文章编号:1008-1542(2017)03-0298-07 doi:10.7535/hbkd.2017yx03013

反硝化-厌氧氨氧化掺杂培养的厌氧氨氧化菌影响因素研究

王思慧[1,2],宋圆圆[3,4],刘云曼[1,2],郭延凯[1,2],廉　静[1,2],郭建博[3,4]

(1.河北科技大学环境科学与工程学院,河北石家庄　050018;2.河北省污染防治生物技术实验室,河北石家庄　050018;3.天津城建大学环境与市政工程学院,天津　300384;4.天津市水质科学与技术重点实验室,天津　300384)

摘　要:为了得到厌氧氨氧化菌最适宜的生长环境,利用培养成熟的厌氧氨氧化颗粒污泥进行厌氧氨氧化菌的影响因素研究。探讨了温度、pH值、COD、进水基质(NH_4^+-N和NO_2^--N)对厌氧氨氧化菌活性的影响。研究结果表明:厌氧氨氧化菌最适温度为40 ℃;最适pH值范围为7.0～8.0;COD质量浓度低于100 mg/L时,对厌氧氨氧化菌无明显抑制作用,COD质量浓度高于100 mg/L时,反硝化菌生长占据优势,一定程度上抑制了厌氧氨氧化菌的活性;进水基质NH_4^+-N和NO_2^--N在质量浓度分别低于1 540 mg/L和140 mg/L时,厌氧氨氧化菌活性没有受到严重抑制。控制厌氧氨氧化工艺的最适生长条件,有利于厌氧氨氧化菌的快速生长,进而为厌氧氨氧化反应器的快速启动奠定基础。

关键词:水污染防治工程;厌氧氨氧化;pH值;温度;COD;进水基质(NH_4^+-N,NO_2^--N)

中图分类号:X523　　**文献标志码**:A

Influencing factors analysis of anammox bacteria cultured by mixing denitrifying-anammox

WANG Sihui[1,2], SONG Yuanyuan[3,4], LIU Yunman[1,2], GUO Yankai[1,2], LIAN Jing[1,2], GUO Jianbo[3,4]

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to get the optimal growth conditions of anammox bacteria, the mature-cultured anammox granule sludge is used to investigate the influencing factors. The effects of temperature, pH value, COD and influent substrate (NO_2^--N and NH_4^+-N) on anammox bacteria activity are investigated. The results demonstrate that the optimal temperature is 40 ℃ and the

收稿日期:2016-07-22;修回日期:2016-10-17;责任编辑:王海云

基金项目:国家自然科学基金(51208170);河北省杰出青年科学基金(E2012208012);河北省高校百名优秀创新人才支持计划(Ⅱ)(BR2-211);河北省高校重点学科建设项目

第一作者简介:王思慧(1992—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事水污染控制方面的研究。

通信作者:郭建博教授。E-mail:jianbguo@163.com

王思慧,宋圆圆,刘云曼,等.反硝化-厌氧氨氧化掺杂培养的厌氧氨氧化菌影响因素研究[J].河北科技大学学报,2017,38(3):298-304.
WANG Sihui, SONG Yuanyuan, LIU Yunman, et al. Influencing factors analysis of anammox bacteria cultured by mixing denitrifying-anammox[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(3): 298-304.

optimal pH value is between 7.0～8.0 for anammox bacteria. The anammox bacteria activity is not inhibited severely when COD concentration is lower than 100 mg/L, while the denitrifying bacteria is dominant and inhibits the anammox bacteria activity when COD concentration is higher than 100 mg/L. When the influent NH_4^+-N and NO_2^--N concentration are lower than 1 540 mg/L and 140 mg/L respectively, the anammox bacteria activity is not inhibited severely. Controlling the optimal growth conditions of anammox technical helps the rapid growth of anammox bacteria, which establishes the foundation for the rapid start-up of anammox reactor.

