究表明^[8],硝化细菌最适宜的生长温度为 25~30 °C,当温度小于 15 °C 时硝化速率明显下降,硝化细菌的活性也大幅度降低,当温度低于 5 °C 时,硝化细菌的生命活动几乎停止。大量的研究表明^[9],硝化作用会受到温度的严重影响,尤其是温度冲击的影响更加明显。由于冬季气温较低而未能实现硝化工艺稳定运行的案例较为常见^[10-11]。U. Sudarmo 等^[12]考察了温度变化对硝化作用的影响,结果表明,温度从 12.5 °C 升至 40 °C,氨氧化速率增加,但当温度下降至 6 °C 时,硝化菌活性很低。

随着脱氮工艺的不断发展和人们对硝化工艺提出了更高的要求,希望将硝化作用的反应产物控制在亚硝酸盐阶段,作为反硝化或者厌氧氨氧化的前处理技术,可以节约曝气能耗和添加碱量。通过对两类硝化细菌(AOB、NO₂-B)的更多认识,出现了短程硝化工艺。该工艺的核心是选择性地富集 AOB,先抑制再限制最后冲洗出 NO₂-B,使得 AOB 具有较高的数量而淘汰 NO₂-B,从而维持稳定的亚硝酸盐积累^[13]。短程硝化过程通常由控制温度、溶解氧、pH 来实现^[1]。温度控制短程硝化的基础在于两类硝化细菌对温度的敏感性不同^[14],25 °C 以上时,AOB 的最大比生长速率大于 NO₂-B 的最大比生长速率。据此提出了世界上第一个工业化应用的短程硝化工艺——SHARON 工艺(温度设置为 30~40 °C^[1])。因此,在低温下实现短程硝化颇具挑战。

1.2 反硝化工艺

低温对于反硝化有显著的抑制作用,Jicheng Zhong 等^[15]研究了太湖沉积物中的反硝化作用,经过数月的实验分析发现反硝化速率呈现季节性变化。U. Welander 等^[16]考察了低温条件下(3~20 °C)反硝化工艺的运行性能,研究表明在 3 °C 下反应器的反硝化速率仅为 15 °C 下的 55%。相对于传统的缺氧反硝化,温度对好氧反硝化的脱氮效率影响不显著,王弘宇等^[17]筛选出一株好氧反硝化菌,在 25~35 °C 下都能达到大于 78% 的脱氮效率。表 1 概括了不同温度下的反硝化速率^[16,18-20]。

1.3 厌氧氨氧化工艺

有学者的研究表明,能够进行厌氧氨氧化反应

的温度范围为 6~43 °C^[21],最佳温度为 28~40 °C^[22-23]。在废水生物处理中,活化能的取值范围通常为 8.37~83.68 kJ/mol,而厌氧氨氧化的活化能为 70 kJ/mol。因此,厌氧氨氧化属于对温度变化比较敏感的反应类型,温度的降低对其抑制作用明显^[24]。

表 1 不同温度下的反硝化速率

反应器类型	温度/°C	HRT/h	反硝化速率
悬浮载体生物膜反应器	20	0.92	4.6
	15	0.83	2.7
	11	0.89	2.5
	7	1.33	1.6
	3	1.41	1.5
移动床生物膜反应器	8.0~8.8	0.3~0.6	1.8
	9.1~16	0.3~0.6	2.2
固定床生物膜反应器	5	—	4.26
	14.9	24	0.17
升流式反应器	14.1	24	0.12
	13.5	24	0.06
	11.05	24	0.045

注:升流式反应器的反硝化速率以 g/(g·d) 为单位;其余反应器的反硝化速率均以 g/(m²·d)。

低温对厌氧氨氧化的影响很大,受低温抑制后需要较长时间才能恢复。厌氧氨氧化工艺的运行温度从 18 °C 降至 15 °C 时,亚硝酸盐不能被完全去除,导致亚硝酸盐的积累,对厌氧氨氧化工艺有着显著的抑制效果,从而引起连锁效应,使得厌氧氨氧化菌失活^[6,25]。J. Dosta 等^[7]在研究温度对厌氧氨氧化工艺的长期影响时,将试验温度由 30 °C 调至 15 °C,只有氮容积负荷(NLR)从 0.3 kg/(m³·d)大幅降低至 0.04 kg/(m³·d)才能保证出水水质。甚至经 30 d 的驯化仍未见好转,将试验温度调回至 30 °C 运行 75 d 后,污泥活性仅为 0.02 g/(g·d),处于较低水平。

