

文章编号: 1000-5641(2018)06-0068-06

城市河道内源硫影响厌氧氨氧化过程的研究进展

何 岩^{1,2}, 陈静涵^{1,2}, 黄民生^{1,2}, 许怡雯^{1,2}

(1. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241;
2. 华东师范大学 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241)

摘要: 评述了当前城市河道内源硫影响厌氧氨氧化过程的研究现状以及二者之间可能的微生物作用关系; 指出了对于黑臭河道治理后呈现的高氮营养盐和较低碳氮比(C/N)生境, 今后应重视新型化能自养的厌氧氨氧化过程在河道氮转化过程中的作用, 包括“硫自养部分反硝化-厌氧氨氧化”、“硫酸盐型厌氧氨氧化”和“铁自养型厌氧氨氧化”等, 以及内源硫如何影响厌氧氨氧化过程的发生和二者之间的耦合关系; 不仅为强化氮营养盐的去除提供了崭新的视角, 而且为阐明水圈微生物驱动氮与其他元素循环机制的基础理论提供了有益补充.

关键词: 城市河道; 内源硫; 厌氧氨氧化; 氮削减

中图分类号: X522 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.06.008

A review of the effects of endogenous sulfur on anaerobic ammonium oxidation in urban rivers

HE Yan^{1,2}, CHEN Jing-han^{1,2}, HUANG Min-sheng^{1,2}, XU Yi-wen^{1,2}

(1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University,
Shanghai 200241, China;
2. Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration,
East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: This paper reviews the state of current research on endogenous sulfur intervening in anaerobic ammonium oxidation as well as possible coupled microbial processes. Future research should focus on the role of new-type autotrophic anaerobic ammonium oxidation in nitrogen-cycling processes in urban rivers, including sulfur-driven autotrophic partial denitrification with anaerobic ammonium oxidation, sulfate-type anaerobic ammonium oxidation, and ferric iron reduction coupled with anaerobic ammonium oxidation; in addition, future research should explore the role of endogenous sulfur in intervening in anaerobic ammonium oxidation and their coupled progress in treating urban rivers with a high level of nitrogen and a low C/N ratio. This is of great significance for solving the issue of high nitrogen levels in treating polluted urban rivers as well as improving our

收稿日期: 2018-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(41877477); 上海市自然科学基金(16ZR1408800); 上海市科技创新重点项目(18DZ1203806); 上海市浦江人才计划(16PJD023)

第一作者: 何 岩, 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水环境治理与修复、难降解工业废水处理等.
E-mail: yhe@des.ecnu.edu.cn.

understanding of microbial processes of N- and S-cycling in aquatic environments.

Keywords: urban river; endogenous sulfur; anaerobic ammonium oxidation; nitrogen removal

0 引言

健康的水体环境是城市可持续发展的重要保障。为了尽快遏制我国城市水污染趋势、改善城市水环境质量, 近年来许多城市根据自身特点, 开展了相应的黑臭河道整治工程^[1-4], 污染负荷得到了大幅度削减, 然而氮营养盐仍处于较高的水平, 其主要原因是目前河道治理中往往关注氨氮的去除, 侧重于氨氮的硝化转化, 而忽视氮的脱除过程, 导致总氮去除率偏低的现象普遍存在^[1-4]; 而且对于接纳污水处理厂尾水(一级A总氮排放标准: 15 mg/L)的河道, 硝酸盐氮在水体中的积累进一步加大了提高总氮去除率的难度^[5-6]。图1为生活污水排放与河流水质标准的比较。黑臭河道治理后的高氮营养盐往往是使河道由“黑臭”演变为“水华”的重要因素, 这也是本课题组在黑臭河道治理的工程实践和调研其他城市河道治理经验中发现的新问题^[7-8]。

