

异养硝化细菌脱氮特性及研究进展

苟 莎 黄 钧*

(中国科学院成都生物研究所 四川 成都 610041)

摘 要: 异养硝化细菌能够在利用有机碳源生长的同时将含氮化合物硝化生成羟胺、亚硝酸盐、硝酸盐等产物,多数还能同时进行好氧反硝化作用,直接将硝化产物转化为含氮气体。因此,这类细菌已成为废水处理中生物脱氮新工艺的重要研究对象。本文综述了目前所分离出的一些异养硝化菌的脱氮特性,分析了各种环境条件如温度、pH、溶解氧、碳源类型、C/N 以及抑制剂等对异养硝化菌的影响,并介绍了异养硝化菌的应用现状及前景。

关键词: 异养硝化细菌, 异养硝化, 好氧反硝化

Advances in Denitrification Characteristics of Heterotrophic Nitrification Bacteria

GOU Sha HUANG Jun*

(Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Heterotrophic nitrification bacteria are able to utilize organic carbon sources to grow and produce hydroxylamine, nitrite and nitrate from nitrogen compounds, and most of them can also denitrify these products to gaseous nitrogen compounds simultaneously. Therefore, more and more attentions are paid to heterotrophic nitrification bacteria for wastewater treatment. This paper reviews the denitrification characteristics of some isolated heterotrophic nitrification bacteria, and analyzes the influence of various conditions to the heterotrophic nitrification bacteria, such as temperature, pH, DO, carbon sources, C/N, and inhibitors, etc. At last, the present situation and potential applications of wastewater treatment by heterotrophic nitrification bacteria are introduced.

Keywords: Heterotrophic nitrification bacteria, Heterotrophic nitrification, Aerobic denitrification

近二十多年来,研究者各种环境中分离并鉴定了一些特殊的菌株,这些菌株可以利用有机碳源生长并进行硝化作用。因此,人们把这类具有异养硝化功能的菌株统称为异养硝化菌。而且,多数异养硝化菌同时还具有好氧反硝化作用,可以直接将氨氮转化为气态氮化合物排出系统。与自养型硝化

菌比较,异养硝化菌的生长速率快,细胞产量高^[1],需要的溶解氧浓度低,能耐受酸性环境且活性高^[2],并且能够代谢各种形态的氮化合物,同时提高COD的去除率^[1]。由于异养硝化菌的出现,工艺上可以实现在一个反应器里完成硝化反硝化,不仅可以降低运行成本,减少工艺上繁琐的操作,还可以扩大自

养硝化菌所不能处理的水质范围。鉴于这些优点和实用性,异养硝化菌日益受到人们的重视。本文就异养硝化菌的脱氮特性及其研究进展和应用现状进行概述。

1 异养硝化菌的发现及其脱氮特性

异养硝化现象很早以前就为人们所知。由于过去监测硝化现象都是通过测定其硝化产物(硝酸盐、亚硝酸盐)来确定硝化作用的强度和有无,而多数异养硝化微生物在硝化同时还具有反硝化作用,所以积累硝化产物相对自养硝化菌要少。因此,人们认为在自然界中异养硝化作用甚微,而自养硝化作用占主要地位,只有在不适合自养硝化菌生长的环境条件下异养硝化微生物才可能占主导地位^[3,4]。然

而,最近几年通过优化监测手段,陆续有报道证明,在自然界主要是土壤里的生物硝化过程中,异养硝化微生物同样起着不可忽视的作用^[5],特别是在酸性森林土壤里异养硝化作用占主导地位^[5,6]。近年来,国内外研究者从环境中分离出多株具有异养硝化功能的微生物,这些微生物不仅可以高效去除COD和氨氮,多数还具有好氧反硝化功能,且脱氮效率显著。因此,异养硝化微生物受到了广泛关注。

据文献报道,异养硝化微生物多存在于藻类、放线菌、真菌和细菌中^[7,8]。由于其遗传背景的差异性,不同的异养硝化微生物其各自生长及硝化特点都有所不同。在这里,将目前分离出的具代表性的一些异养硝化细菌的主要脱氮特性作了比较,见表1。

表1 一些异养硝化菌的脱氮特性
Table 1 The denitrification characteristics of some heterotrophic nitrification bacteria

