

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闯光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌 <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13 的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性

唐崇俭^{1,3}, 熊蕾^{1,3}, 王云燕^{1,3}, 郑平²

(1. 中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083; 2. 浙江大学环境与资源学院环境工程系, 杭州 310058; 3. 国家重金属污染防治工程技术研究中心, 长沙 410083)

摘要: 通过运行厌氧氨氧化上流式厌氧污泥床(upflow anaerobic sludge blanket, UASB)反应器, 培育获得了高效厌氧氨氧化颗粒污泥(high-rate ANAMMOX granules, HAG). 以絮状厌氧氨氧化污泥(flocculent ANAMMOX sludge, FAS)作为对照, 采用批次试验研究了 HAG 的动力学特性. 结果表明, HAG 的比厌氧氨氧化活性(specific ANAMMOX activity, SAA)为 $2.63 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 是 FAS 的 2.5 倍; 对基质氨和亚硝酸盐的半速率常数(K_s)分别为 $17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于 FAS 的对应值; 对氨、游离氨和亚硝酸盐的抑制常数(K_i)分别为 11 679、505 和 $735 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远远高于 FAS 的对应值. HAG 具有优良的动力学性质, 可使其在不利环境中竞争基质, 这对新型的厌氧氨氧化菌种流加工艺具有积极意义.

关键词: 厌氧氨氧化; 颗粒污泥; 动力学; 有机物; 菌种流加

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3544-08

Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules

TANG Chong-jian^{1,3}, XIONG Lei^{1,3}, WANG Yun-yan^{1,3}, ZHENG Ping²

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Department of Environmental Engineering, College of Environment and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. National Engineering Research Center for Control and Treatment of Heavy Metal Pollution, Changsha 410083, China)

Abstract: The high-rate ANAMMOX granules (HAG) were cultivated in an ANAMMOX upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. The kinetic characteristics of the HAG were investigated through batch tests, using flocculent ANAMMOX sludge (FAS) as a control. The results suggested that the specific ANAMMOX activity (SAA) of the HAG reached as high as $2.63 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, which was 2.5 times of that of FAS. The half saturation constants for ammonium and nitrite of the HAG were $17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, both were lower than those of the FAS. The half inhibition constants of ammonium, free ammonia and nitrite were 11 679, 505 and $735 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, which were far higher than the corresponding values of the FAS. The better kinetic performance of the HAG contributed to the successful competition of substrates under tough conditions, which was helpful for the novel biomass supplementation process for enhancement of the ANAMMOX performance.

Key words: ANAMMOX; granular sludge; kinetics; organic matter; biomass supplementation

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)可在缺氧条件下以亚硝酸盐为电子受体将氨氧化为氮气^[1]. 厌氧氨氧化工艺无需曝气, 且剩余污泥量少, 可减少能耗^[2]. 据报道, 该工艺去除 1 kg 氮的成本仅为 0.75 欧元, 远远低于传统硝化-反硝化工艺(1 kg 氮需 2~5 欧元)^[3]. 因此, 自其问世以来, 即受到了研究者的高度关注^[4~6], 成为废水生物脱氮领域的重要内容.

但由于 ANAMMOX 菌为自养型细菌, 生长缓慢、细胞产率低^[1,2], 且易受环境条件(如低温、水质)影响^[2,7,8], 导致厌氧氨氧化污泥培育、扩增困难, 严重制约了厌氧氨氧化工艺的工程应用. 实际含氮废水成分复杂, 往往伴随有有机物和(或)毒物(如味精废水、制药废水以及垃圾渗滤液等)^[8~11], 它们会抑制厌氧氨氧化菌的活性, ANAMMOX 反应器往往难以稳定运行, 甚至厌氧氨氧化功能完全消

失^[8~11]. 有研究者提出了外投加高效 ANAMMOX 菌种以强化反应器脱氮性能的新思路(即菌种流加技术)^[8,12,13], 已成为 ANAMMOX 工艺推广应用的重要手段^[8,12,13]. 但迄今, 对厌氧氨氧化菌种流加工艺的理论基础研究尚显不足. 对于菌种流加工艺, 需在最优条件下培育获取足量高效厌氧氨氧化颗粒污泥(high-rate ANAMMOX granules, HAG), 以用于后续流加^[8]. 由于 ANAMMOX 菌为自养菌, 生长缓慢, 厌氧氨氧化颗粒污泥的形成过程十分缓慢^[14], 迄今关于 HAG 特性的研究尚不多见^[15]. 本研究通过优化 UASB 反应器的运行工况, 培育获得

收稿日期: 2012-12-23; 修订日期: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51204213); 中国博士后科学基金特别项目(2013T60782); 中国博士后科学基金项目(2012M511769); 湖南省科技计划重点项目(2013WK2007); 中南大学博士后科研启动项目