Keywords: water pollution control engineering; anammox; pH value; temperature; COD; influent substrate (NH_4^+-N, NO_2^--N)

随着中国经济的快速发展，大量废水及污染物排放到水体[1]，氮素污染日趋严重，废水中超标的氮严重影响人体健康[2]，因此如何去除水体中的氮成为亟待解决的问题。目前经济有效的脱氮技术之一就是生物脱氮。

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, anammox)技术是一种新型的生物脱氮技术。在厌氧条件下，厌氧氨氧化是以 NH_4^+ 作为电子供体，NO_2^- 作为电子受体，将 NH_4^+，NO_2^- 直接还原为 N_2 的过程[3-4]。厌氧氨氧化具有不需外加碳源、需氧量低、污泥产率低、温室气体排放少等优点[5]，得到越来越多国内外学者的关注。但是由于厌氧氨氧化细菌细胞产率低，倍增时间长，且对环境条件敏感，导致厌氧氨氧化反应器启动缓慢，严重限制了其工程化应用[6-7]。为解决厌氧氨氧化反应器启动时间长、高环境敏感性等问题。近年来，研究者对厌氧氨氧化反应的快速启动及影响因素进行了深入研究，主要集中在反应器类型、接种污泥、填料等反应物质条件，温度、pH 值等环境条件，以及有机物、进水氮素(NH_4^+-N，NO_2^--N)等基质条件，获得了较好的研究进展[8-16]。课题组已采用反硝化颗粒污泥掺杂部分厌氧氨氧化菌的接种策略在 UASB 反应器成功培养了厌氧氨氧化颗粒污泥。但尚未有对掺杂后培养的厌氧氨氧化菌影响因素深入分析的文献报道。因此，本文拟对厌氧氨氧化反应影响因素进行实验研究，旨在探索厌氧氨氧化工艺的最佳运行条件，为今后厌氧氨氧化反应器的快速启动和稳定运行所需的控制条件提供一定的理论基础。

1　材料与方法

1.1　实验废水

实验采用模拟废水，其组成成分：KH_2PO_4(0.03 g/L)，$CaCl_2$(0.136 g/L)，$MgSO_4$(0.1 g/L)，$NaHCO_3$(0.3 g/L)；微量元素浓缩液Ⅰ、浓缩液Ⅱ各 1 mL/L。微量元素浓缩液Ⅰ的成分：EDTA(5.00 g/L)，$FeSO_4$(5.00 g/L)；微量元素浓缩液Ⅱ成分：EDTA(15.00 g/L)，H_3BO_4(0.014 g/L)，$MnCl_2\cdot 4H_2O$(0.99 g/L)，$CuSO_4\cdot 5H_2O$(0.25 g/L)，$ZnSO_4\cdot 7H_2O$(0.43 g/L)，$NiCl_2\cdot 6H_2O$(0.19 g/L)，$NaSeO_4\cdot 10H_2O$(0.21 g/L)，$NaMoO_4\cdot 2H_2O$(0.22 g/L)，$CoCl_2\cdot 6H_2O$(0.24 g/L)。基质 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 以 $(NH_4)_2SO_4$ 和 $NaNO_2$ 提供，质量比为 1∶1，浓度按照实验需要配置。所用药品均为分析纯。

1.2　实验内容

实验在 300 mL 血清瓶内进行。实验用厌氧氨氧化颗粒污泥取自实验室已连续运行 230 d 的 UASB 反应器，该反应器采用上述模拟废水，平均总氮容积负荷为 2.5 kg/($m^3\cdot$d)，总氮去除率为 87.3%，厌氧氨氧化污泥呈砖红色细小颗粒。该反应器利用反硝化颗粒污泥掺杂部分厌氧氨氧化菌实现了厌氧氨氧化反应器的快速启动。先用磷酸缓冲溶液将从反应器取出的污泥冲洗 3 遍，再用模拟废水冲洗 3 遍去除残余的缓冲溶液。向每个血清瓶中加入 20 g 湿污泥以及 280 mL 质量浓度为 100 mg/L 的模拟废水，用 N_2 吹脱 5 min。最后将血清瓶以黑布包裹，置于 35 ℃的恒温摇床内培养。实验以 12 h 为 1 个周期，每隔 2 h 取样，测定出水 NO_2^--N，NH_4^+-N，NO_3^--N 的浓度。本文设置了 4 组实验：1)温度(20，30，40，50 ℃)对厌氧氨氧化菌活性的影响；2)pH 值(5.0，6.0，7.0，8.0，9.0)对厌氧氨氧化菌活性的影响；3)以葡萄糖为有机碳源的 COD 质量浓度(0，100，200，300，500，700，900，1 100 mg/L)对厌氧氨氧化菌活性的影响；4)控制 NH_4^+-N 的质量浓度为 50 mg/L，研究不同质量浓度 NO_2^--N(7，14，28，42，70，84，112，126，140，154 mg/L)对厌氧氨氧化菌活性的影响；控制 NO_2^--N 的质量浓度为 100 mg/L，研究不同质量浓度 NH_4^+-N(70，140，280，420，640，840，980，1 260，1 540 mg/L)对厌氧氨氧化菌活性的影响。