菌株类型 Strain type	来源 Original place	硝化产物 Nitrification product			反硝化产物 Denitrification product		
		羟胺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N ₂	NO	N ₂ O
<i>Acinetobacter</i> sp. ^[9]	ABS ⁽¹⁾ 废水处理系统	/	+	+	/	/	/
<i>Acinetobacter</i> sp. YY4* ^[10]	活性污泥	/	-	+	/	/	/
<i>Alcaligenes faecalis</i> NH17* ^[11]	土壤	/	+	+	-	-	+
<i>Alcaligenes faecalis</i> No. 4* ^[12,13]	活性污泥	+	+	+	+	-	+
<i>Alcaligenes faecalis</i> subsp. <i>parafaecalis</i> * ^[14]	/	/	+	+	/	+	+
<i>Arthrobacter</i> sp. (strain9006) ^[15]	湖水	/	+	-	/	/	/
<i>Arthrobacter</i> B _D ^[6]	酸性土壤	/	+	+	/	/	/
<i>Bacillus</i> sp. LY* ^[16]	MBR系统	+	+	-	+	-	+
<i>Bacillus subtilis</i> ^[17]	粪肥	/	-	+	-	-	-
<i>Corynebacterium</i> sp. ^[9]	ABS ⁽¹⁾ 废水处理系统	/	+	+	/	/	/
<i>Diaphorobacter</i> sp.* ^[18]	染料废水	/	+	-	/	/	/
<i>Pseudomonas azalaica</i> PB16* ^[19]	/	/	+	-	-	-	+
<i>Pseudomonas alcaligenes</i> AS-1* ^[20]	养猪废水	/	-	-	+	-	+
<i>Pseudomonas putida</i> [#] [21]	云杉土壤	+	+	+	/	+	-
<i>Pseudomonas putida</i> sp. DNI. 2* ^[22]	反应器	/	-	-	/	/	/
<i>Rhodococcus</i> sp. HN* ^[18]	大棚土壤	/	+	-	/	/	/
<i>Thiosphaera pantotropha</i> * ^[23]	污水处理厂	/	+	-	+	/	+
<i>Thermus</i> sp.* ^[24]	火山口, 烟囱	/	+	-	/	/	/
<i>Xanthomonas</i> sp. ^[9]	ABS ⁽¹⁾ 废水处理系统	/	+	+	/	/	/

注: +: 检测到产物生成; -: 未检测到产物生成; /: 文献未提及; #: 具有厌氧反硝化功能; *: 具有好氧或兼氧反硝化功能; ABS⁽¹⁾: 含有丙烯腈、丁二烯、苯乙烯(styrene)的废水。

Note: +: Product detected; -: No product detected; /: No mention in the reference; #: Anaerobic denitrification; *: Aerobic or facultative aerobic denitrification; ABS⁽¹⁾ correspond to the wastewater contains acrylonitrile, butadiene and styrene.

2 异养硝化菌脱氮影响因素

不同的异养硝化菌对于环境参数的反应并不一致,但他们对于氧浓度,氨浓度的反应相似^[25]。总的来说,影响异养硝化菌生长硝化的主要因素有:有机碳源类型、底物浓度(碳源、氮源)、C/N、pH、温度、溶解氧浓度和抑制剂。

2.1 有机碳源类型

有机碳源不仅影响着异养硝化菌的生长,也影响着它的硝化活性^[26]。因此,有机碳源的类型及浓度对异养硝化活性起着关键作用。能够被用来维持异养硝化菌生长的碳源类型非常广泛,如:丙酮肟、葡萄糖、半乳糖、乙酰胺、乙酸盐、柠檬酸盐、蛋白胨、牛肉膏等。然而,能够被异养硝化菌利用进行硝化反应的碳源类型却有所限制。如 *Alcaligenes faecalis* No. 4 只能利用有机酸进行硝化反应^[27]。*Arthrobacter* BD 只能利用有机酸盐和 α -酮戊二酸、丙酮肟进行硝化反应^[6]。*Arthrobacter* sp. 只有在以柠檬酸盐、苹果酸盐、醋酸盐或者乙醇作为碳源时,才具有硝化活性^[15]。