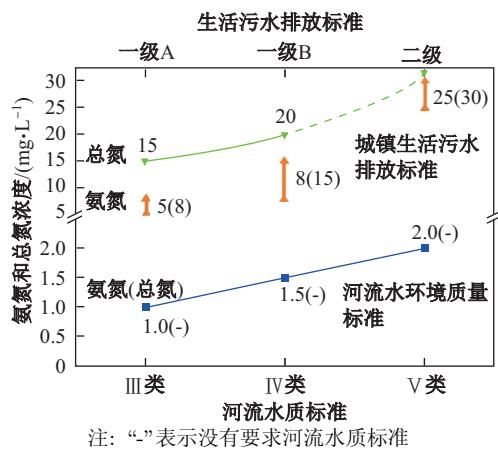


图1 生活污水排放和河流水质标准的比较

Fig. 1 Comparison of domestic wastewater discharge standards and river water quality standards

厌氧氨氧化作为氮的生物地球化学循环的重要环节, 其在河道氮负荷削减过程中的作用日益受到重视^[9-11], 特别是黑臭河道治理后, 有机负荷得到了大幅度削减, 呈现的高氮营养盐和较低C/N生境更有利于厌氧氨氧化过程的发生。相比于氮营养盐, 目前对城市河道内源硫的环境行为关注较少。事实上, 硫作为生物地球化学循环的重要元素, 其在河道体系内的含量往往高于氮营养盐1个数量级以上^[12-13], 且与水体污染最为直接的感官指标“黑臭”密切相关^[14]。对于黑臭河道治理后呈现的高氮营养盐和较低C/N生境, 新型化能自养的“厌氧氨氧化”如何参与其中的氮转化过程, 内源硫如何影响厌氧氨氧化过程的发生, 是一项值得探讨的工作, 对于完善“氮循环”机制的认识以及氮营养盐的有效削减均具有重要的现实意义。

1 城市河道内源硫对厌氧氨氧化过程的影响

长期以来, 人们认为水环境中氮的去除主要归因于反硝化作用, 在城市河道内源氮去

除方面也主要针对反硝化开展了较多的研究,包括不同环境因子如 pH 值、溶解氧 (DO)、温度和有机质含量等对其的影响作用^[15-17]。然而,自 2002 年海洋中厌氧氨氧化过程的发现^[18],越来越多的证据表明厌氧氨氧化在水生态系统(海洋^[19-20]、河口^[21-22]、湖泊^[23-24]和湿地^[25-26])氮素循环中起着不容忽视的作用。河流生态系统中厌氧氨氧化的功能特征也逐渐受到关注,当前研究主要集中在功能菌群分布^[9,10,27-28]、活性特征^[11]以及厌氧氨氧化过程对河道脱氮贡献的定量分析^[29-30],对于黑臭河道治理后呈现的高氮营养盐和较低 C/N 生境,厌氧氨氧化如何参与其中氮转化过程的研究尚未见诸报道。

硫是河道生态系统的重要组成元素,其含量往往高于氮营养盐 1 个数量级以上。目前关于城市河道中硫的环境行为的研究较少,主要从致黑、致臭角度进行较多分析^[14],对于其中氮、硫相互作用的研究主要针对“投加硝酸钙(盐)”这一底泥修复条件下的硫自养反硝化过程^[31-33]。不同的是,近几年硫对海洋、海湾、河口和湿地等沉积物中氮转化的作用日益受到重视^[34-36]。2014 年 Kraft 等指出,海湾沉积物中大约 25% 的硝酸盐去除与“神秘的硫循环(cryptic sulfur cycle)”有关^[34];一些文献对内源硫与厌氧氨氧化之间的关系也给予了初步分析和推测^[37-39]。这些研究证实了内源硫对氮转化过程的影响作用不容忽视。

然而,目前关于硫化物如何影响厌氧氨氧化过程的研究结论仍存在分歧^[37,39-45],硫酸盐还原与厌氧氨氧化的交互作用(共生或竞争)也尚未定论^[34,38,46]。例如,一些研究表明^[40-42],硫化物对厌氧氨氧化过程呈现明显的抑制作用,并且属于不可逆抑制^[43];另外一些学者^[37,44-45]则认为,硫化物并不会对厌氧氨氧化产生抑制,甚至会具有一定的促进作用,推测硫化物参与的自养反硝化可为厌氧氨氧化过程提供亚硝酸盐^[37]以及可能存在一些厌氧氨氧化菌对硫化物具有耐受性^[46]。