1.3 分析方法

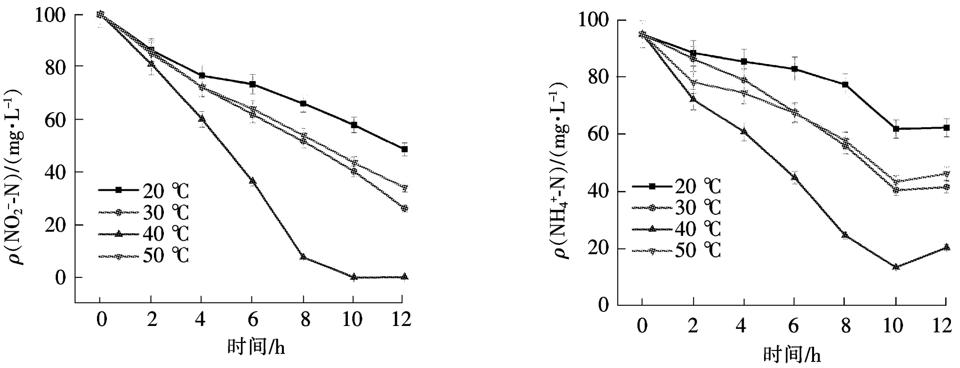
硝态氮采用紫外分光光度法[17]测定，亚硝态氮采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法[17]测定，氨氮采用纳氏试剂光度法[17]测定；pH 值采用 DELTA-320 型 pH 计进行测量。

2 结果与讨论

2.1 温度对厌氧氨氧化菌脱氮性能的影响

温度是影响细菌生长和代谢的重要条件，是影响微生物酶促反应的主要因素之一，温度升高可使反应速率加快，但每种微生物都存在一个温度耐受极限，如果超过极限值，反应速率会急剧下降，控制微生物反应的最适温度有利于维持体系高效稳定的反应速率。

由图 1 可以看出：随着温度的升高 NO_2^--N 的去除率依次为 51.35%，73.67%，99.82%，65.83%；NH_4^+-N 的去除率依次为 34.38%，56.11%，78.35%，51.20%。在温度为 40 ℃时，NO_2^--N 和 NH_4^+-N 的降解最彻底，其余温度下，厌氧氨氧化菌活性受到不同程度的抑制，则厌氧氨氧化菌的最适生长温度为 40 ℃。温度对厌氧氨氧化菌活性的影响研究表明，对于不同类型的厌氧氨氧化菌，其最适的生长温度有所不同。目前研究的厌氧氨氧化菌一般为中温菌，适宜的温度为 30～40 ℃[10-13]，与本文研究所得结果一致。