Otani 发现碳源的不同大大影响了细菌的脱氮能力,如 *Alcaligenes faecalis* 只有当醋酸钠或者乙醇做为碳源时,才会充分去除硝酸^[28]。Hu 等人分离的 *Acinetobacter* sp. 和 *Xanthomonas* sp. 等 13 株异养硝化菌甚至可以利用难降解物质做为唯一碳源和氮源进行生长硝化^[9]。

总的来说,大部分异养硝化菌都能利用乙酸盐、柠檬酸盐等有机酸物质和牛肉膏、蛋白胨等复杂成分营养物作为碳源进行生长硝化。而且对于复杂成分的培养基,菌株生长更好^[17,26]。但有的异养硝化菌虽然在牛肉膏、蛋白胨培养基上生长率较高,其硝化速率却低于以单纯化合物做为碳、氮源的组合培养基^[3,26,29]。

2.2 底物浓度(碳源、氮源)

底物浓度不同,异养硝化菌的硝化速率会有明显不同。Mevel^[26]在保持C/N为3的条件下,把碳源(乙酸钠)和氮源(硫酸铵)稀释了5个梯度,发现底物浓度对 *Bacillus* MS30 的生长和硝化影响极为显著:碳源浓度为5 mmol/L~30 mmol/L时,硝化速率较低,在每毫克菌体干重0.65 μmol ~0.87 μmol NO_2^- 范围内,且随底物浓度的升高而下降;当碳源浓度上升为60 mmol/L时,该菌的硝化速率均达到最大值

(1.80 μmol NO_2^-/mg dry wt);当碳源浓度继续上升为120 mmol/L时,其硝化速率开始下降,为1.27 μmol NO_2^-/mg dry wt。何霞^[16]在调查有机物浓度对 *Bacillus* sp. LY 的影响中发现,氨氮浓度为40 mg/L、80 mg/L、120 mg/L 时,低有机物浓度(COD 为400 mg/L)会阻碍细菌脱氮性能的发挥;中有机物浓度(COD 为800 mg/L)会促进细菌脱氮性能的发挥;高有机物浓度(COD 为1600 mg/L)下细菌脱氮性能有所降低。因此,合适的底物浓度对异养硝化菌的活性起关键作用。

2.3 C/N

C/N对异养硝化菌的脱氮率有显著影响。Kim^[17]将多株具异养硝化功能的芽孢杆菌属的细菌在不同条件下混合培养,发现在C/N为8时的氨氮去除率要明显高于C/N为4时的氨氮去除率。*Alcaligenes faecalis* OKK17 在以醋酸为碳源的基质上生长时,其生长速率及硝化速率随C/N的升高而增加。当C/N为6时,其生长速率不再上升,硝化活性开始受醋酸的抑制^[3]。*Alcaligenes faecalis* No. 4 在以醋酸盐为碳源的情况下,COD/TN为5时,由于碳源缺乏,氨氮没能完全去除;COD/TN为20时,氨氮被完全去除,COD还有部分剩余;COD/TN为10时,该菌的氨氮去除率最高,并且可以同步去除COD^[27]。

因此,合适的C/N不但可以提高细菌氨氮去除率,还可以同步去除COD。一般而言,异养硝化菌能够处理污水的C/N范围为2~10^[2,30]。

2.4 pH

相对于自养硝化菌,异养硝化菌所能耐受的pH范围更广。如 *Arthrobacter* B_D 在pH为3~10 范围内均能生长硝化。如果基质里因产生酸性代谢物质而导致pH下降的情况下,该菌能够忍受pH<3 的培养条件。而且在C源为葡萄糖,N源为蛋白胨或醋酸胺的基质上培养时,尽管最初基质的pH为3~7,培养后pH普遍升到8.0~9.5^[6]。*Alcaligenes faecalis* No. 4 在pH为6、7、8时的脱氮活性基本一致^[12],可见,pH对异养硝化菌的硝化活性影响不大。

有些异养硝化菌最适pH同基质类型有所关联。如 *Arthrobacter* B_D 在牛肉膏蛋白胨基质里培养时,pH的大小对其硝化活性无明显影响。然而在葡萄糖-醋酸铵的基质里培养时,其硝化活性随着pH的升高而升高^[6]。异养硝化菌的最适硝化pH与生长pH条件也有差异。*Bacillus* MS30 的最适生长pH为6.0~6.5,