另外,内源硫对于厌氧氨氧化过程的影响作用还受到周边环境因子的影响。例如, pH 值是决定硫化物对 ANAMMOX (Anaerobic Ammonium Oxidation) 微生物毒性的关键因子,较低 pH 值下产生的 H₂S 会增强硫化物的毒性,而在碱性条件下,其毒性明显削弱^[47]。有机物的存在会加速异养反硝化作用,并与厌氧氨氧化及自养反硝化竞争基质,从而抑制厌氧氨氧化及硫自养反硝化活性^[48-49]。

黑臭河道治理后,有机负荷得到了大幅度削减,呈现的较低 C/N 生境有利于化能自养的硫自养反硝化和厌氧氨氧化过程的发生,而且体系中较高的 pH 值 (7.3~8.2) 也有利于削弱硫化物对厌氧氨氧化的毒性,然而二者如何共存以及各自在氮转化过程中的作用和地位尚不明确。还原态的硫化物参与硫自养反硝化过程^[31-32],可通过电子供受体 (NO₂⁻ 或 NO₃⁻) 与厌氧氨氧化形成交互(共生或竞争)作用^[37];而氧化态的硫酸盐的还原可促使硫化物的再生,同时也可能参与到硫酸盐还原的厌氧氨氧化过程 (SO₄²⁻ 或 NH₄⁺ → S²⁻ 或 N₂)^[38],这些都会直接或间接影响到厌氧氨氧化过程的发生。因此,探明内源硫如何介入厌氧氨氧化过程,对于完善“氮循环”机制的认识以及解决黑臭河道治理后凸现的高氮营养盐问题,具有重要的学术意义和工程应用价值。

2 城市河道内源硫与厌氧氨氧化过程相互作用的微生物特性

城市河道内源硫与厌氧氨氧化过程的相互作用是一个涉及化学、生物、物理等多种因素的多相复杂的生物地球化学过程,其中涉及的 3 个主要相互过程,即厌氧氨氧化、硫自养反硝化和硫酸盐还原过程,均由微生物驱动(图 2)。随着 2002 年海洋中厌氧氨氧化过程的发现^[18],其在水圈氮循环中的作用日益受到重视^[19-26];2006 年 Schubert 等首次在淡水湖泊 Lake Tanganyika 中证实了厌氧氨氧化的存在^[50]。目前关于厌氧氨氧化菌 (ANAMMOX) 的

研究主要集中在菌群的分布^[27-28]和功能基因(*hzoA*, *hzoB* 和 *hzoS*)的定量分析^[51]。已有研究表明, 海洋环境中的厌氧氨氧化菌群结构较为单一, 大多是 *Scalindua* 属, 而 *Brocadia* 和 *Kuenenia* 属的厌氧氨氧化菌则主要存在于淡水环境中^[52-53]; 本课题组发现黑臭河道中厌氧氨氧化优势菌属为 *Jettenia* 和 *Kuenenia* 属, 并且底泥投加硝酸钙会显著增加 *Jettenia* 菌属的相对丰度^[29]。

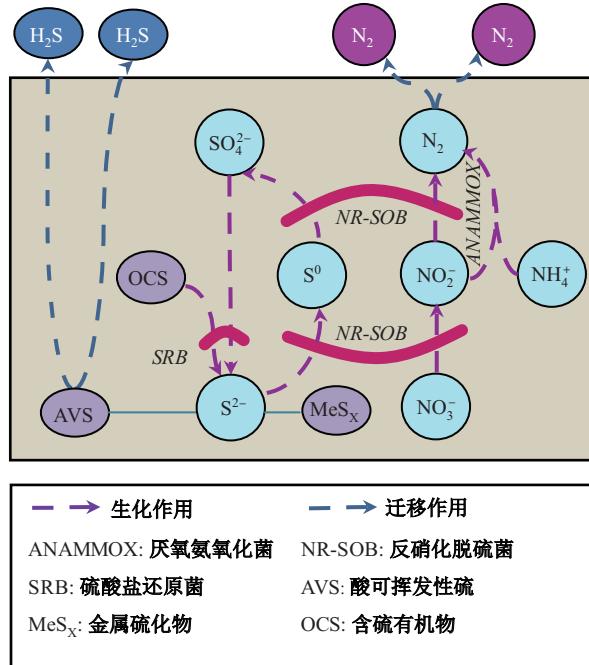


图2 城市河道内源硫与厌氧氨氧化相互作用的主要微生物过程

Fig. 2 The main microbial processes of interaction between endogenous sulfur and ANAMMOX in urban rivers

