

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 刘珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH_4^+ / NO_3^- 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰氮生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/ NH_4^+ -N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响

王佩琦, 周伟丽*, 何圣兵, 黄荣振

(上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: 生物反硝化脱氮是现在最广泛使用的去除水中 NO_3^- -N的方法之一, 混养反硝化因其综合了异养和自养反硝化的共同特性而引人关注. 本实验探究添加一定量无机磷前后反硝化污泥活性及其微生物群落结构的变化. 结果表明, 混养反硝化污泥在无磷供给时也能进行反硝化反应, 但磷的添加可显著提高其生物量和反硝化活性, 反硝化污泥的异养反硝化活性明显高于自养部分, 添加无机磷之后, 自养和异养反硝化速率(以 N/VSS 计)分别可达 $0.056 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min} \cdot \text{g})^{-1}$ 和 $0.232 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min} \cdot \text{g})^{-1}$, 分别为加磷前的 2.9 和 3.9 倍. 此外, 微生物群落分析表明, 投加磷之后混养污泥中反硝化菌占比显著增加, 从 13.47% 增加到 44.82%; 优势菌属发生显著变化, 添加无机磷使自养、异养以及兼性反硝化菌的生长均得到有效促进.

关键词: 混养反硝化; 污泥活性; 生物多样性; 群落结构; 无机磷

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1350-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201706265

Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge

WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li*, HE Sheng-bing, HUANG Jung-chen

(School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Biological denitrification is now one of the most widely applied techniques to remove nitrogen from the aquatic environment, and mixotrophic denitrification has gained attention as it takes the characteristics of both heterotrophic and autotrophic denitrification. This study investigated the biological denitrification efficiency and the bacterial community structure of sludge sampled from a mixotrophic denitrification reactor, before and after adding a certain amount of phosphate. The results showed that the bacteria have the capability of denitrification even without phosphorus, but the addition of phosphorus could significantly improve the biomass and the denitrification activity. After phosphate was added, the autotrophic and heterotrophic denitrification activity increased to $0.056 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min} \cdot \text{g})^{-1}$ and $0.232 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min} \cdot \text{g})^{-1}$ on N/VSS, which was 2.9 and 3.9 times that of the sludge activity before phosphorus addition, respectively. The bacterial community structure illustrated that the denitrifiers increased remarkably from 13.47% to 44.82% and that the dominate bacteria have also changed. Meanwhile, the growth of autotrophic, heterotrophic, and mixotrophic bacteria were all improved significantly after phosphorus was added.

Key words: mixotrophic denitrification; sludge activity; biodiversity; community structure; inorganic phosphorus

随着城镇化和工业化进程的加快, 人口、经济快速增长, 工业农业活动的区域不断扩大, 密集的人类活动导致的世界性的水质问题日益严重, 影响人类的生存环境. 其中, 区域水环境中硝酸盐氮含量的增加是水质恶化的主要表现之一^[1]. 因此, 降低水体中不断增加的硝酸盐浓度已经引起了研究者的广泛关注.

目前, 生物反硝化研究主要集中在单一电子供体的异养和自养反硝化领域, 而对采用混合电子供体的混养反硝化研究较少, 但是研究者们发现, 混养反硝化是一种更为普遍的自然现象. 例如, Oh 等^[2]通过同时投加硫源硫磺颗粒和甲醇、垃圾渗滤液等作为电子供体, 发现反应器中同时进行了自养和异养反硝化, 而且混养反硝化相较于自养反硝化有更高的 NO_3^- -N去除率. Xu 等^[3]在 SBR 反应器实

验混养反硝化过程发现, 该反应器对硝酸盐、亚硝酸盐氮和硫化物的最高去除率分别为 100%、80% 和 100%, 并且通过微生物分析发现反应器中有近 43% 的兼性自养反硝化菌, 说明在混养反应器中, 自养、异养和兼养反硝化菌共同对脱氮起到了作用. 甚至有研究者发现^[4], 即便是在单一电子供体的异养(或自养)反硝化反应器中, 也有大量的自养(或异养)、兼性反硝化菌同时存在. 另外, 混养反硝化因为启动容易、脱氮效率较高、污泥产率较低、耗碱量小等优点, 渐渐引起研究者的关注^[5-8].