作者简介: 唐崇俭(1984~), 男, 博士后, 讲师, 主要研究方向为废水生物处理与环境生物技术, E-mail: chjtang@csu.edu.cn

HAG; 以絮状厌氧氨氧化污泥 (floculent ANAMMOX sludge, FAS) 作为对照, 采用批次试验研究了 HAG 的动力学特性, 以期为新型 ANAMMOX 菌种流加工艺提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验废水

试验采用模拟废水, 其组成为 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[16]: KH_2PO_4 0.01, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.0056, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.3, KHCO_3 1.25; 微量元素浓缩液 I、II 各 $1.25 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。微量元素浓缩液 I 的成分 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 为: EDTA 5, FeSO_4 5; 微量元素浓缩液 II 的成分为 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[17]: EDTA 15, H_3BO_3 0.014, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.99, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.25, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.43, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.19, $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.21, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.22。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NaNO_2 提供, 浓度按需配制。

1.2 试验装置

如图 1, 试验采用上流式厌氧生物反应器 (UASB), 由有机玻璃制成, 总体积 1.5 L, 有效容积 1.1 L。外裹黑布, 以防光的负面影响^[18]。反应器进水 pH 控制在 6.8~7.0 左右, 操作温度控制在 $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 。在运行过程中, 控制反应器的进水氨氮、亚硝酸盐浓度分别控制为 $250 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $270 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 通过逐步缩短水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT), 将反应器容积基质氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N}$) 去除速率提高至 $50 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 以上, 以培育 HAG。

用作对照的供试 FAS 取自本课题组运行的

ANAMMOX 序批式反应器 (sequencing batch reactor, SBR), 总体积 2.5 L, 有效容积 2.2 L。在运行过程中, 始终控制 SBR 的运行周期为 12 h, 其中进水 10 min, 搅拌 11.5 h, 沉淀 10 min, 排水 10 min, 容积负荷控制为 $0.30 \sim 0.70 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

1.3 接种污泥

UASB 反应器的接种污泥取自实验室培育的厌氧氨氧化污泥, 其比厌氧氨氧化活性 (specific ANAMMOX activity, SAA) 为 $1.9 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。接种后从反应器中部取样, 测得污泥浓度 (以 VSS 计) 为 $19 \sim 22 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, VSS/TSS 为 0.86~0.89。

1.4 测定项目与方法

氨氮: 水杨酸-次氯酸盐光度法^[19]; 亚硝氮: *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法^[19]; 硝氮: 紫外分光光度法^[19]; pH: pH-9V 型酸度计; SS、VSS: 重量法^[19]; 化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD): 重铬酸钾法^[19]; 颗粒污泥粒径分布: QCOLite 图形分析软件。

1.5 批次试验

1.5.1 比厌氧氨氧化/反硝化活性测定

在 120 mL 血清瓶中加入 100 mL 含一定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度的模拟废水 (测比反硝化活性时为含葡萄糖和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的模拟废水), 再加入经磷酸缓冲液 ($\text{pH} = 7$) 冲洗 5 次后的污泥, 保持初始污泥浓度约为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 用 95% Ar -5% CO_2 气体置换其中的空气 20 min。血清瓶用丁基橡胶塞塞紧, 然后用铝盖加固, 置于小型摇床上, 摇床置于 35°C 恒温培养箱中。控制摇床转速为 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 定时取样后, 分别测定水样中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度。由基质浓度降解曲线, 计算出污泥的比厌氧氨氧化活性 [$\text{N}/(\text{VSS} \cdot t)$ 或 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{VSS} \cdot t)$] 和比反硝化活性 [$\text{NO}_2^- - \text{N}/(\text{VSS} \cdot t)$], 单位为 $\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。

1.5.2 有机物的短期影响

葡萄糖是自然界中最常见的天然有机物。在废水处理系统中, 长链有机物 (大分子有机物) 一般都要先转化为葡萄糖, 然后再分解为低分子挥发性脂肪酸和醇类。本研究选取葡萄糖作为研究对象, 考察其对厌氧氨氧化污泥的短期影响。

在 120 mL 血清瓶中加入 100 mL 含 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和一定有机物 (葡萄糖) 浓度的模拟废水, 再加入经磷酸缓冲液 ($\text{pH} = 7$) 冲洗 5 次后的污泥, 保持初始污泥浓度约为 1