由于硫自养反硝化可以实现硝酸盐和硫化物的“同步削减”, 对于反硝化脱硫菌(NR-SOB, Nitrate-Reducing-Sulfide-Oxidizing Bacteria)的研究逐步受到关注, 目前主要集中在地下水、油田以及高浓度硫酸工业废水^[31]。最近的研究报道^[54], NR-SOB 在感潮型沉积物中起着重要的角色; 然而关于河道底泥中 NR-SOB 的研究较少^[55], 已有文献表明 *Thiobacillus denitrificans* 和 *Sulfurimonas denitrificans* 是常见的反硝化脱硫菌; 本课题组近期在黑臭河道底泥中也检测到了上述反硝化脱硫菌, 且发现投加硝酸钙后 *Thiobacillus* 成为优势菌属^[29]。对于黑臭河道治理后呈现的高氮营养盐和较低 C/N 生境, 反硝化脱硫菌在其氮转化过程中作用和地位值得重视。

另外, 硫酸盐还原菌(SRB, Sulfate Reducing Bacteria)在海洋、河口以及湿地沉积物中的分布得到了较多的关注^[56-58], 对于硫酸盐还原厌氧氨氧化菌(SR-ANAMMOX)的研究目前主要针对菌群的分离鉴定^[59]、废水处理反应器的启动^[60-62]以及探讨培养体系中发生 SR-ANAMMOX 的可能性^[63], 关于城市河道中 SRB 种群结构和数量变化的研究很少, 只是对其给予初步的分析和推测^[12, 64]。

3 结论与展望

自从 2015 年“水十条”的颁布以来,全国各地广泛开展了城市黑臭河道的整治工作,然而黑臭河道治理后凸现的高氮营养盐问题将会引发城市河道由“黑臭”演变为“水华”这一新的环境问题,因此必须对进一步削减城市河道的氮营养盐给予重视。对于黑臭河道治理后呈现的高氮营养盐和较低 C/N 生境,为了实现对内源氮的有效削减,不仅探讨如何强化传统的硝化-反硝化耦合脱氮过程(例如优化曝气方式或覆盖介体材料以创造好氧-缺氧微环境、引入缓释碳源以提高 C/N 等),而且新型化能自养的厌氧氨氧化过程在河道氮转化过程中作用也值得重视,包括“硫自养部分反硝化-厌氧氨氧化”、“硫酸盐型厌氧氨氧化”和“铁自养型厌氧氨氧化”等,以及内源硫如何影响厌氧氨氧化过程的发生和二者之间的耦合关系等。这些不仅为强化氮营养盐的去除提供崭新的视角,而且为阐明水圈微生物驱动氮与其他元素循环机制的基础理论提供有益补充。

[参 考 文 献]