然而混养反硝化工艺的影响因素较多^[9,10], 工

收稿日期: 2017-06-27; 修订日期: 2017-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478262)

作者简介: 王佩琦(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生物脱氮, E-mail: wangpeiqi@sjtu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: weilizhou@sjtu.edu.cn

艺尚不成熟，还没有可以参考的最佳电子供体配比，可能影响混养反硝化的因素及其影响程度还不明确，如外加无机盐、温度、pH 和水力负荷等，自养、异养和兼养反硝化菌在混养活性污泥中的组成比例也较多变。因此，对于混养反硝化的研究还有很大空间。

本文研究了无机磷的添加对混养反硝化污泥的反硝化速率的影响，对比添加无机磷前后混养污泥内生物量的变化以及活性的变化，并根据高通量测序具体分析混养污泥微生物群落结构及其多样性，通过比较考察磷对于生物群落结构的影响。

1 材料与方法

1.1 样品来源与采集

本实验中所使用的反硝化污泥来源于实验室内混合营养条件下的升流式生物滤池反硝化反应器，连续反应器的进水利用自来水人工配制模拟硝酸盐污染水。本地自来水水中 NO_3^- -N浓度为 $2.5 \sim 2.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，pH 值为 $6.8 \sim 7.0$ ，TP 浓度低于检出限。反应器进水添加 NaNO_3 ，使 NO_3^- -N 浓度为 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右，按照自养、异养各负担一半氮负荷的计划投加硫源和碳源，碳源投加量按 COD/N(质量比)为 $5:1$ 计算，硫源投加量按照 S/N(量比)为 1 计算， KH_2PO_4 的投加量参考袁莹等^[11]对不同电子供体的硫自养反硝化的研究结果，选用具有最优脱氮效果的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 投加量，系统进水 KH_2PO_4 添加量按照 NO_3^- -N浓度等比例计算，投加量见表 1。反应第一阶段运行 120 d，仅在原水中添加 NaNO_3 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 CH_3COONa 。反应第二阶段运行 100 d，原水含氮量、碳源、硫源投加量不变，另外添加 KH_2PO_4 。

反应器稳定运行期间，分别于 9 月 26 日(第一阶段末期)和 11 月 9 日(第二阶段中期)从反应器下部取游离污泥样约 200 mL，测定其污泥活性(即单位干重的污泥对基质的降解速率)。下文将第一阶段所取的污泥样编号为 A，将第二阶段污泥编号为 B。

1.2 污泥活性的测定

污泥活性的具体测定方法如下。

使用 100 mL 的透明玻璃西林瓶，将相同体积的反硝化污泥放入各西林瓶中，西林瓶内污泥量为 15 mL，其中干污泥量为 $(2.36 \pm 0.10) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，加入少量(约 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ -N)的 NaNO_3 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (S/N = 1，量比)或 CH_3COONa (C/N = 5:1，质量比)，瓶口使用铝盖和丁基胶塞密封。将所有西林瓶放入摇床培养，设置温度为 30°C ，转速为 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，培养 24 h 以简单驯化并消耗瓶中的基质。

为了分别测定污泥的自养和异养反硝化活性，每份污泥进行碳源和硫源两个实验组。开始测定时，向各西林瓶中注入配置好的较浓基质使瓶内初始 NO_3^- -N的浓度约为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，碳源实验组中只添加 CH_3COONa (C/N = 5:1，质量比)，硫源实验组中只添加 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (S/N = 1，量比)，继续在摇床中培养，温度和转速条件和驯化培养时相同。定时从西林瓶中取水样，每次取 2 mL 混合液，立即离心后分析上清液中的 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 和 SO_4^{2-} 浓度，每个样品连续取样 8 h，测定结束后分析西林瓶中的反硝化污泥的 MLSS 和 MLVSS。

1.3 数据分析

NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 和 SO_4^{2-} 的测定使用瑞士万通生产的 MIC 型万思得研究级离子色谱仪，活性污泥的 SS 和 VSS 根据国标中的重量法测定^[12]。