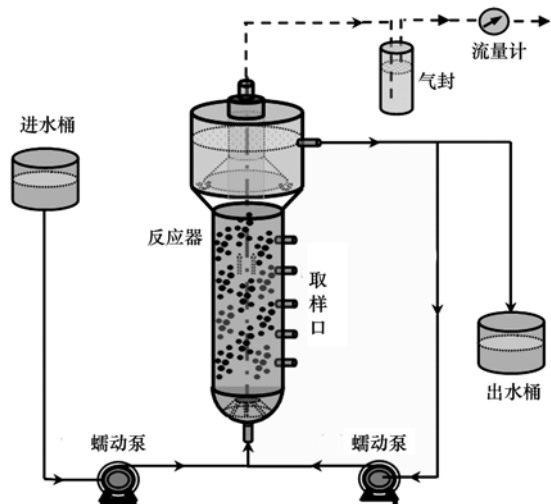


图 1 厌氧氨氧化 UASB 反应器系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of the ANAMMOX UASB reactor system

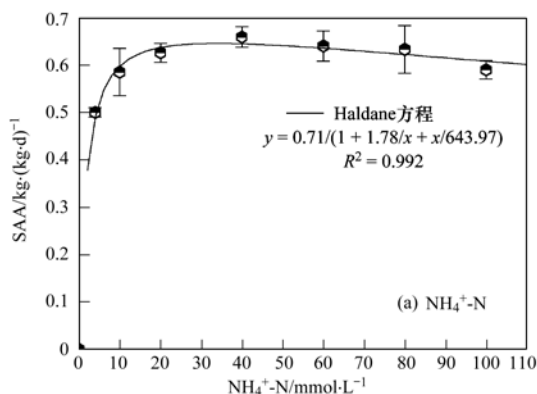
$\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 用 95% Ar-5% CO_2 气体置换其中的空气 20 min. 血清瓶用丁基橡胶塞塞紧, 然后用铝盖加固, 置于小型摇床上, 摇床置于 35°C 恒温培养箱中. 控制摇床转速为 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 定时取样 4 h, 分别测定水样中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度, 考察有机物(葡萄糖)浓度对 HAG 活性的短期影响.

2 结果与分析

2.1 FAS 的动力学特性

供试 FAS 取自本课题组的 SBR. 在长期运行过程中($>100 \text{ d}$), SBR 反应器进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度分别保持为 $250 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $300 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 $(29 \pm 16) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度为 $(6 \pm 8) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度为 $(75 \pm 9) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 平均 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 去除率分别为 $92\% \pm 4\%$ 和 $99\% \pm 2\%$; 平均容积 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和基质氮去除速率分别为 0.30 、 0.39 和 $0.69 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 反应器内 FAS 呈淡红色或棕褐色.

2.1.1 厌氧氨氧化动力学特性



FAS 的厌氧氨氧化动力学特性如图 2 所示. 从中可见, FAS 的厌氧氨氧化动力学数据符合基质抑制动力学模型——Haldane 模型^[15] [式(1)]. 采用该模型对试验数据进行拟合, 分别得到 FAS 对氨[图 2(a)]和亚硝酸盐[图 2(b)]的动力学方程, 拟合常数(R^2)分别为 0.992 和 0.983(图 2). 由式(2)、式(3)可得 FAS 的最大比厌氧氨氧化活性(SAA)为 $1.11 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 对氨的半速率常数($K_{\text{S}, \text{NH}_4^+ \text{-N}}$)为 $1.78 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) [图 2(a)], 对亚硝酸盐的半速率常数($K_{\text{S}, \text{NO}_2^- \text{-N}}$)为 $1.51 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) [图 2(b)]; 氨的半抑制常数($K_{\text{I}, \text{NH}_4^+ \text{-N}}$)为 $644.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($9016 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) [图 2(a)], 对应的游离氨(FA)半抑制浓度($\text{IC}_{50, \text{FA}}$)为 $430 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝酸盐的半抑制常数($K_{\text{I}, \text{NO}_2^- \text{-N}}$)为 $12.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($179 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) [图 2(b)].

$$v = \frac{v_{\max}}{1 + \frac{K_{\text{S}}}{S} + \frac{S}{K_{\text{I}}}} \quad (1)$$

式中, v 为比污泥活性; $v_{\max}$ 为最大比污泥活性; K_{S} 为半速率常数; K_{I} 为半抑制常数.