2 脱氮工艺的低温运行改进方法

2.1 菌种流加

菌种流加来源于发酵工艺的菌种扩大培养技术。菌种扩大培养技术是发酵工业中广泛采用的一种菌种应用技术,在批次发酵中,一般通过“试管→三角瓶→种子罐→发酵罐”的多级扩增,使菌量满足生产需要^[26]。在废水脱氮工艺中,除装置内菌种自身增殖外,流加菌种有利于加快菌体积累。废水水质复杂,毒性物质、基质、pH、温度等因素的不稳定,都会对功能菌造成抑制。在受抑制条件下,微生物难以生长。因此菌种流加的优势得以体现。

唐崇俭等^[26]采用菌种流加式厌氧氨氧化工艺处理制药废水,废水中 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 的质量浓度分别为 120~200 mg/L 和 160~240 mg/L,菌种流加速

率为 $0.028 \text{ g}/(\text{L}\cdot\text{L}\cdot\text{d})$, 容积氮去除负荷(NRR)由 $0.1 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 提高至 $7.9 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。并且认为流加菌种不仅增加了反应器内的污泥浓度和厌氧氨氧化菌所占比例, 可能还带入了一些未知的生长因子, 才能在如此低的流加速率下, 实现厌氧氨氧化的高效运行^[27]。

菌种流加有望成为低温下运行生物反应器的一种有效对策。何成达^[28]的研究表明在低温期间为保证正常的硝化速率, 需要增大反应器的容积。通过向活性污泥系统投加硝化菌的方法可有效解决低温时期需要延长泥龄和加大反应器容积的问题。

菌种流加的操作灵活, 不需要长期的适应调整时间, 是一种应对低温冲击的快速有效方法, 但是不能从根本上解决低温下反应器运行效率低的问题, 仅是增加反应器内功能菌的数量及其在混合污泥的比例, 缓解低温对生物处理的影响, 在反应器容积有限时不适合长期采用。

2.2 接种耐冷菌

接种物对于低温条件下厌氧反应器启动运行具有重要的意义^[29]。耐冷菌能够耐受温度波动, 比较适合低温废水的处理。如反硝化耐冷菌——荧光假单胞菌能够在低于 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下降解苯二甲酸^[30], 也有耐冷菌能在低温下降解甲苯、氯酚等难降解有机物^[31-32]。目前的研究重点关注了接种耐冷菌在低温产甲烷系统中的意义, 如贲岳等^[33]为确保寒冷地区污水生物处理系统的有效运行, 接种耐冷微生物, 用于生活污水的处理, 在 $6\sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 成功地去除污水中 86.7% 的 COD。左剑恶等^[29]关注了嗜冷产甲烷菌及其在废水厌氧处理中的应用, 从分离培养及生理生化特性、适冷机制和分子生物学研究等方面, 对嗜冷产甲烷菌的研究进展进行了全面的综述, 并指出接种物对于低温条件下厌氧反应器的启动很重要。

氨氧化古菌(AOA)是一类能够在低温下保持活性的古细菌。如果能将 AOA 应用到低温废水的生物处理中, 将会推动生物脱氮工艺的发展。这可以作为今后研究的一个重要方向。

2.3 生物固定化

经固定化处理后, 微生物的抗逆性能提高, 能耐受外界环境的变化, 从而保持了较高的活性。此外, 微生物经包埋固定后滞留能力得以增强, 可望实现反应器的快速启动和高效稳定运行^[34]。

通过固定化可以削弱温度变化对硝化作用的影响。张爽等^[35]研究了固定化硝化菌在不同温度下对

氨氮的去除效能, 采用聚乙烯醇-硼酸包埋法固定常温富集培养的含耐冷菌的硝化污泥, 用于处理常温和低温生活污水。结果表明, 经过固定化处理的硝化菌群即使在低温条件下, 也表现出了较高的硝化效率($>80\%$)。也有学者开展了固定化反硝化细菌脱氮的研究, 结果表明, 经过固定化处理, 提高了反硝化细菌对温度的适应性, 固定化反硝化细菌对高浓度的铵离子和低温的耐受性增加^[36]。B. K. Pathak 等^[37]在低温厌氧氨氧化的研究中通过接种固定化微生物和厌氧颗粒污泥处理低含氮废水, 在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下成功启动厌氧氨氧化, NRR 达到了 $16.22 \text{ g}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$, 总氮去除率为 92% 。L. M. Quan 等^[38]以聚乙烯醇(PVA)凝胶和 1% 的藻酸作为厌氧氨氧化菌的包埋材料, 在 $(25\pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 厌氧氨氧化工艺的 NRR 达到了 $8.0 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