a) NO_2^--N 的降解　　b) NH_4^+-N 的降解

图 1 温度对厌氧氨氧化菌活性的影响

Fig.1 Effect of temperature on the anammox activity

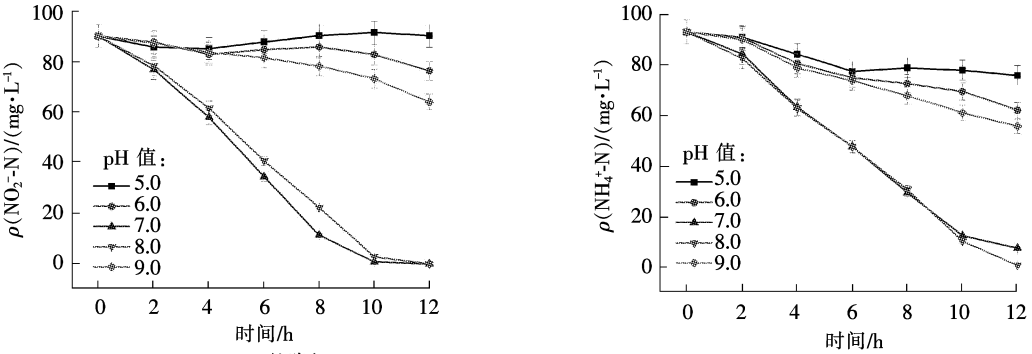
2.2 pH 值对厌氧氨氧化菌脱氮性能的影响

pH 值是微生物另外一个非常重要的外界环境条件，其影响主要表现在：1）pH 值通过改变微生物细胞内 H^+ 的浓度而影响细胞内的电解质平衡，从而影响微生物的活性；2）pH 值通过改变水解平衡影响基质或抑制物的浓度，从而间接影响微生物的活性。pH 值对厌氧氨氧化菌的影响主要表现为其对细菌和基质的影响，厌氧氨氧化过程中的反应基质 NH_4^+-N 及 NO_2^--N 都是易产生抑制作用的物质，它们产生抑制作用的原因可能是由于自由氨和自由亚硝酸的毒害作用，而 pH 值会影响自由氨和自由亚硝酸的平衡浓度。因此，控制厌氧氨氧化反应的 pH 值是非常重要的[18]。

由图 2 可以看出，随着 pH 值的增大，NO_2^--N 的去除率依次为 0，15.33%，100%，100%，28.92%；NH_4^+-N 的去除率依次为 18.42%，33.29%，91.86%，99.16%，40.03%；pH 值为 7.0～8.0 时，基质NH_4^+-N 和 NO_2^--N 降解完全，厌氧氨氧化菌活性最高；pH 值在过高或过低时（5.0，6.0，9.0），基质 NH_4^+-N 和 NO_2^--N去除率低，厌氧氨氧化菌活性受到严重抑制。因此，厌氧氨氧化菌最适的 pH 值为 7.0～8.0。有文献报道[19-20]厌氧氨氧化菌的最适 pH 值为 6.7～8.3，在 pH 值小于 6.5 或大于 9.0 时，厌氧氨氧化菌完全没有活性，本实验研究结果与此相似。

2.3 COD 对厌氧氨氧化菌脱氮性能的影响

新的研究表明厌氧氨氧化菌还能氧化有机物[21]，如果它（如同某些硝化细菌一样）也能利用有机物进行异养生长，则可能提高厌氧氨氧化菌细胞产率，有效地缩短反应器的启动时间。另外，厌氧氨氧化菌为自养菌，无需外加有机碳源，但实际废水中大多含有一定量的有机物。研究有机碳源条件下厌氧氨氧化的脱氮特性对厌氧氨氧化技术的推广应用具有重要的现实意义。故本实验针对不同质量浓度的 COD（外加葡萄



a) NO_2^--N 的降解　　b) NH_4^+-N 的降解

图 2　pH 值对厌氧氨氧化菌活性的影响

Fig. 2　Effect of pH value on the anammox activity

糖作为有机碳源）对厌氧氨氧化菌活性的影响作出研究。

由图 3 可以看出，在 COD 质量浓度为 100 mg/L 时，NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的降解速率和无外加有机碳源时几乎一样，说明葡萄糖对厌氧氨氧化菌没有直接毒害作用，而且低浓度 COD 对厌氧氨氧化菌活性无抑制作用。当 COD 质量浓度高于 200 mg/L 时，在 0～6 h，NH_4^+-N 的降解效果良好，在 6 h 之后，NH_4^+-N 的降解趋于平缓，并且 NO_2^--N 和 NO_3^--N 开始降解，COD 浓度越大，NO_2^--N 和 NO_3^--N 的降解速率越快，表明 6 h 后，体系中的反硝化菌逐渐成为优势菌。