采用 QIAamp DNA 提取试剂盒 (QIAGEN, Germany)提取反硝化污泥样品中的 DNA，然后对细菌 16S rRNA 基因在 V4-V5 区内进行 PCR 扩增。25 μL 扩增体系包括：DNA 模板 2 μL ，5 $\times$ reaction 缓冲液 5 μL ，5 $\times$ GC 缓冲液 5 μL ，dNTP (100 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$) 2 μL ，正向引物 (GTGCCAGCMG CCGCGTAA，10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 1 μL ，反向引物 (CCGTCAATT CMTTTRAGTTT，10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 1 μL ，Q5[®] High-Fidelity DNA 聚合酶 0.25 μL ，以及无菌水 8.75 μL 。扩增程序为：初始变性 98 $^\circ\text{C}$ 2 min，30 个循环，其中变性 98 $^\circ\text{C}$ 15 s，退火 55 $^\circ\text{C}$ 30 s，延伸 72 $^\circ\text{C}$ 30 s，循环结束后最终延伸 extension 72 $^\circ\text{C}$ 5 min。PCR 产物经 1.5% 琼脂糖凝胶电泳-紫外透射核实扩增成功后进行高通量测序。采用 Illumina MiSeq 平台对群落 DNA 片段进行 2 $\times$ 300 bp 的双端(Paired-end)测序，采用滑动窗口法对双端序列逐一作质量筛查并对通过质量初筛的双端序列根据重叠碱基进行配对连接。运用 Q II ME 软

表 1 反应器进水各个阶段的组成成分

Table 1 Components of influence in the reactor at each stage

基质组成	第一阶段投加量 /mg·L ⁻¹	第二阶段投加量 /mg·L ⁻¹
NaNO ₃	60.7	60.7
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	106.3	106.3
CH ₃ COONa	38.5	38.5
KH ₂ PO ₄	未添加	4.0

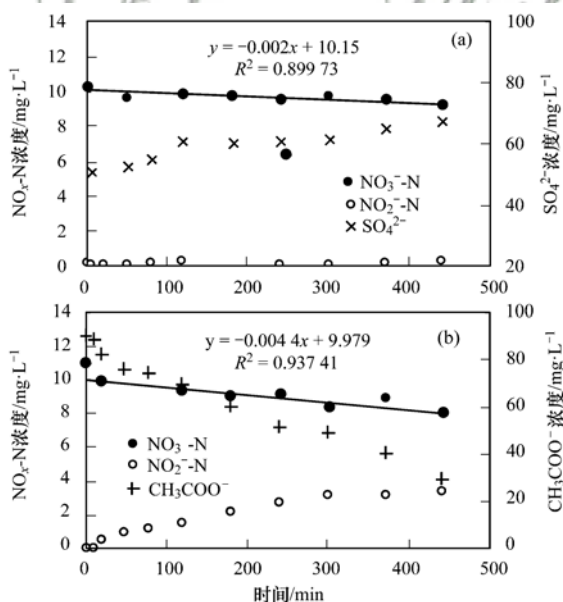
件 (Quantitative Insights Into Microbial Ecology, v1. 8. 0, <http://qiime.org/>) 调用 USEARCH (v5. 2. 236, <http://www.drive5.com/usearch/>) 进行质量控制, 调用 UCLUST 对前述获得的高质量序列按 97% 的序列相似度进行归并和 OTU (operational taxonomic unit, 可操作分类单元) 划分. MiSeq 测序和 OTU 分类均由上海派森诺生物科技股份有限公司完成.

2 结果与讨论

2.1 运行第一阶段反硝化污泥对 NO_3^- -N 的去除速率和 NO_2^- -N 的积累速率

在未加磷的第一阶段, 混养反硝化污泥以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 作为单一电子供体时, 对 NO_3^- -N 去除速率和 NO_2^- -N、 SO_4^{2-} 的积累速率见图 1, 反映混养反硝化污泥 A 的自养反硝化活性.