固定化是一种有效的技术手段, 然而也会使微生物活性有所降低, 且固定化后, 传质阻力会增大, 氧的传质阻碍尤为明显^[39], 固定化更能在厌氧条件下发挥其优势。此外, 其成本也有待技术经济评估。

2.4 驯化

驯化就是人为的在某一特定环境条件长期处理某一微生物群体, 同时不断将它们进行移种传代, 以达到累积和选择合适的自发突变体的一种古老育种方法^[40]。微生物的驯化是脱氮工艺运用到低温环境中的重要措施, 使微生物体内的酶和细胞膜的脂类组成能够适应低温环境, 并能在低温条件下发挥作用^[6]。大量研究表明^[41-43], 通过适当的驯化策略, 经历一定的驯化时间, 低温脱氮工艺可以实现稳定运行。

R. D. Jones 等^[44]认为, 如果将 AOB 的运行温度从 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 直接降至 $5 \text{ }^\circ\text{C}$, 会导致其失活。逐步降低运行温度, AOB 可调整细胞膜中的脂肪酸类型使其在低温条件下不易冻结。后来一些研究得到了与此相悖的结论^[25, 43-44]。因此有学者开始探索低温的驯化策略。

2.4.1 逐步驯化

逐步驯化即逐步较缓慢地将工艺温度由适宜温度降至目标温度。在驯化微生物适应当前温度下再将其温度降低, 进一步驯化。尚会来等^[41]采用驯化方式, 逐步降低温度, 每降 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 就稳定一个多月, 半年后不刻意控制温度, 经历了冬季 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温, 成功地稳定了常温、低温短程硝化反硝化, 亚硝化率始终维持在 78.8% 以上。J. Dosta 等^[7]通过该方法在 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 成功启动并稳定运行厌氧氨氧化工艺, 但将温度降至 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 工艺系统失稳; 并认为优化的操作步骤应

为:先在厌氧氨氧化最适温度下,积累足够的厌氧氨氧化生物量,然后再缓慢驯化微生物适应低温条件。

2.4.2 直接驯化

直接驯化就是将反应系统直接置于目标温度下进行驯化。K. Isaka 等^[24,42]研究了在适度的低温(20~22℃)下,厌氧生物滤池中利用厌氧氨氧化实现高效的脱氮。通过直接将接种污泥置于 20~22℃的环境下培养,在经过 446 d 后,NLR 达到 8.1 kg/(m³·d)。还在 6℃检测到了微生物厌氧氨氧化活性。NLR 由 22℃时的 2.8 kg/(m³·d)降至 6℃的 0.36 kg/(m³·d)。

杨朝晖等^[43]对比了两种驯化策略下厌氧氨氧化工艺的启动时间,接种以短程硝化-厌氧氨氧化协同作用为优势反应的厌氧序批生物膜反应器中的生物膜(温度为 31℃),置于 16℃的生化培养箱中驯化,最快 56 d 成功启动了低温厌氧氨氧化;接种与前者相同的生物膜,首先置于 31℃的生化培养箱中,然后以每 12 d 降低 3℃的速度为梯度逐步降温至 16℃,最慢 70 d 驯化结束,其驯化结束的标志是在 16℃的环境温度下氨氮的去除效率在 1 周左右维持稳定。

以往的研究表明,微生物对温度的逐步降低较为适应,如若温度突然降低,则易引起系统的失稳;但较近的研究表明,直接将温度降至目标温度,驯化的时间可能会更短一些。对此尚需系统的研究来论证,试验现象背后的机理仍有待揭示。

3 结论

目前低温废水生物脱氮技术的研究已经引起众多学者的兴趣,很多研究结果表明,温度的降低会导致生物脱氮工艺启动时间显著延长,处理负荷和处理效率大幅降低。通过菌种流加、接种耐冷菌、细胞固定化和驯化等有效技术手段,能够提高低温废水生物脱氮工艺的高效性和稳定性。结合目前的研究现状,低温脱氮工艺未来的研究可以围绕下面几点展开:

(1)耐冷菌的分离富集。将分子生物学技术应用用于耐冷菌的筛选,将筛选出的菌种富集培养,用作接种物或者流加菌种,并建立菌群动态变化指示系统,指导低温脱氮系统的调控。(2)加大古菌的研究力度。研究古菌的培养特性,将可培养的脱氮古菌用于废水处理,提高系统对低温和极端环境的耐受性。这方面的研究有望成为今后的热点。(3)菌种流加过程的优化和控制。深入研究厌氧氨氧化菌的生长和代