最适硝化pH为 7.5~8.0。当在最适硝化pH 7.5 时, 该菌的生长率为最大生长率的 75%^[26]。

可见, 不同基质培养条件下异养硝化菌的最适 pH 条件有所不同。且其生长 pH 同硝化 pH 并不完全一致。总的来说, 异养硝化菌普遍的最适 pH 范围是在 6~8 之间。

2.5 温度

一般而言, 温度低于 15°C或高于 40°C, 都会对异养硝化菌产生显著影响。*Alcaligenes faecalis* subsp. *parafaecalis*产生亚硝酸盐、N₂O及NO的最适温度范围在 28°C~35°C^[31]。*Alcaligenes faecalis* No. 4 在 30°C和 37°C培养时, 该菌的氨氮去除率基本一致。在 20°C培养时, 氨氮去除所需时间非常长, 但其氨氮去除率与前两个温度条件下的氨氮去除率一致^[27]。可见, 低温条件下该菌株的硝化活性明显下降。*Acinetobacter* sp. YY4 在温度为 20°C~40°C之间时, 其脱氮效果差别不明显, 当温度在 50°C, 菌株 *Acinetobacter* sp. YY4 生长繁殖速度明显降低, 脱氮效率也降低^[10]。

异养硝化菌的最适硝化温度同培养基类型有关。如*Alcaligenes faecalis* OKK17 在以醋酸盐和硫酸铵为碳氮源的培养基上 35°C培养时其硝化活性最大, 而在以谷氨酸盐为唯一碳氮源的培养基上培养温度为 30°C时其硝化活性最大^[3]。异养硝化菌的最适硝化温度同最适生长温度也有区别。如嗜热异养硝化菌 *Bacillus* MS30 的最适生长温度为 55°C~60°C之间, 最适硝化温度为 65°C, 在此温度下的生长速率为最大生长率的 75%^[26]。

对于一般的异养硝化菌, 其最适培养温度在 28°C~37°C范围内^[10,27,31]。

2.6 溶解氧浓度(DO)

相对于自养硝化菌, 异养硝化菌能够耐受更低的溶解氧浓度。*Thiosphaera pantotropha*和亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas europaea*)混合培养时, 在低溶氧和高C/N下 *Thiosphaera pantotropha*能够成功将 *Nitrosomonas europaea*竞争出系统^[4]。异养硝化菌 *Pseudonocardia ammonioxydans* H9 与活性污泥一起在DO为 0.5 mg/L~1.5 mg/L的条件下处理合成污水(COD为 1000 mg/L~3000 mg/L, 氨氮为 120 mg/L), 获得较好的氨氮去除率(氨氮去除率>80%)^[32]。可见, DO对异养硝化菌的硝化活性影响不大。

Robertson认为不同异养硝化菌的反硝化系统受

溶解氧浓度抑制的阈值不同^[23]。Patureau比较了在不同DO下具好氧反硝化功能的聚生菌和微病毒科细菌(*Microvirgula aerodenitrificans*)的脱氮能力。发现当DO高于一个阈值(聚生菌的DO阈值为 0.35 mg/L, *Microvirgula aerodenitrificans*的DO阈值为 4.5 mg/L)时, 反硝化能力不受影响。而在阈值以内, DO越低, 反硝化活性越强^[33]。溶解氧浓度也会影响异养硝化菌的主要反硝化产物类型^[4,23]。如 *Thiosphaera pantotropha*在低DO下, 产N₂和N₂O。随着DO提高, 反硝化产物中的N₂O比例增大, 到DO为空气饱和度的 95%时, 其反硝化产物全是N₂O^[4]。