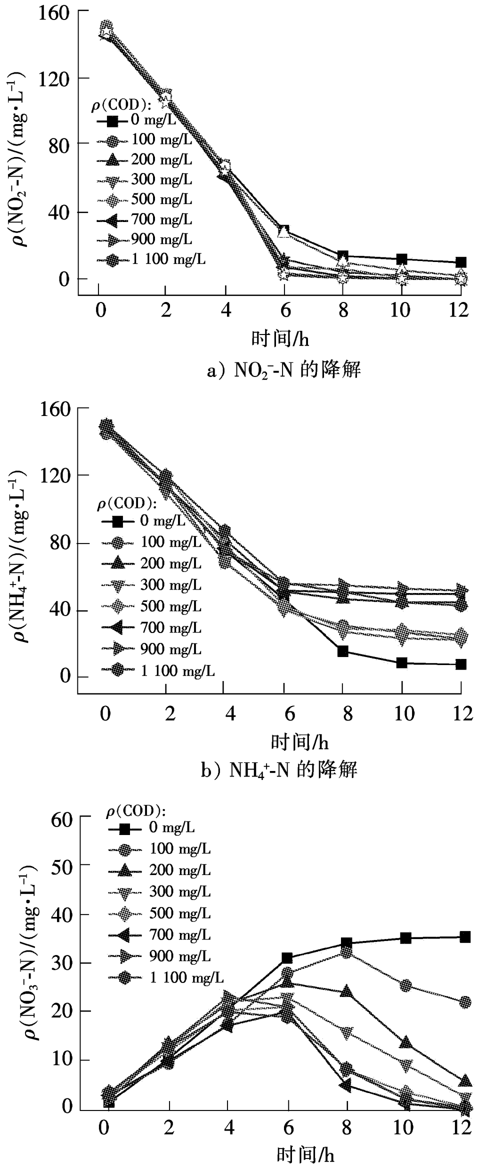
通过对比不同浓度 COD 条件下氮素的转化，可以发现虽然葡萄糖的添加对厌氧氨氧化菌没有直接的毒害作用，但在有机物存在下反硝化菌和厌氧氨氧化菌之间发生基质（NO_2^--N）竞争。当废水中存在过量的有机碳源时，将极大地抑制厌氧氨氧化菌的生长与繁殖，并使反硝化菌快速占据优势。从理论上来看，厌氧氨氧化菌生长率约为 0.066，仅为反硝化菌的 1/5，且在热力学上厌氧氨氧化反应比反硝化反应更难进行[22]。而在 C/N 比值高于 1 的环境下，厌氧氨氧化菌将失去和反硝化菌竞争底物的优势[21]。本实验中，COD 浓度越高，反硝化菌生长越快，NO_2^--N 和 NO_3^--N 的降解速率越快，但抑制了 NH_4^+-N 的降解，厌氧氨氧化菌活性下降。

2.4　进水基质对厌氧氨氧化菌脱氮性能的影响

NH_4^+-N 和 NO_2^--N 是厌氧氨氧化菌所需的基质，两者都是易产生抑制的物质，超过一定阈值会抑制厌氧氨氧化菌的活性。本实验研究了 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 对厌氧氨氧化菌的抑制浓度。

2.4.1　NH_4^+-N 对厌氧氨氧化菌活性的影响

由图 4 可知，当 NH_4^+-N 质量浓度为 70～640 mg/L 时，随着 NH_4^+-N 质量浓度的提高，NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除速率也随之提高，在 640 mg/L 时 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除速率达到最大值，分别为 40 mg/d（以 VSS 计，下同）和 42 mg/d（以 VSS 计，下同）；当 NH_4^+-N