谢动力学特性,获得菌种流加的定量参数;引进自动化控制技术,实现对该技术过程的自动化控制。(4)多技术耦合。通过多种技术手段的结合,强化低温生物脱氮工艺。例如在较低温度下通过接种低温优势菌实现了工艺启动后,通过菌种流加优化低温生物脱氮过程,提高其抗冲击能力。

[参考文献]

- [1] 郑平,徐向阳,胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2004:12-15.
- [2] Komaros 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.
- [3] 郑平,冯孝善,Jetten M S M,等. ANAMMOX 流化床反应器性能的研究[J]. 环境科学学报,1998,18(4):367-372.
- [4] 王建华,陈永志,彭永臻. 低碳氮比实际生活污水 A₂O-BAF 工艺低温脱氮除磷[J]. 中国环境科学,2010,30(9):1195-1200.
- [5] 金仁村,郑平,黄可谈,等. 环境和水质条件冲击下厌氧生物反应器的稳定性研究进展[J]. 化工进展,2006,26(5):13-17.
- [6] 韩晓云. 低温生物膜及其微生物特性的研究[M]. 哈尔滨:黑龙江大学出版社,2009:3-6.
- [7] Dosta J, Fernandez I, Vazquez-Padin J R. Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process[J]. J. Hazard. Mater., 2007, 154(1/2/3):1-6.
- [8] Mauret M, Paulion E, Peutch-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.
- [9] Ducey T F, Vanotti M B, Shriner A D, et al. Characterization of a microbial community capable of nitrification at cold temperature[J]. Bioresour. Technol., 2010,101(2):491-500.
- [10] Ilies P, Mavinic D S. The effect of decreased ambient temperature on the biological nitrification and denitrification of a high ammonia landfill leachate[J]. Water Res., 2001,35(8):2065-2072.
- [11] Kim D J, Lee D I, Keller J. Effect of temperature and free ammonia on nitrification and nitrite accumulation in landfill leachate and analysis of its nitrifying bacterial community by FISH[J]. Bioresour. Technol., 2006,97(3):459-468.
- [12] Sudarno U, Winter J, Gallert C. Effect of varying salinity, temperature, ammonia and nitrous acid concentrations on nitrification of saline wastewater in fixed-bed reactors[J]. Bioresour. Technol., 2011,102(10):5665-5673.
- [13] Guo Jianhua, Peng Yongzhen, Wang Shuying, et al. Long-term effect of dissolved oxygen on partial nitrification performance and microbial community structure[J]. Bioresour. Technol., 2009,100(11):2796-2802.
- [14] Vázquez-Padín J R, Figueroa M, Campos J L, et al. Nitrifying granular systems: A suitable technology to obtain stable partial nitrification at room temperature[J]. Sep. Purif. Technol., 2010,74(2):178-186.
- [15] Zhong Jicheng, Fan Chengxin, Liu Guofeng, et al. Seasonal variation