起始浓度为 $10.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NO_3^- -N 经过 440 min 后下降为 $9.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在此反应过程中, NO_3^- -N 浓度呈平稳线性下降趋势, 消耗速率为 $1.96 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$. NO_2^- -N 浓度均低于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明微生物在反硝化反应的过程中几乎没有 NO_2^- -N 的积累, NO_3^- -N 还原限速步骤是硝酸盐转化为亚硝酸盐这一步骤.



(a) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 为单一电子供体; (b) CH_3COONa 为单一电子供体

图 1 两种电子供体下 A 样品脱氮过程中各物质浓度的变化

Fig. 1 Variation of substrate concentration during the denitrification process by sludge A

西林瓶中 SO_4^{2-} 浓度可以作为监测自养反硝化反应的重要指标之一^[13]. 反应中 SO_4^{2-} 初始浓度为

$50.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着反应的进行, 浓度逐渐升高到 $67.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 将 0.096 mg 的 NO_3^- -N 还原成 N_2 所产生的 SO_4^{2-} 的理论值为 1.11 mg , 实际检测出西林瓶中 SO_4^{2-} 增加了 1.71 mg , 可能的原因是部分 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 被氧气氧化.

以 CH_3COONa 为单一电子供体时的硝酸氮还原速率反映了在运行的第一阶段混养反硝化污泥的异养反硝化活性. NO_3^- -N 初始浓度为 $10.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应进行 440 min 后浓度下降为 $8.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应速率为 $4.43 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$. NO_2^- -N 浓度在反应过程中不断积累, 在 440 min 后浓度达到 $3.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 说明反硝化反应后半段 (即亚硝酸盐还原为氮气的阶段) 的反应速率较低, 造成西林瓶中 NO_2^- -N 的积累, NO_3^- -N 还原限速步骤是亚硝酸盐还原为氮气阶段.

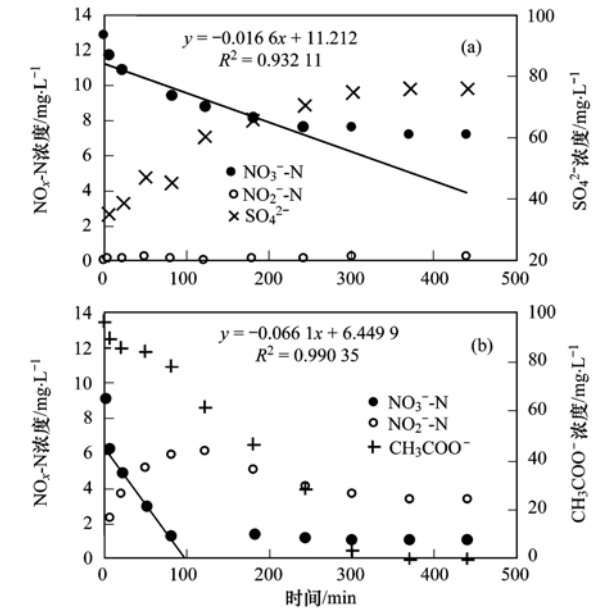
从图 1 可以看出, 运行第一阶段, 反硝化污泥的活性整体较低, 比较 A 样品在两种电子供体下对 NO_3^- -N 的去除速率和 NO_2^- -N 的积累速率, 可以看到, 混养污泥的异养反硝化活性明显高于自养, 但是反应中会有 NO_2^- -N 积累的情况发生; 在以硫源 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 作为电子供体的条件下, 反硝化速率相对较低, 但是几乎没有 NO_2^- -N 的积累.

2.2 运行第二阶段反硝化污泥对 NO_3^- -N 去除速率和 NO_2^- -N、 SO_4^{2-} 的积累速率

反应器运行第二阶段, 反应器中添加一定量无机磷后, 混养活性污泥的自养和异养反硝化速率测试结果见图 2.

在只有硫源为电子供体的条件下, NO_3^- -N 的还原速度较第一阶段明显加快, 440 min 内从 $12.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降为 $7.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 特别是前半段 (250 min), 硝酸氮还原速率为 $1.66 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$. NO_2^- -N 仍维持在一个较低的浓度, 没有积累现象产生. SO_4^{2-} 浓度从 $35.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $76.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 可见自养反硝化活性的提高关键在于硝酸盐转化为亚硝酸盐这一步骤的加快.