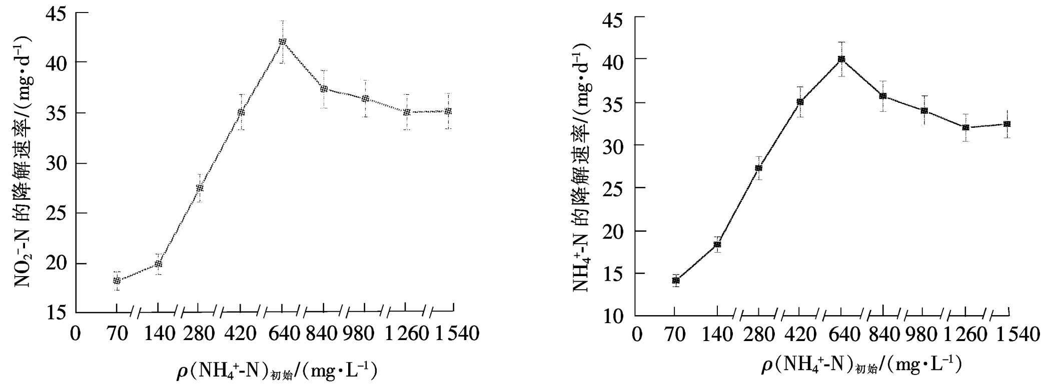
c) NO_3^--N 的降解

图 3　COD 质量浓度对厌氧氨氧化菌活性的影响

Fig. 3　Effect of COD on the anammox activity

质量浓度为 1 540 mg/L 时，NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除速率分别为 32 mg/d 和 35 mg/d，两基质的去除速率均有略微下降，但仍维持在较高水平，没有对厌氧氨氧化菌产生明显的抑制作用。由此可知：NH_4^+-N 的质量浓度低于 1 540 mg/L 时，它对厌氧氨氧化菌活性没有严重的抑制作用，这与 STROUS 等[19]的研究结果一致。

一般认为，NH_4^+-N 对厌氧氨氧化过程的抑制实质可能是由游离氨（FA）引起的[23]，所以当 NH_4^+-N 浓度过高时，由于电离作用，底物中的游离氨浓度也会相应增加，对厌氧氨氧化菌造成了微弱的抑制作用。



a) NO_2^--N 的降解　　b) NH_4^+-N 的降解

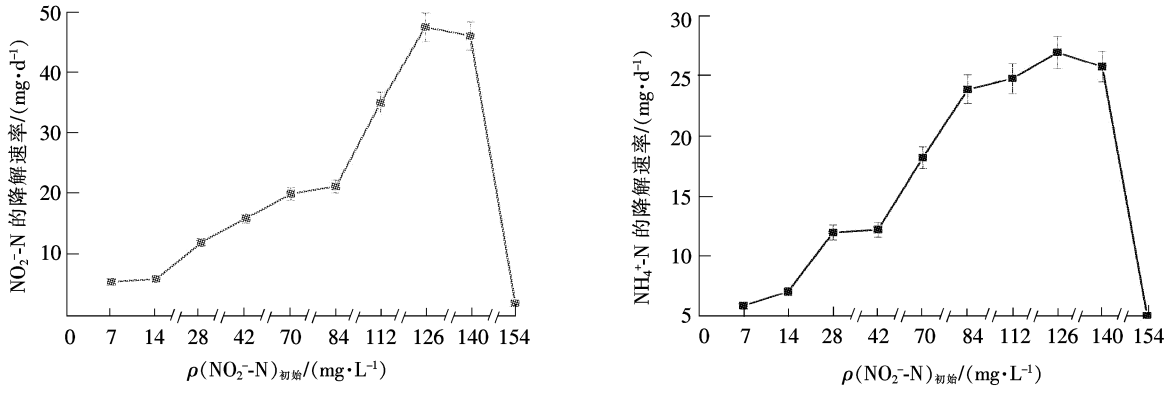
图 4 NH_4^+-N 对厌氧氨氧化菌活性的影响

Fig. 4 Effect of NH_4^+-N on the anammox activity

2.4.2 NO_2^--N 对厌氧氨氧化菌活性的影响

由图 5 可知，当 NO_2^--N 的质量浓度为 7～126 mg/L 时，随着 NO_2^--N 质量浓度的提高，NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除速率升高，在 NO_2^--N 的质量浓度为 126 mg/L 时，两基质的去除速率达到最大值 27 mg/d 和 47.5 mg/d。在 NO_2^--N 质量浓度为 140 mg/L 时，两基质去除速率略微下降，但此时没有对基质产生严重抑制，随着 NO_2^--N 质量浓度进一步提高为 154 mg/L 时，NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除速率急剧下降至 5 和 2 mg/d。由此说明，当 NO_2^--N 的质量浓度高于 140 mg/L 时，厌氧氨氧化菌受到了严重抑制。相较于 NH_4^+-N 的抑制质量浓度 1 540 mg/L，NO_2^--N 的毒性要远远大于 NH_4^+-N 的毒性。