由此可见, 异养硝化菌的硝化活性受溶解氧浓度影响较小, 但其反硝化活性及产物类型却跟溶解氧浓度紧密关联。

2.7 抑制剂

很多自养硝化菌抑制剂同样可以抑制异养硝化菌, 如氯定、烯丙基硫、乙炔、金属螯合物、叠氮化合物等^[21,23,29]。但有的抑制剂作用于异养硝化菌的浓度相对于自养硝化菌有所不同。乙炔在低分压(10 Pa)下就可以抑制自养氨氧化细菌^[21]。而对异养硝化菌, 需要更高的乙炔浓度才能抑制其氨氧化。Daum等人^[21]利用 5%的乙炔处理用γ-氨基丁酸盐(γ-aminobutyrate)培养的*Pseudomonas putida*后, 发现该菌不再生成羟胺、亚硝酸盐、硝酸盐、NO等物质。不同异养硝化菌, 其受抑制的程度有所不同。叠氮化合物能够抑制*Paracoccus denitrificans*的硝化活性, 但对*Thiosphaera pantotropha*的影响较小^[23]。Robertson等人^[29]发现硫代硫酸盐只能短暂抑制 *Thiosphaera pantotropha* 和 *Pseudomonas denitrificans*的硝化活性。长期使用硫代硫酸盐后, 这两株异养硝化菌均会诱导出一条降解硫代硫酸盐的代谢途径。

可见, 相对于自养硝化菌, 异养硝化菌对抑制剂的耐受性更强, 而且在抑制剂长期作用下可产生新的代谢途径降解抑制剂。

3 异养硝化菌应用现状

3.1 异养硝化菌处理合成污水

目前, 对于异养硝化菌的应用研究还停留在实验室规模的小试阶段。杨宗政^[34]在摇床培养条件下利用异养硝化菌强化活性污泥分别处理以氨氮(105 mg/L)、亚硝酸盐氮(95 mg/L)、硝酸盐氮(69 mg/L)

为惟一氮源, 葡萄糖为碳源(COD为 1100 mg/L)的人工合成废水, 4 h的总氮去除率分别为 85%、60%、70%。林燕等人^[35]利用具异养硝化功能的芽孢菌结合MBR反应器处理低氨氮人工合成废水(COD为 250 mg/L~750 mg/L, 总氮为 45 mg/L~50 mg/L)。当 COD/TKN 15 时, MBR反应器的总氮去除率可达 90.6%。Gupta^[30]利用实验室规模的旋转生物接触氧化池(rotating biological contactor)结合 *Thiosphaera pantotropha* 处理 COD 为 1000 mg/L, 氨氮为 22 mg/L 的合成污水, 其总氮去除率可达 82.5%。Ahmad 等人^[32]将异养硝化菌 *Pseudonocardia ammonioxydans* H9 与活性污泥一起投入两个气升式反应器(Air-Lift Bioreactor)中利用人工合成污水(COD为 0 mg/L~3000 mg/L, 氨氮为 120 mg/L)运行, 反应器运行条件一致。随着 C/N 提高, 系统的总氮去除率有较大提高(70%~80%)。而在 C/N 低于 4 时, COD 和氨氮去除率均处于较低水平(<60%)。

3.2 异养硝化菌处理实际污水

陈赵芳^[10]在摇床培养条件下用一株异养硝化菌株 *Acinetobacter* sp. YY4 对宜兴生活污水(COD 为 531.95 mg/L, 氨氮为 61.11 mg/L)和南京某化工厂废水(COD 为 875.72 mg/L, 氨氮为 221.01 mg/L)氨氮去除效果的结果显示, 在补加维氏盐溶液和 12.4 g/L 的琥珀酸钠后去除率分别为 89.54% (9 h) 和 95.79% (36 h)。Joo^[13]利用一株异养硝化菌 *Alcaligenes faecalis* No. 4 在开放系统连续进水的条件下处理 COD 为 12000 mg/L, 氨氮为 2000 mg/L 的养猪废水, 其总氮去除率为 65% 以上, COD 去除率几乎为 100%, 显示了高效同时去除碳氮的能力。

目前, 异养硝化菌主要应用于氨氮废水的处理。但也有的研究者利用异养硝化菌处理含氮气体^[36]。

4 结语

异养硝化微生物来源广泛, 具有生物多样性, 并且对环境条件的适应性强。影响异养硝化菌生长硝化的关键因素是 C 源类型、底物浓度和 C/N。pH、DO、温度对异养硝化菌生长硝化影响较小。

目前, 关于异养硝化菌的应用大都处于实验室规模的小试阶段。并且, 对于异养硝化菌硝化机理的研究还不够深入。今后的研究重点主要包括以下 3 点: (1) 从自然环境中不断分离出新的异养硝化菌, 并进一步研究利用; (2) 将分子生物学技术与微生物