当以 CH_3COONa 作为电子供体时, B 泥样的 NO_3^- -N 去除速率和 NO_2^- -N 积累速率如图 2(b) 所示. 80 min 内, 西林瓶内的 NO_3^- -N 的浓度从 $9.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $1.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 反硝化速率达到 $6.61 \times 10^{-2} \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$. NO_2^- -N 浓度在反应过程中先是不断积累, 然后逐渐降低. 表明亚硝酸盐还原为氮气的速度已经与硝酸盐转化为亚硝酸盐的速度基本持平, 不再成为限制步骤.



(a) Na₂S₂O₃ 为单一电子供体; (b) CH₃COONa 为单一电子供体

图2 两种电子供体下B样品脱氮过程中各物质浓度变化

Fig. 2 Variation of substrate concentration during the denitrification process by sludge B

2.3 添加无机盐后, 混养反硝化污泥活性变化

另外, 磷的添加也有效提高了反应器中的污泥量, 添加磷之后, 反硝化污泥的 MLSS 从 2.36 g·L⁻¹ 增至 5.15 g·L⁻¹, MLVSS 则从加磷前的 1.16 g·L⁻¹ 迅速增加到 3.89 g·L⁻¹, 而 MLVSS/MLSS 比值由 0.49 增加到 0.75 则表明, 污泥中有机体的含量明显增高.

以单位重量 MLVSS 对硝酸氮的比降解速率表征污泥活性(以 N/VSS 计), 结果如图 3 所示. 混养反硝化污泥的自养反硝化活性由原来的 0.019 mg·(L·min·g)⁻¹ 提升为 0.056 mg·(L·min·g)⁻¹, 约原来的 2.9 倍; 而异养反硝化速率由原来的 0.059 mg·(L·min·g)⁻¹ 升高到 0.232 mg·(L·min·g)⁻¹, 约为原来的 3.9 倍.

比较 A、B 泥样的活性可知, 通过提高自养和异养反硝化微生物活性, 磷的适量添加有助于混养污泥更好地进行反硝化脱氮^[14]. 这在混养反应器的运行效果上也有很好的验证, 加入磷之后, 第二阶段的脱氮效果明显高于第一阶段. 第一阶段在温度为 25℃、水力停留时间为 1.5 h 时, 硝酸氮的去除率在 65% ~ 75% 之间波动. 而在相同条件下, 第二阶段硝酸氮的去除率在 88% ~ 97% 之间波动. 第一阶段中室温为 20℃ 时, 偶尔向进水中添加一定量的无机磷后的几天内, 反应器对硝酸氮去除率从 63.3% 迅速上升到 91.9%. 停止投加后, 反应器还能

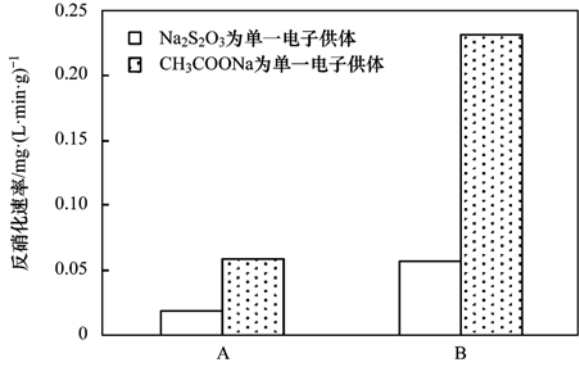


图3 混养污泥投加无机磷前后污泥活性的比较

Fig. 3 Comparison of the mixotrophic sludge activity before and after phosphorus addition

继续维持一段时间的高效脱氮, 5 ~ 7 d 以后硝酸氮去除率又回落至原来的水平. 在相同的 30℃ 室温和 45 min 水力停留时间条件下, 第一阶段 NO₃⁻-N 的平均去除率为 80.7%, 而在第二阶段则增加到 93.6%.