- [1] 黄燕, 黄民生, 徐亚同, 等. 上海城市河道治理工程简介[J]. 环境工程, 2007, 25(2): 85-88.
- [2] 王英才, 刘永定, 郝宗杰, 等. 上海市几条黑臭河道治理效果的比较与分析[J]. 水生生物学报, 2009, 33(2): 355-359.
- [3] 张晓红, 宋肖峰, 蔡国强, 等. 生态修复综合技术在杭州虾龙圩河的应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(12): 4535-4542.
- [4] 汪建华, 王文浩, 何岩, 等. 原位曝气修复黑臭河道底泥内源营养盐的示范工程效能分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 5301-5307.
- [5] 赵联芳, 黄靖宇. 苏州太仓市污水处理厂尾水排放河道的治理[J]. 水资源保护, 2015, 31(1): 63-68.
- [6] 郑晓英, 朱星, 周翔, 等. 铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2412-2418.
- [7] 陈玉辉. 典型城市黑臭河道治理后的富营养化分析与预测研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [8] 曹承进, 陈振楼, 黄民生. 城市黑臭河道富营养化次生灾害形成机制及其控制对策思考[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2015 (2): 9-21.
- [9] SUN W, XIA C Y, XU M Y, et al. Diversity and distribution of planktonic anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in the Dongjiang River, China[J]. Microbiological Research, 2014, 169(12): 897-906.
- [10] HAN H, LI Z. Effects of macrophyte-associated nitrogen cycling bacteria on ANAMMOX and denitrification in river sediments in the Taihu Lake region of China[J]. Ecological Engineering, 2016, 93: 82-90.
- [11] ZHANG S B, XIA X H, LIU T, et al. Potential roles of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) in overlying water of rivers with suspended sediments [J]. Biogeochemistry, 2017, 132(3): 237-249.
- [12] 焦涛. 城市河道沉积物—水体系硫化物赋存特征及反硫化过程研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [13] 李文超. 曝气扰动下城市黑臭河道底泥内源硫、铁行为与氮循环耦合作用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [14] 李真, 黄民生, 何岩, 等. 铁和硫的形态转化与水体黑臭的关系[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6E): 1-3,7.
- [15] 何岩, 沈叔云, 黄民生, 等. 城市黑臭河道底泥内源氮硝化-反硝化作用研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1166-1170.
- [16] 张丹, 王川, 王艳云, 等. 杭州西湖底泥反硝化作用初探[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(3): 18-24.
- [17] 涂玮灵. 反硝化菌剂对黑臭河道底泥的修复效果及条件优化研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [18] THAMDRUP B, DALSGAARD T. Production of N₂ through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(3): 1312-1318.
- [19] DEVOL A H. Denitrification, Anammox, and N₂ Production in Marine Sediments[J]. Annual Review of Marine Science, 2015, 7: 403-423.
- [20] SALK K R, ERLER D V, EYRE B D, et al. Unexpectedly high degree of anammox and DNRA in seagrass sediments: Description and application of a revised isotope pairing technique[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2017, 211: 64-78.
- [21] YANG X R, WENG B S, LI H, et al. An overlooked nitrogen loss linked to anaerobic ammonium oxidation in estuarine sediments in China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(10): 2537-2546.
- [22] ZHENG Y L, JIANG X F, HOU L J, et al. Shifts in the community structure and activity of anaerobic ammonium oxidation bacteria along an estuarine salinity gradient[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2016, 121(6): 1632-1645.
- [23] ZHAO J W, YIN X J, HUANG S S, et al. Distribution and diversity of anammox bacteria in two eutrophic lakes in Wuhan City, China[J]. Fundamental and Applied Limnology, 2017, 190(3): 183-187.