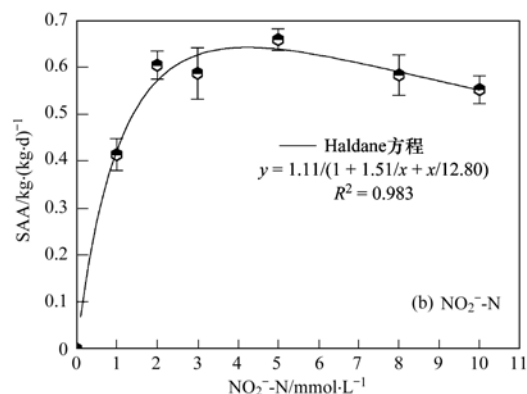


图 2 FAS 的厌氧氨氧化动力学特性

Fig. 2 ANAMMOX kinetics of FAS

2.1.2 有机物短期影响特性

在实际废水中, 有机物往往与氨共存. 有机物会对厌氧氨氧化工艺性能产生不利影响^[9~11]. 本研究采用批次试验研究了有机物(葡萄糖)对 FAS 的短期(4 h)影响, 结果如图 3(a) 所示. 根据图 3(a) 中的拟合曲线可得到葡萄糖对 FAS 厌氧氨氧化活性的半抑制浓度(IC_{50})为 $67.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($12960 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 以 COD 计). 在生物脱氮处理系统中, 有机物浓度一般低于 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[20], 表明该浓度的有机物(葡萄糖)对 FAS 的直接抑制作用可忽略.

2.1.3 反硝化活性

采用批次试验测定了 FAS 的反硝化活性, 结果如图 4(a) 所示. 批次试验测得 NO_2^- 和有机物同时减少, 表明 FAS 具有反硝化活性, 计算得到其比反硝化活性(SDA)为 $0.07 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 检测到 FAS 具有反硝化活性, 表明其具有反硝化功能, 可利用污泥水解释放的有机物进行反硝化^[9,11], 这可能与其中存在一定量的反硝化菌有关.

2.2 HAG 的培育及动力学特性

控制厌氧氨氧化 UASB 反应器的进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度分别为 $250 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $270 \sim 370 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 以出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度为控制指标, 始终