技术相结合, 深入研究异养硝化的硝化机理, 从而补充完善生物脱氮机理; (3) 研究以异养硝化菌为主体的各种脱氮工艺技术, 指导异养硝化菌在工程上的应用。

异养硝化菌多数在硝化的同时还具有反硝化活性, 这是异养硝化菌相比于自养硝化菌最重要的特性。由于这一特性, 异养硝化菌可以实现在一个反应器里完成硝化反硝化。并且, 相对于自养硝化菌, 异养硝化菌能够耐受较高有机负荷, 可以同步去除氨氮和 COD。因此, 采用异养硝化菌处理高碳高氨氮的废水具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] 张 彤, 庞金钊, 杨宗政, 等. 异养硝化菌的脱氮研究. 水科学与工程, 2006, 6: 41-42.
- [2] 温东辉, 唐孝炎. 异养硝化及其在污水脱氮中的作用. 环境污染与防治, 2003, 25(5): 283-285.
- [3] Takayuki N, Tarō Y, Hirosugu M, *et al.* Conditions for nitrification and denitrification by an immobilized heterotrophic nitrifying bacterium *Alcaligenes faecalis* OKK17. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1998, 86(4): 351-356.
- [4] Jetten MSM, Logemann S, Muyzer G, *et al.* Novel principles in the microbial conversion of nitrogen compounds. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1997, 71: 75-93, 1997.
- [5] Pedersen H, Dunkin KA, Firestone MK. The relative importance of autotrophic and heterotrophic nitrification in a conifer forest soil as measured by N-15 tracer and pool dilution techniques. *Biogeochemistry*, 1999, 44(2): 135-150.
- [6] Brierley EDR, Wood M. Heterotrophic nitrification in an acid forest soil: isolation and characterisation of a nitrifying bacterium. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(10): 1403-1409.
- [7] Schmidt I, Sliemers O, Schmid M, *et al.* New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, 27(4): 481-492.
- [8] 张光亚, 陈美慈, 韩如昉, 等. 一株异养硝化细菌的分离及系统发育分析. 微生物学报, 2003, 43(2): 156-161.
- [9] Hu TL, Kung KT. Study of heterotrophic nitrifying bacteria from wastewater treatment systems treating acrylonitrile, butadiene and styrene resin wastewater. *Water Science and Technology*, 2000, 42(3-4): 315-321.
- [10] 陈赵芳, 尹立红, 浦跃朴, 等. 一株异养硝化菌的筛选及其脱氮条件. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(3):