NO_2^--N 是厌氧氨氧化反应的底物之一，但是 NO_2^--N 的浓度过高会抑制厌氧氨氧化菌的活性。STROUS 等[19]研究指出在 NO_2^--N 的质量浓度高于 100 mg/L 时，厌氧氨氧化过程被完全抑制，当添加一定量的中间产物后可以使厌氧氨氧化菌活性部分恢复。因此，在厌氧氨氧化反应器运行过程中要避免 NO_2^--N 的累积所产生的不利影响。



a) NO_2^--N 的降解　　b) NH_4^+-N 的降解

图 5 NO_2^--N 对厌氧氨氧化菌活性的影响

Fig. 5 Effect of NO_2^--N on the anammox activity

3　结　语

1）研究了以反硝化菌掺杂厌氧氨氧化菌的接种策略培养得到的厌氧氨氧化菌的影响因素，实验结果表明，温度和 pH 值对厌氧氨氧化菌活性有明显影响，最适温度为 40 ℃，最适 pH 值范围为 7.0～8.0。对于不同类型的厌氧氨氧化菌，其最适的生长温度也有所不同；目前研究的厌氧氨氧化菌一般为中温菌，适宜的温度为 30～40 ℃[10-13]，与本文研究所得结果一致。有文献报道[19-20]厌氧氨氧化菌的适宜 pH 值为 6.7～8.3，在 pH 值小于 6.5 或大于 9.0 时，厌氧氨氧化菌完全没有活性，本实验研究结果与此相似。

2）以葡萄糖作为有机碳源，葡萄糖本身对厌氧氨氧化菌无直接毒害作用，在 COD 质量浓度低于 100 mg/L 时，NO_2^--N 和 NH_4^+-N 的去除率与不加有机碳源时几乎一致；而当 COD 的质量浓度高于 200 mg/L 时，随着 COD 质量浓度的升高，NO_2^--N 和 NO_3^--N 的降解加快，表明此时体系中的反硝化作用加强，反硝化菌逐渐成为优势菌群，进而抑制了厌氧氨氧化菌的生长。

3）在 NO_2^--N 的质量浓度低于 140 mg/L，NH_4^+-N 的质量浓度低于 1 540 mg/L 时，对厌氧氨氧化菌没有明显的抑制作用，说明 NO_2^--N 的毒性远远大于 NH_4^+-N。STROUS 等[19]研究指出在 NO_2^--N 质量浓度高于 100 mg/L 时，厌氧氨氧化过程被完全抑制，NH_4^+-N 质量浓度低于 1 540 mg/L 时对厌氧氨氧化菌活性没有严重的抑制作用，这与本文的研究结果相似。

本文利用不同培养策略研究了厌氧氨氧化菌的最适宜生长条件，丰富了厌氧氨氧化菌的影响因素研究，可为厌氧氨氧化反应器的快速启动提供理论基础。

参考文献/References：

[1] 陈延明，张华雨，赵丽君，等. 氧化还原介体在治理环境中应用的研究进展[J]. 河北工业科技，2013，30(4)：266-271.
CHEN Yanming，ZHANG Huayu，ZHAO Lijun，et al. Development and application of redox mediators for environmental protection[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology，2013，30(4)：266-271.

[2] 雷立改，马晓珍，魏福祥，等. 水中总氮、总磷测定方法的研究进展[J]. 河北工业科技，2011，28(1)：72-76.
LEI Ligai，MA Xiaozhen，WEI Fuxiang，et al. Research progress of determination of total nitrogen and total phosphorus in seawater[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology，2011，28(1)：72-76.

[3] 赵宗升，赵云霞，陈智均，等. 厌氧氨氧化菌接种污泥的选择培养过程研究[J]. 环境工程学报，2007，1(2)：39-42.
ZHAO Zongsheng，ZHAO Yunxia，CHEN Zhijun，et al. The culture of anaerobic ammonia oxidation biomass seeded by two kinds of sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2007，1(2)：39-42.

[4] 赵致宏，廖德祥，李小明，等. 厌氧氨氧化微生物颗粒化及其脱氮性能的研究[J]. 环境科学，2007，28(4)：800-804.
ZHAO Zhihong，LIAO Dexiang，LI Xiaoming，et al. Cultivation and nitrogen removal characteristics of ANAMMOX granules [J]. Environmental Science，2007，28(4)：800-804.

[5] OPDEN-CAMP H J，KARTAL B，GUVEN D，et al. Global impact and application of the anaerobic ammonium-oxidizing(anammox) bacteria[J]. Biochemical Society Transaction，2006，34(1)：174-178.