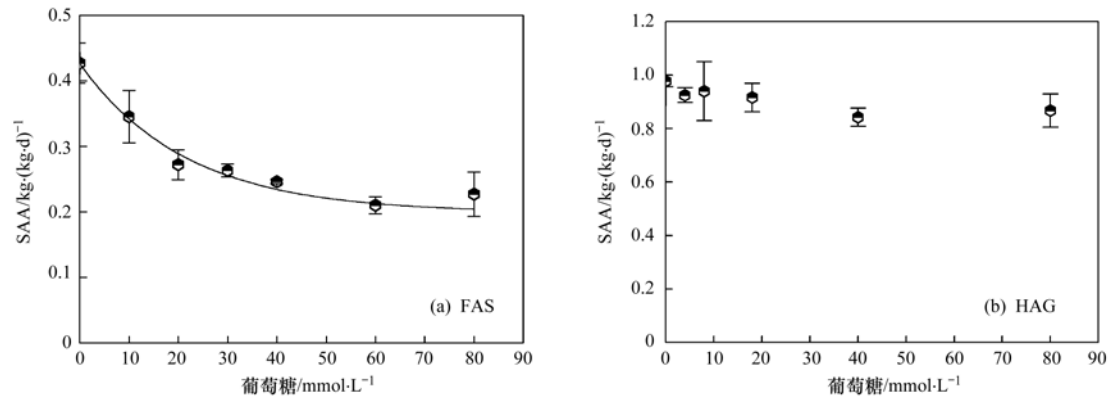


图3 葡萄糖对厌氧氨氧化污泥活性的短期影响

Fig. 3 Short-term effect of glucose on ANAMMOX activity of FAS and HAG

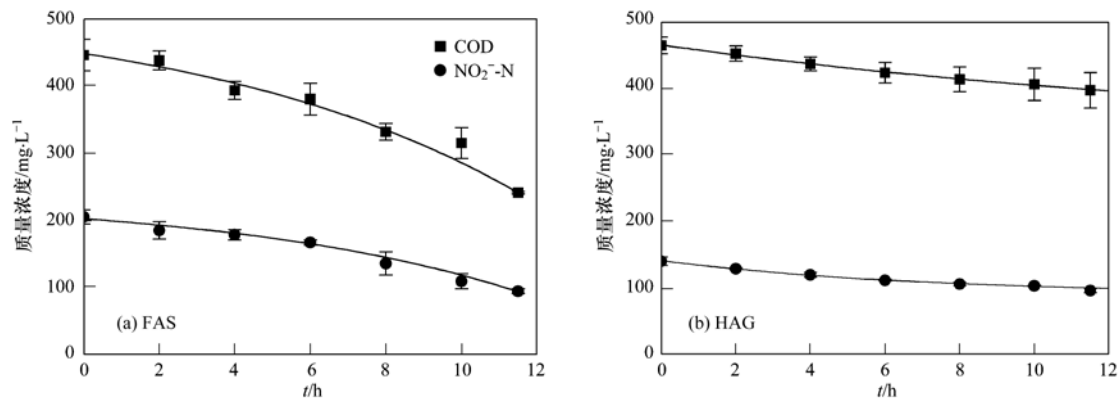


图4 FAS和HAG的反硝化活性测定

Fig. 4 SDA determination of FAS and HAG

保持反应器出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 逐步将 HRT 由 0.55 h 缩短为 0.21 h [图 5(a)], 在整个运行过程中, 反应器的运行性能保持稳定, 出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度分别为 $(78 \pm 15) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(54 \pm 11) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 去除率分别为 $77.8\% \pm 20\%$ 和 $84.3\% \pm 7.3\%$, 反应器的平均容积基质氮去除速率为 $(54.71 \pm 7.88) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 处于文献报道的最高水平 $[26 \sim 77 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}]^{[4,5,21]}$. 在此工况下长期运行, 培育出的 ANAMMOX 污泥呈鲜艳的血红色, 颗粒粒径为 $2 \sim 4 \text{ mm}$ (图 6).

2.2.1 厌氧氨氧化动力学特性

HAG 的厌氧氨氧化动力学特性如图 7 所示. 采用 Haldane 模型拟合得到 HAG 对氨和亚硝酸盐的动力学方程, 拟合常数 (R^2) 分别为 0.966 和 0.985 .

得到 HAG 的其最大比厌氧氨氧化活性 (SAA) 为 $2.63 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; HAG 对氨的半速率常数 ($K_{\text{S}, \text{NH}_4^+ \text{-N}}$) 为 $1.21 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 见图 7 (a); 对亚硝酸盐的半速率常数 ($K_{\text{S}, \text{NO}_2^- \text{-N}}$) 为 $1.39 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 见图 7(b); 氨对 HAG 的半抑制常数 ($K_{\text{I}, \text{NH}_4^+ \text{-N}}$) 为 $834.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($11\,679 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 见图 7(b); 对应的游离氨 (FA) 半抑制浓度 ($\text{IC}_{50, \text{FA}}$) 为 $505 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝酸盐对 HAG 的半抑制常数 ($K_{\text{I}, \text{NO}_2^- \text{-N}}$) 为 $52.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($735 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 见图 7(b); 与 FAS 的 ANAMMOX 动力学数据相比 (表 1), HAG 的 SAA 显著较高 (约为 FAS 的 2.5 倍), K_{S} 值更低 (约为 FAS 的 $1/2$), K_{I} 值较高 ($K_{\text{I}, \text{NO}_2^- \text{-N}}$ 约为 FAS 的 4 倍).

表1 不同厌氧氨氧化污泥的动力学特性比较

Table 1 Comparison of kinetic parameters of different ANAMMOX sludges							
污泥	SAA / $\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	ANAMMOX					反硝化 SDA/ $\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$
		$K_S/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		$K_I/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			
		$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	FA	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	
HAG	2.63	17	19	11 679	505	735	0.05
FAS	1.11	25	21	9 016	430	179	0.07