- 486–490.
- [11] Emiko M, Nobuhiko N, Toshiaki NK, *et al.* A simple screening procedure for heterotrophic nitrifying bacteria with oxygen-tolerant denitrification activity. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2003, **95**(4): 409–411.
- [12] Joo HS, Hirai M, Shoda M. Nitrification and denitrification in high-strength ammonium by *Alcaligenes faecalis*. *Biotechnology Letters*, 2005, **27**(11): 773–778.
- [13] Joo HS, Hirai M, Shoda M. Piggery wastewater treatment using *Alcaligenes faecalis* strain No. 4 with heterotrophic nitrification and aerobic denitrification. *Water Research*, 2006, **40**(16): 3029–3036.
- [14] Blagodatsky SA, Kesik M, Papen H, *et al.* Production of NO and N₂O by the heterotrophic nitrifier *Alcaligenes faecalis* subsp. *parafaecalis* under varying conditions of oxygen saturation. *Geomicrobiology Journal*, 2006, **23**(3-4): 165–176.
- [15] Witzel KP, Overbeck HJ. Heterotrophic nitrification by *Arthrobacter* sp. (strain 9006) as influenced by different cultural conditions, growth state and acetate metabolism. *Archives of Microbiology*, 1979, **122**(2): 137–143.
- [16] 何 霞, 赵 彬, 吕 剑, 等. 异养硝化细菌 *Bacillus* sp. LY 脱氮性能研究. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1404–1408.
- [17] Kim JK, Park KJ, Cho KS, *et al.* Aerobic nitrification-denitrification by heterotrophic *Bacillus* strains. *Bioresource Technology*, 2005, **96**(17): 1897–1906.
- [18] Khardenavis AA, Kapley A, Purohit HJ. Simultaneous nitrification and denitrification by diverse *Diaphorobacter* sp. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **77**: 403–409.
- [19] Jetten MSM, deBruijn P, Kuenen JG. Hydroxylamine metabolism in *Pseudomonas* PB16: Involvement of a novel hydroxylamine oxidoreductase. *Antonie Van Leeuwenhoek International Journal of General and Molecular Microbiology*, 1997, **71**(1-2): 69–74.
- [20] Su JJ, Yeh KS, Tsheng PW. A strain of *Pseudomonas* sp. isolated from piggery wastewater treatment systems with heterotrophic nitrification capability in Taiwan. *Current Microbiology*, 2006, **53**(1): 77–81.
- [21] Daum M, Zimmer W, Papen H, *et al.* Physiological and molecular biological characterization of ammonia oxidation of the heterotrophic nitrifier *Pseudomonas putida*. *Current Microbiology*, 1998, **37**(4): 281–288.
- [22] Huang J(黄 钧), Yang H(杨 航), Li YJ(李毅军). 一种异养硝化好氧反硝化细菌及其培养方法和用途. 中国: 200710049432.1. 2007.7.2.
- [23] Robertson LA, Kuenen JG. Combined heterotrophic nitrification and aerobic denitrification in *Thiosphaera pantotropha* and other bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1990, **57**(3): 139–152.
- [24] Mevel G, Prieur D. Thermophilic heterotrophic nitrifiers isolated from Mid-Atlantic Ridge deep-sea hydrothermal vents. *Canadian Journal of Microbiology*, 1998, **44**(8): 723–733.
- [25] Vanniel EWJ, Braber KJ, Robertson LA, *et al.* Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification in *Alcaligenes faecalis* strain TUD. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1992, **62**(3): 231–237.
- [26] Mevel G, Prieur D. Heterotrophic nitrification by a thermophilic *Bacillus* species as influenced by different culture conditions. *Canadian Journal of Microbiology*, 2000, **46**(5): 465–473.
- [27] Joo HS, Hirai M, Shoda M. Characteristics of ammonium removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by *Alcaligenes faecalis* No. 4. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2005, **100**(2): 184–191.
- [28] Otani Y, Hasegawa K, Hanaki K. Comparison of aerobic denitrifying activity among three cultural species with various carbon sources. *Water Science and Technology*, 2004, **50**(8): 15–22.
- [29] Robertson LA, Cornelisse R, Zeng R, *et al.* The effect of thiosulphate and other inhibitors of autotrophic nitrification on heterotrophic nitrifiers. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 1989, **56**(4): 301–309.
- [30] Gupta AB, Gupta SK. Simultaneous carbon and nitrogen removal from high strength domestic wastewater in an aerobic RBC biofilm. *Water Research*, 2001, **35**(7): 1714–1722.
- [31] Kesik M, Blagodatsky S, Papen H, *et al.* Effect of pH, temperature and substrate on N₂O, NO and CO₂ production by *Alcaligenes faecalis* p. *Journal of Applied Microbiology*, 2006, **101**(3): 655–667.
- [32] Ahmad NUD, Xu HY, Chen LP, *et al.* Enhanced biological nutrient removal by the alliance of a heterotrophic nitrifying strain with a nitrogen removing ecosystem. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2008, **20**(2): 216–223.
- [33] Patureau D, Bernet N, Delgenes JP, *et al.* Effect of dissolved oxygen and carbon-nitrogen loads on denitrification by an aerobic consortium. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2000, **54**(4): 535–542.
- [34] 杨宗政, 王 鑫, 庞金钊, 等. 异养硝化菌的分离及其强化活性污泥脱氮效果. *中国给水排水*, 2006, **22**(21): 67–70.
- [35] 林 燕, 何义亮, 李春杰, 等. MBR 同步硝化反硝化及异养硝化试验研究. *环境科学与技术*, 2006, **29**(1): 7–9.
- [36] Ho KL, Chung YC, Tseng CP. Continuous deodorization and bacterial community analysis of a biofilter treating nitrogen-containing gases from swine waste storage pits. *Bioresource Technol*, 2008, **99**(8): 2757–2765.