- of potential denitrification rates of surface sediment from Meiliang Bay, Taihu Lake, China [J]. *J. Environ. Sci.*, 2010, 22(7): 961-967.
- [16] Welander U, Mattiasson B. Denitrification at low temperatures using a suspended carrier biofilm process [J]. *Water Research*, 2003, 37(10): 2394-2398.
- [17] 王弘宇, 马放, 苏俊峰, 等. 好氧反硝化菌株的鉴定及其反硝化特性研究 [J]. *环境科学*, 2007, 28(7): 1548-1552.
- [18] Given B, Meyer S. Biological treatment of tailings solution at the nickel plate mine [C] // *Proceedings of the 22nd Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium*, Penticton, British Columbia, 1998: 57-171.
- [19] Rusten B, Hem L J, Odegaard H. Nitrogen removal from dilute wastewater in cold climate using moving-bed biofilm reactors [J]. *Water Environ. Res.*, 1995, 67(1): 65-74.
- [20] Sun Hongwei, Yang Qing, Peng Yongzhen, et al. Advanced landfill leachate treatment using a two-stage UASB-SBR system at low temperature [J]. *J. Environ. Sci.*, 2010, 22(4): 481-485.
- [21] Thamdrup B, Dalsgaard T. Production of N₂ through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2002, 68(3): 1312-1318.
- [22] Jetten M S M, Strous M, van de Pas-Schoonen K T, et al. The anaerobic oxidation of ammonium [J]. *FEMS Microbiol. Rev.*, 1998, 22(5): 421-437.
- [23] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH 和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响 [J]. *环境科学*, 2006, 27(4): 691-695.
- [24] Isaka K, Date Y, Kimura Y, et al. Nitrogen removal performance using anaerobic ammonium oxidation at low temperatures [J]. *FEMS Microbiol. Lett.*, 2008, 282(1): 32-38.
- [25] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, 50(5): 589-596.
- [26] 唐崇俭, 郑平, 陈建伟. 流加菌种对厌氧氨氧化工艺的影响 [J]. *生物工程学报*, 2011, 27(1): 1-8.
- [27] Tang Chongjian, Zheng Ping, Chen Tingting, et al. Enhanced nitrogen removal from pharmaceutical wastewater using SBA-ANAMMOX process [J]. *Water Research*, 2011, 45(1): 201-210.
- [28] 何成达. 投加硝化菌的活性污泥工艺硝化效率特性 [J]. *环境化学*, 2002, 21(6): 581-583.
- [29] 左剑恶, 邢薇. 嗜冷产甲烷菌及其在废水厌氧处理中的应用 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 2127-2132.
- [30] Chauret C, Mayfield C I, Inniss W E. Biotransformation of di-*n*-butyl phthalate by a psychrotrophic *Pseudomonas fluorescens* (BGW) isolated from subsurface environment [J]. *Can. J. Microbiol.*, 1995, 41(1): 54-63.
- [31] Jarvinen K T, Melin E S, Puhakka J A. High rate bioremediation of chlorophenol contaminated groundwater at low temperatures [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 1994, 28(13): 2387-2392.
- [32] Pignatello J J, Johnson L K, Martinson M M. Response of the microflora in outdoor experimental streams to pentachlorophenol: environmental factors [J]. *Can. J. Microbiol.*, 1986, 32(1): 38-46.
- [33] 贲岳, 陈忠林, 徐贞贞, 等. 固定化耐冷菌用于内循环复合生物反应器处理生活污水及其微生物学研究 [J]. *科学通报*, 2008, 53(21): 2661-2667.
- [34] 朱刚利, 胡勇. 不同材料包埋固定化厌氧氨氧化混培物 [J]. *环境科学学报*, 2008, 28(9): 1861-1866.
- [35] 张爽, 姜蔚, 徐桂芹, 等. 固定化硝化菌在不同温度下对氨氮的去除效能研究 [J]. *环境科学与管理*, 2008, 33(5): 91-95.
- [36] 田晋红, 熊平, 董莉仙, 等. 固定化反硝化细菌脱氮的研究 [J]. *西南农业大学学报*, 2004, 26(3): 318-321.
- [37] Pathak B K, Kazama F, Tanaka Y, et al. Quantification of anammox populations enriched in an immobilized microbial consortium with low levels of ammonium nitrogen and at low temperature [J]. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2007, 76(5): 1173-1179.
- [38] Quan L M, Khanh D P, Hira D, et al. Reject water treatment by improvement of whole cell anammox entrapment using polyvinyl alcohol/alginate gel [J]. *Biodegradation*, 2011, 22(6): 1155-1167.
- [39] Isaka K, Yoshie S, Sumino T, et al. Nitrification of landfill leachate using immobilized nitrifying bacteria at low temperatures [J]. *Biochem. Eng. J.*, 2007, 37(1): 49-55.
- [40] Jiang Xia, Luo Yiqun, Yan Rong, et al. Impact of substrates acclimation strategy on simultaneous biodegradation of hydrogen sulfide and ammonia [J]. *Bioresour. Technol.*, 2009, 100(23): 5707-5713.
- [41] 尚会来, 彭永臻, 张静蓉, 等. 温度对短程硝化反硝化的影响 [J]. *环境科学学报*, 2009, 11(3): 516-520.
- [42] Isaka K, Sumino T, Tsuneda S. High nitrogen removal performance at moderately low temperature utilizing anaerobic ammonium oxidation reactions [J]. *J. Biosci. Bioeng.*, 2007, 103(5): 486-490.
- [43] 杨朝晖, 徐峥勇, 曾光明, 等. 不同低温驯化策略下的厌氧氨氧化活性 [J]. *中国环境科学*, 2007, 27(3): 300-305.
- [44] Jones R D, Morita R Y, Koops H P, et al. A new marine ammonium-oxidizing bacterium, *Nitrosomonas cryotolerans* sp. Nov. [J]. *Can. J. of Microbiol.*, 1988, 34(10): 1122-1128.

[作者简介] 马春(1986—), 2009级杭州师范大学生命与环境科学在读研究生。电话: 155158063745。通讯联系人: 金仁村, 副教授, E-mail: jrczju@yahoo.com.cn。

[收稿日期] 2012-03-27(修改稿)