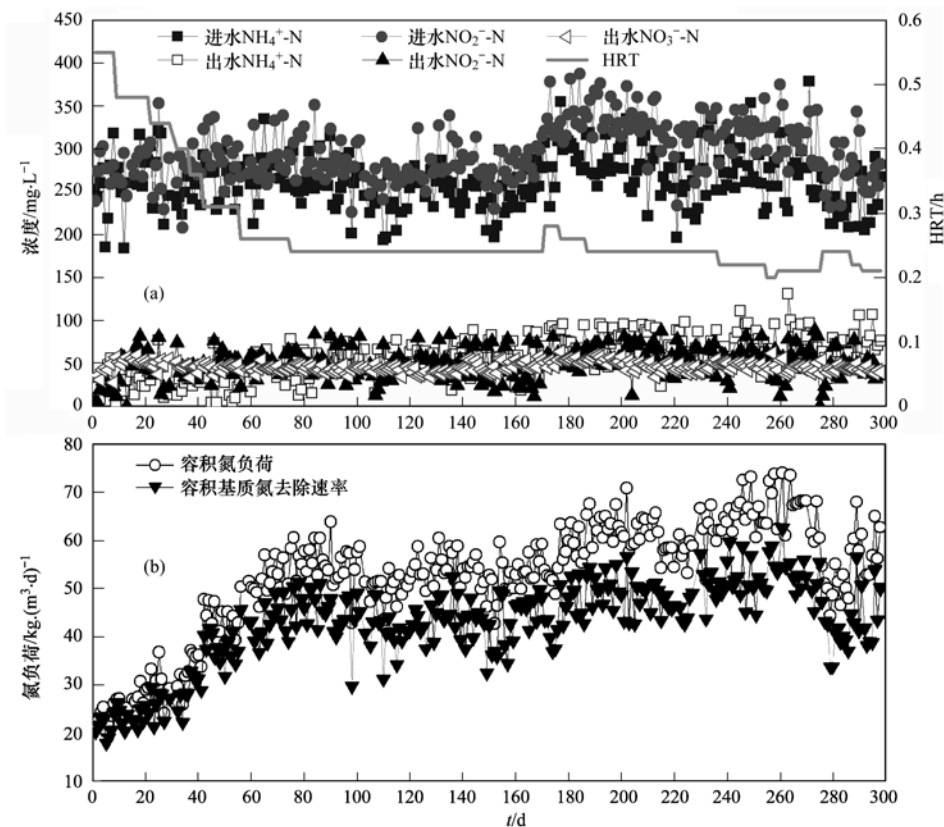


图5 厌氧氨氧化 UASB 反应器的运行性能

Fig. 5 Nitrogen removal performance of the ANAMMOX UASB reactor

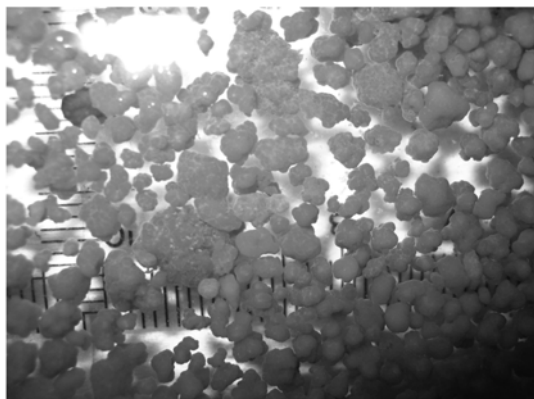


图6 HAG 的表现性状

Fig. 6 Apparent characteristics of HAG

2.2.2 有机物短期影响特性

有机物(葡萄糖)对 HAG 厌氧氨氧化活性的短期(4 h)影响如图 3(b)所示. 由图 3(b)可见,当葡萄糖浓度达 $80 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($15\,360 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), SAA 也未见显著降低,可见葡萄糖对 HAG 的短期影响可忽略不计. 与 FAS 相比, HAG 短期内所能承受的有机物浓度也较高(图 3),这可能与 HAG 中厌氧氨氧化菌含量较高有关.

2.2.3 反硝化活性

采用批次试验测定了 HAG 的比反硝化活性 (SDA) [如图 4(b)], 测得有机物和亚硝酸盐浓度均有降低, 表明 HAG 具有反硝化活性, 计算得其值为 $0.05 \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 低于 FAS, 表明 HAG 的反硝化功能较弱, 这可能与其中的反硝化菌含量较少相关.

3 讨论

3.1 HAG 的动力学特性及应用

研究表明, ANAMMOX 菌能分泌胞外多聚物^[21], 有助于形成厌氧氨氧化颗粒污泥. 厌氧氨氧化颗粒污泥具有优良的沉降性能、良好的生态结构, 是开发高效厌氧氨氧化工艺的重要技术手段^[21]. 目前, 关于高效厌氧氨氧化颗粒污泥 (HAG) 的理化特性已有一些报道, 如粒径分布、沉降性能、胞外多聚物和血红素含量等^[21~23]. 本研究以常规絮状厌氧氨氧化污泥 (FAS) 作为对照, 采用批次试验的方法, 研究了 HAG 的基质转化动力学特性、有机物短期影响特性以及反硝化性能. 结果表明, HAG 的比厌氧氨氧化活性为 FAS 的 2.5 倍, 较高的活性可促使基质快速转化, 缓解基质的自抑制作用,