由此可知, 添加无机磷可以显著促进混养反硝化污泥的活性, 尤其是混养污泥中的异养反硝化微生物的活性.

第二阶段反应器连续运行过程中, 磷的投加量(以 P 计)为 0.91 mg·L⁻¹, 测得反应器出水中磷的含量平均为 0.22 mg·L⁻¹, 也就是说, 约有 0.7 mg·L⁻¹ 的磷被活性污泥中的微生物利用. 这也说明磷的投加量略高于实际所需, 在以后的运行中可以略微降低.

2.4 投加磷前后微生物群落结构变化及其多样性

2.4.1 微生物群落多样性分析及其优势菌属

活性污泥样经过高通量测序后, 对原始测序数据进行质量控制并分析生物多样性指数, 具体统计结果如表 2 所示.

选取微生物度量指数 Chao1、ACE、Shannon 和 Simpson 指数来衡量活性污泥中微生物群落的多样性. Chao1 指数和 ACE 指数侧重于体现群落的丰富度, 一般而言, Chao1 或 ACE 指数越大, 表明群落的丰富度越高^[15,16]. Shannon 指数和 Simpson 指数则综合考虑了群落的丰富度和群落均匀度, 两者数值越高也就代表群落的多样性越高^[17,18].

分析两个污泥样品的测序数据后发现, A 泥样除了在 ACE 指数上均略低于 B 泥样, 其他三项指数均略高于 B 泥样. 说明在相对程度上, 加磷前污泥的微生物多样性更高, 但是从各个细菌的丰富程度而言, 加磷后, 由于污泥中某些种属的细菌数量增殖较快, 丰富度显著提高, 因而其他细菌占比降低, 使得总体多样性下降.

表 2 测序数据的质量控制及生物多样性指数

Table 2 Sequencing data quality control and biodiversity index

泥样	有效序列	高质量序列	占比/%	Chao1 指数	ACE 指数	Simpson 指数	Shannon 指数
A	34244	18603	54.3	1289	1788	0.99	8.34
B	33896	20983	61.9	1132	2090	0.93	6.72

在属水平上,反硝化污泥样的微生物群落中主要细菌的种类和所占百分比如图 4 所示,其中 other 包括未被鉴定和占比小于 0.4% 的细菌.正如微生物群落的多样性度量指数所示,A 泥样中占比超过 0.4% 的细菌有 19 个属,而 B 泥样中只有大约 15 个属.但是 B 泥样中每种菌属的占比相对较高,表明生物量更为丰富.其中,A 泥样中的主要优势菌属有 *Dok59*、*Thiothrix*、*Sulfuritalea*、*Thiofaba* 等,分别占总微生物群落的 9.1%、4.0%、3.8% 和 2.8%;而 B 泥样中的主要优势菌属有 *Sulfurimonas*、*Thiothrix*、*Dok59*、*Acinetobacter* 等,占比分别为 25.1%、8.9%、5.6% 和 5.6%.

Thiothrix 在微生物群落中的占比增加,百分比从 4.0% 升高到 8.9%. *Thiothrix* 是一种硫氧化反硝化细菌,主要存在于含硫化物的流动水体中,如进水中含有硫化物的活性污泥废水处理系统^[19,20].该菌属下的细菌存在以下 3 种营养方式:兼性自

养^[21]、化能异养^[21]和兼养^[21,22],从这类有多种营养型的菌属的大量存在,可以推测 *Thiothrix* 更适合在混合营养环境中生存. Gao 等^[23]通过自养强化表面流人工湿地和异养强化表面流人工湿地实验发现两者的污泥中同时存在 *Thiothrix*,占比分别为 2.13% 和 1.86%,指出 *Thiothrix* 可能同时进行自养反硝化和异养反硝化. Zhou 等^[4]也发现在自养和异养生物滤池反硝化反应器中均有 *Thiothrix* 存在.