- [24] YOSHINAGA I, AMANO T, YAMAGISHI T, et al. Distribution and diversity of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) bacteria in the sediment of a eutrophic freshwater lake, Lake Kitaura, Japan[J]. Micorbes and Environments, 2011, 26: 189-197.
- [25] 王彬允,祝贵兵,曲冬梅,等.白洋淀富营养化湖泊湿地厌氧氨氧化菌的分布及对氮循环的影响[J].生态学报,2012,32(21):6591-6598.
- [26] 郑艳玲.长江口潮滩湿地氨氧化菌群动态及活性研究[D].上海:华东师范大学,2015.
- [27] HU B L, SHEN L D, ZHENG P, et al. Distribution and diversity of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in the sediments of the Qiantang River[J]. Environmental Microbiology Reports, 2012, 4(5): 540-547.
- [28] 李志洪.曝气扰动模式对黑臭河道底泥内源营养盐行为的影响作用及氮转化功能菌群响应规律研究[D].上海:华东师范大学,2015.
- [29] 汪建华.城市黑臭河道氮转化途径分型表征及微生物作用机理研究[D].上海:华东师范大学,2017.
- [30] 赵永强,夏永秋,李博伦,等.采用膜进样质谱同时测定河流沉积物反硝化和厌氧氨氧化[J].农业环境科学学报,2014,33(4):794-802.
- [31] 陈建军,张建,黄民生,等.硝酸盐介导底泥硫自养反硝化过程、效应和应用[J].华东师范大学学报(自然科学版),2015(2):91-97.
- [32] YANG X, HUANG S, WU Q, et al. Nitrate reduction coupled with microbial oxidation of sulfide in river sediment [J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(9): 1435-1444.
- [33] 余光伟,余绵梓,种云霄,等.投加硝酸钙对城市黑臭河道底泥氮迁移转化的影响[J].环境工程学报,2015,9(8):3625-3632.
- [34] KRAFT B, TEGETMEYER H E, SHARMA R, et al. The environmental controls that govern the end product of bacterial nitrate respiration [J]. Science, 2014, 345: 676-679.
- [35] VACLAVKOVA S, JORGENSEN C J, JACOBSEN O S, et al. The importance of microbial iron sulfide oxidation for nitrate depletion in anoxic Danish sediments [J]. Aquatic Geochemistry, 2014, 20: 419-435.
- [36] HAYAKAWA A, HATAKEYAMA M, ASANO R. Nitrate reduction coupled with pyrite oxidation in the surface sediments of a sulfide-rich ecosystem [J]. Journal of Geophysical Research, 2013, 118(2): 639-649.
- [37] RUSS L, SPETH D R, JETTEN M S M, et al. Interactions between anaerobic ammonium and sulfur-oxidizing bacteria in a laboratory scale model system [J]. Environmental Microbiology, 2014, 16: 3487-3498.
- [38] SCHRUM H N, SPIVACK A J, KASTNER M, et al. Sulfate-reducing ammonium oxidation: A thermodynamically feasible metabolic pathway in subseafloor sediment [J]. Geology, 2009, 37(10): 943-946.
- [39] WENK C B, BLEES J, ZOPFI J, et al. Anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) bacteria and sulfide-dependent denitrifiers coexist in the water column of a meromictic south-alpine lake [J]. Limnology Oceanography, 2013, 58: 1-12.
- [40] DAPENA-MORA A, FERNANDEZ I, CAMPOS J L, et al. Evaluation of activity and inhibition effects on anammox process by batch tests based on the nitrogen gas production [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2007, 40: 859-865.
- [41] JIN R C, YANG G F, ZHANG Q Q, et al. The effect of sulfide inhibition on the ANAMMOX process [J]. Water Research, 2013, 47(3): 1459-1469.
- [42] DENG F Y, HOU L J, LIU M, et al. Dissimilatory nitrate reduction processes and associated contribution to nitrogen removal in sediments of the Yangtze Estuary [J]. Journal of Geophysical Research, 2015, 120(8): 1521-1531.
- [43] JENSEN M M. Rates and regulation of anaerobic ammonium oxidation and denitrification in the Black Sea [J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(1): 23-36.
- [44] VANDE GRAAF A A, DE BRUIJN P, ROBERTSON L A, et al. Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor [J]. Microbiology, 1996, 142: 2187-2196.
- [45] KALYUZHNYI S, GLADCHENKO M, MULDER A, et al. DEAMOX—New biological nitrogen removal process based on anaerobic ammonia oxidation coupled to sulphide-driven conversion of nitrate into nitrite [J]. Water Research, 2006, 40: 3637-3645.
- [46] GREENE E A, HUBERT C, NEMATI M, et al. Nitrite reductase activity of sulphate-reducing bacteria prevents their inhibition by nitrate-reducing, sulphide-oxidizing bacteria [J]. Environmental Microbiology, 2003, 5(7): 607-617.
- [47] JIN R, YANG G, YU J, et al. The inhibition of the Anammox process: A review [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 197: 67-79.
- [48] SHAN J, YANG P, SHANG X, et al. Anaerobic ammonium oxidation and denitrification in a paddy soil as affected by temperature, pH, organic carbon, and substrates [J]. Biology & Fertility of Soils, 2018, 54(3): 341-348.
- [49] 崔丽,王慧,黄开拓,等.硫酸盐型厌氧氨氧化的反应机理及启动过程影响因素综述[J].化工环保,2017,37(2):159-165.