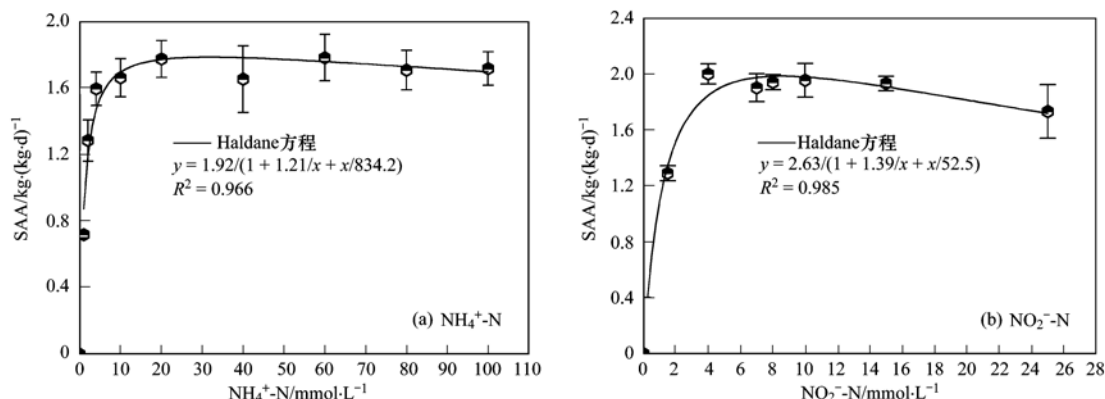


图 7 HAG 的厌氧氨氧化动力学特性

Fig. 7 ANAMMOX kinetic characteristics of the HAG

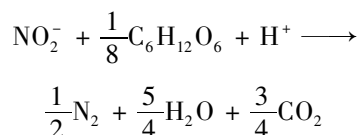
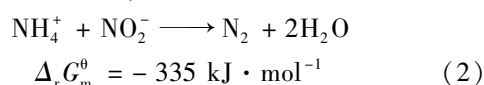
也可提高 ANAMMOX 污泥的产量. HAG 的亚硝酸盐半抑制常数为 FAS 的 4 倍, 表明 HAG 能承受更高的亚硝酸盐浓度, 具有更强的基质(亚硝酸盐)耐受能力, 有助于 ANAMMOX 反应器的高效、稳定运行. 试验还测得 HAG 对氨和亚硝酸盐的半速率常数与 FAS 相当, 表明 HAG 对基质的亲和力也相对较大, 更容易在竞争环境中竞争基质. 一般认为, 颗粒污泥由于传质限制, 其半速率常数往往大于絮状污泥. 而本研究测得 HAG 的半速率常数均低于 FAS, 这可能与 HAG 中 ANAMMOX 菌含量更高有关. 据报道, HAG 的 ANAMMOX 菌含量可达 $8.6 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$, 高出 FAS 两个数量级 ($3.7 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$)^[24].

厌氧氨氧化菌种流加工艺是近年来开发成功的一种强化脱氮技术^[8,12,13]. 通过外投加高效 ANAMMOX 污泥(菌种), 可增强反应器的厌氧氨氧化功能, 实现了 ANAMMOX 反应器的快速启动(生产性反应器的启动时间由 3.5 a 缩短至 6 个月^[12,13])和毒性含氮废水的高效脱氮[制药废水的容积基质氮去除速率达到 $9.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$]^[8]. HAG 的性能直接决定了厌氧氨氧化菌种流加工艺的有效性和经济性. 与 FAS 污泥相比, HAG 的厌氧氨氧化活性显著较高, 因而可大大降低污泥(菌种)的投加量; 能承受更高的基质(亚硝酸盐)浓度(表 1), 则更容易在不利环境中生存^[25]; 其他反应活性(如反硝化活性)很低, 适合流加至目标反应器以强化其厌氧氨氧化功能. HAG 的上述动力学特性为厌氧氨氧化菌种流加工艺提供了重要理论依据.

3.2 有机物对厌氧氨氧化工艺的影响

有机物是含氮废水中常见的污染物. Chamchoi 等^[9]和 Molinuevo 等^[10]研究均表明, 当废水中有机

物浓度(以 COD 计)仅为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 即可完全抑制 ANAMMOX 反应器的脱氮性能. Tang 等^[11]的研究则表明, 当废水中的 $\text{COD}/\text{NO}_2^- \text{-N}$ 达到 2.92 时, 经过 80 d 的连续运行, 反应器内的 ANAMMOX 菌逐渐水解消亡, 反应器的厌氧氨氧化功能几乎完全丧失. 本研究结果表明, 葡萄糖对 ANAMMOX 污泥的短期(4 h)影响几乎可以忽略, 表明其对 ANAMMOX 菌没有直接的抑制作用, 这与相关报道一致^[26]; 但试验测得 FAS 和 HAG 均具有一定的反硝化活性, 表明 ANAMMOX 污泥仍存活有少量反硝化菌. 一旦将 ANAMMOX 污泥长期放置于有机物环境中, 其中的反硝化菌可利用有机物作为电子供体进行反硝化, 进而对厌氧氨氧化工艺产生不利影响. 根据式(2)、式(3), 厌氧氨氧化与反硝化拥有共同的基质——亚硝酸盐, 两者存在基质竞争. 由于反硝化反应的标准吉布斯自由能减少量 ($\Delta_r G_m^\theta$) 更大, 反硝化先(易)于厌氧氨氧化发生. 因而长期存在有机物时, 污泥中的反硝化菌更易获得亚硝酸盐. 另外, 反硝化菌的生长速度更快, 其倍增时间以小时计, 细胞产率 (Y) 可达 $0.27 \sim 0.30$ ^[10,11,27], 而 ANAMMOX 菌的倍增时间达到 $11 \sim 30 \text{ d}$, 细胞产率仅为 0.066 ^[1,12], 反硝化菌更容易占据颗粒污泥的有效空间, 进而诱发生存空间竞争. 可见, 采用 ANAMMOX 工艺处理有机含氮废水时, ANAMMOX 菌在与反硝化菌的竞争中处于弱势, 反应器的厌氧氨氧化功能逐渐消退, 并最终完全丧失^[11].



$$\Delta_r G_m^0 = -402 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (3)$$

4 结论

(1) 保持进水 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度分别为 250 ~ 350 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 270 ~ 370 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 通过逐步缩短 HRT 至 0.21 h, 将厌氧氨氧化 UASB 反应器的容积基质氮去除速率提高至 54.71 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1} \pm 7.88 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 成功培育出高效厌氧氨氧化颗粒污泥, 其比厌氧氨氧化活性达到 2.63 $\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$.