[6] 郝晓地，仇付国，STAR W R L，等. 厌氧氨氧化技术工程化的全球现状及展望[J]. 中国给水排水，2007，23(18)：15-19.
HAO Xiaodi，QIU Fuguo，STAR W R L，et al. Global situation of developing ANAMMOX technology towards engineering application [J]. China Water and Wastewater，2007，23(18)：15-19.

[7] van der STAR W R L，ABMA W R，BLOMMERS D，et al. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation：Experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. Water Research，2007，41(18)：4149-4163.

[8] 李祥，黄勇，袁怡. ASBBR 反应器厌氧氨氧化反应稳定性研究[J]. 水处理技术，2010，36(1)：101-105.
LI Xiang，HUANG Yong，YUAN Yi. Study on the stability of ANAMMOX ASBBR [J]. Technology of Water Treatment，2010，36(1)：101-105.

[9] 唐崇俭，郑平，陈小光. 厌氧氨氧化工艺的基质抑制及其恢复策略[J]. 应用基础与工程科学学报，2010，18(4)：561-570.
TANG Chongjian，ZHENG Ping，CHEN Xiaoguang. Substrate inhibition and recovery strategies for Anammox process [J]. Journal of Basic Science and Engineering，2010，18(4)：561-570.

[10] DOSTA J，FERNÁNDEZ I，VÁZQUEZ-PADIN J R，et al. Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process [J]. Journal of Hazardous Materials，2008，154(1/2/3)：688-693.

[11] ISAKA K，SUMINO T，TSUNEDA S. High nitrogen removal performance at moderately low temperature utilizing anaerobic ammonium oxidation reactions[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering，2007，103(5)：486-490.

[12] 杨洋，左剑恶，沈平，等. 温度、pH 值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.
YANG Yang，ZUO Jiane，SHEN Ping，et al. Influence of temperature，pH value and organic substance on activity of ANAMMOX sludge[J]. Environment Science，2006，27(4)：691-695.

[13] 郑平，胡宝兰. 厌氧氨氧化菌混培物生长及代谢动力学研究[J]. 生物工程学报，2001，17(2)：193-198.
ZHENG Ping，HU Baolan. Kinetics of anaerobic ammonia oxidation [J]. Chinese Journal of Biotechnology，2001，17(2)：193-198.

[14] 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.
YANG Zhaohui，XU Zhengyong，ZENG Guangming，et al. Anaerobic ammonia oxidation activity under different low temperature domestication strategy[J]. China Environmental Science，2007，27(3)：300-305.

[15] 操家顺，王超，蔡娟. 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，2007，31(6)：775-779.
CAO Jiashun，WANG Chao，CAI Juan. Factors affecting the ANAMMOX process under low ammonia concentration [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology，2007，31(6)：775-779.

[16] 胡勇有，梁辉强，朱静平，等. 有机碳源环境下的厌氧氨氧化批式实验[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2007，35(6)：116-119.
HU Yongyou，LIANG Huiqiang，ZHU Jingping，et al. Batch experiments of anaerobic ammonium oxidation process with organic carbon [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)，2007,35(6):116-119.

[17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京：中国环境科学出版社，2002.

[18] 王勇，黄勇，袁仪，等. 厌氧氨氧化影响因素分析[J]. 环境科技，2008，21(5)：65-69.
WANG Yong，HUANG Yong，YUAN Yi，et al. Influencing factors analysis of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) [J]. Environmental Science and Technology，2008，21(5)：65-69.

[19] STROUS M，KUENEN J，JETTEN M. Key physiological parameters of anaerobic ammonium oxidation [J]. Applied Microbiology and Biotechnology，1999，65(7)：3248-3250.

[20] STROUS M，HEIJNEN J，KUENEN J，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.

[21] GÜVEN D，DAPENA A，KARTAL B，et al. Propionate oxidation by and methanol inhibition of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. Appllied & Environmental Microbiology，2005，71(2)：1066-1071.

[22] MOLINUEVO B，GARCIA M C，KARAKASHEV D，et al. Anammox for ammonia removal from pig manure effluents：Effect of organic matter content on process performance [J]. Bioresource Technology，2009，100(7)：2171-2175.

[23] FERNÁNDEZ I，DOSTA J，FAJARDO C，et al. Short- and long-term effects of ammonium and nitrite on the Anammox process[J]. Journal of Environmental Management，2012，95(sup)：S170-S174.