(下转第130页)

- [13] KENGNE I M, BRISAUD F, AKOA A, et al. Mosquito development in a macrophyte-based wastewater treatment plant in Cameroon (Central Africa) [J]. Ecological Engineering, 2003, 21(1): 53-61.
- [14] 陈奇. 上海某组合式污水处理试验系统中蚊虫孳生规律及影响因素研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [15] WALTON W E, POPKO D A, VAN DAM A R, et al. Width of planting beds for emergent vegetation influences mosquito production from a constructed wetland in California (USA) [J]. Ecological Engineering. 2012, 42: 150-159.
- [16] SUNLISH I P, REUBEN R. Factors influencing the abundance of Japanese encephalitis vectors in ricefields in India—I. Abiotic [J]. Medical & Veterinary Entomology, 2001, 15(4): 381.
- [17] 张磊, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系 [J]. 环境科学, 2015(6): 2061-2069.
- [18] 徐承龙, 姜志宽. 蚊虫防治(二)——蚊虫的生态习性与常见种类 [J]. 中华卫生杀虫药械, 2006(5): 403-407.

(责任编辑: 张 晶)

(上接第 73 页)

- [50] SCHUBERT C J, DURISCH-KAISER E, WEHRLI B, et al. Anaerobic ammonium oxidation in a tropical freshwater system (Lake Tanganyika) [J]. Environmental Microbiology, 2006, 8: 1857-1863.
- [51] 徐栎亚, 赵雪, 庄林杰, 等. 基于hzsB 功能基因研究典型湿地沉积物中厌氧氨氧化细菌的群落结构 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4636-4645.
- [52] 沈李东, 胡宝兰, 郑平, 等. 西湖底泥中厌氧氨氧化菌的分子生物学检测 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1609-1615.
- [53] YANG Y Y, DAI Y, LI N N, et al. Temporal and spatial dynamics of sediment anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) bacteria in Freshwater Lakes [J]. Microbial Ecology, 2017, 73(2): 285-295.
- [54] DYKSMA S, BISCHOF K, FUCHS B M, et al. Ubiquitous gammaproteobacteria dominate dark carbon fixation in coastal sediments [J]. Isme Journal, 2016, 10: 1939-1953.
- [55] SHAO M, ZHANG T, FANG H H. Sulfur-driven autotrophic denitrification: diversity, biochemistry and engineering applications [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 88(5): 1027-1042.
- [56] 张玉, 贺惠, 米铁柱, 等. 东海海域表层沉积物中硫酸盐还原菌分布特征研究 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3750-3758.
- [57] 张伟, 张丽丽. 云南洱海沉积物中硫酸盐还原菌的时空分布特征 [J]. 地球与环境, 2016, 44(2): 177-184.
- [58] 刘建丽, 赵吉, 武琳慧. 乌梁素海湖滨湿地硫酸盐还原菌种群分布 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 358-363.
- [59] 蔡靖, 蒋坚祥, 郑平. 一株硫酸盐型厌氧氨氧化菌的分离和鉴定 [J]. 中国科学: 化学, 2010, 40(4): 421-426.
- [60] 赖杨岚. 硫酸盐型厌氧氨氧化的启动特性与影响因素研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [61] 刘正川, 袁林江, 周国标, 等. 从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 [J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3345-3351.
- [62] RIKMANN E, ZEKKER I, TOMINGAS M, et al. Sulfate-reducing anammox for sulfate and nitrogen containing wastewaters [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 57(7): 3132-3141.
- [63] 完颜德卿. ANAMMOX 培养物对氨与硫酸盐同步转化机制的研究 [D]. 江苏 苏州: 苏州科技大学, 2017.
- [64] 姚丽平. 城市黑臭河道底泥微生物群落结构对人工曝气的响应特征及机理研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2014.

(责任编辑: 李 艺)