(2) 高效厌氧氨氧化颗粒污泥 (HAG) 对基质氨和亚硝酸的半速率常数 (K_s) 分别为 17 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 19 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于常规絮状厌氧氨氧化污泥的对应值, 更容易在不利环境中获得基质; 对基质氨、游离氨和亚硝酸的抑制常数 (K_i) 分别为 11 679、505 和 735 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远高于常规絮状厌氧氨氧化污泥的对应值, 可承受更高的基质浓度, 有助于缓解基质自抑制作用。

(3) 厌氧氨氧化污泥具有潜在反硝化活性, 在处理有机含氮废水时将面临反硝化作用所致的基质竞争和空间竞争。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Jetten M S M, Strous M, Van De Pas Schoonen K T, *et al.* The anaerobic oxidation of ammonium [J]. *FEMS Microbiology Review*, 1998, **22**(5): 421-437.
- [3] Van Dongen U, Jetten M S M, Van Loosdrecht M C M. The SHARON®-ANAMMOX® process for treatment of ammonium rich wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(1): 153-160.
- [4] Tsushima I, Ogasawara Y, Kindaichi T, *et al.* Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (ANAMMOX) biofilm reactors [J]. *Water Research*, 2007, **41**(8): 1623-1634.
- [5] 唐崇俭, 郑平, 陈建伟, 等. 基于基质浓度的厌氧氨氧化工艺运行策略[J]. *化工学报*, 2009, **60**(3): 718-725.
- [6] 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.
- [7] 唐崇俭, 郑平, 陈建伟, 等. 中试厌氧氨氧化反应器的启动与调控[J]. *生物工程学报*, 2009, **25**(3): 406-412.
- [8] Tang C J, Zheng P, Chen T T, *et al.* Enhanced nitrogen removal from pharmaceutical wastewater using SBA-ANAMMOX process [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 201-210.
- [9] Chamchoi N, Nitisoravut S, Schmidt J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(9): 3331-3336.
- [10] 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.
- [11] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Suppression of anaerobic ammonium oxidizers under high organic content in high-rate Anammox UASB reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(6): 1762-1768.
- [12] 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.
- [13] Wett B. Solved upscaling problems for implementing deammonification of rejection water [J]. *Water Science and Technology*, 2006, **53**(12): 121-128.
- [14] 赵志宏, 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.
- [15] 祖波, 张代钧, 阎青. 颗粒污泥厌氧氨氧化动力学特性及微量 NO_2^- 的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 683-687.
- [16] Trigo C, Campos J L, Garrido J M, *et al.* Start-up of the Anammox process in a membrane bioreactor [J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, **126**(4): 475-487.
- [17] Van De 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**(8): 2187-2196.
- [18] Van Der Star W R L, Mielea A I, van Dongen U G J M, *et al.* The membrane bioreactor: A novel tool to grow ANAMMOX bacteria as free cells [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, **101**(2): 286-294.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] Wang C C, Lee P H, Kumar M, *et al.* Simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and denitrification (SNAD) in a full-scale landfill-leachate treatment plant [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1-3): 622-628.
- [21] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 135-144.
- [22] Chen J W, Ji Q X, Zheng P, *et al.* Floation and control of granular sludge in a high-rate ANAMMOX reactor [J]. *Water Research*, 2010, **44**(11): 3321-3328.
- [23] Lu H F, Zheng P, Ji Q X, *et al.* The structure, density and settlability of ANAMMOX granular sludge in high-rate reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 312-317.
- [24] Hu B L, Zheng P, Tang C J, *et al.* Identification and quantification of ANAMMOX bacteria in eight nitrogen removal reactors [J]. *Water Research*, 2010, **44**(17): 5014-5020.
- [25] Batchelor S E, Cooper M, Chhabra S R, *et al.* Cell density-

- regulated recovery of starved biofilm populations of ammonia-oxidizing bacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63**(6): 2281-2286.
- [26] Güven D, Dapena A, Kartal B, *et al.* Propionate oxidation by and methanol inhibition of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(2): 1066-1071.
- [27] Rittmann B E, McCarty P L. Environmental biotechnology: principles and applications [M]. Boston: McGraw-Hill Publishing, 2001.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-yi, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming, <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