添加无机磷后, *Sulfurimonas* 成为优势菌属,占比高达 25.1%, A 泥样中也检测到这种菌属,但是其占比较少仅为 0.1%. *Sulfurimonas* 属于化能无机自养反硝化菌,可以利用硫单质、硫化物、硫代硫酸盐或氢气作为电子供体还原硝酸盐和亚硝酸盐从而获取能量,普遍存在于地球上的氮、硫生物化学循环中^[24,25].虽然 *Sulfurimonas* 通常被分类为自养细菌,但是新的研究发现一些有机物也能促进其生长.例如 Takai 等^[26]的研究发现 *S. paralvinellae* 除了单质硫,还可以利用酵母提取物作为硫源. *S. gotlandica* 除了无机硫化物,还可以利用醋酸盐、甲酸盐和丙酮酸盐等有机碳源进行新陈代谢^[27].因此,结合本实验结果可以推测 *Sulfurimonas* 能够存在于混养环境中进行反硝化,而第一阶段运行中的 *Sulfurimonas* 占比较少可能是由于无机磷的缺乏导致.

此外,虽然 *Dok59* 在 A、B 两个泥样中均占有一定比例,一些 ABR^[28] 反应器连续流实验的活性污泥中也检测到有这种细菌的出现,但是目前关于该细菌的研究较少,其生理生化特征、在反应中的具体代谢过程和反硝化反应中的作用有待后续进一步的研究.

2.4.2 反硝化菌群落结构分析

为了进一步研究各系统中自养反硝化菌、异养反硝化菌和兼养反硝化菌的菌群结构变化,对各种营养型的反硝化菌功能菌按照属水平进行归类综合,其结果如表 3 和图 5 所示.

两个污泥样品中,自养、异养和兼养反硝化菌各占一定比例.相同之处在于自养反硝化菌均占比最高,其次是兼养反硝化菌,异养反硝化菌占比最少.但是在投加无机磷之后,污泥中反硝化菌的总

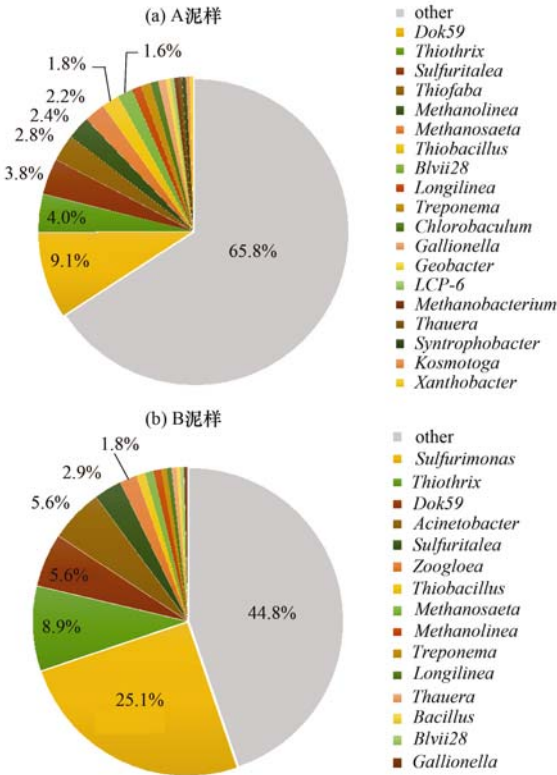


图 4 A、B 泥样中属水平上的微生物群落结构组成
Fig. 4 Bacterial community structure of sample A and B at the genus level

表 3 属水平上自养、异养和兼养反硝化菌及其所占比例			
Table 3 Main genera of autotrophic, heterotrophic, and mixotrophic denitrifiers and their proportion in the sludge			
反应过程	菌属	A 泥样/%	B 泥样/%
兼养反硝化	<i>Thiothrix</i>	3.99	8.95
	<i>Acinetobacter</i>	0.00	5.62
	<i>Pseudomonas</i>	0.06	0.06
自养反硝化	<i>Sulfuritalea</i>	3.81	2.90
	<i>Thiofaba</i>	2.82	0.01
	<i>Thiobacillus</i>	1.76	0.90
	<i>Sulfurimonas</i>	0.09	25.05
异养反硝化	<i>Thauera</i>	0.39	0.50
	<i>Bacillus</i>	0.29	0.35
	<i>Dechloromonas</i>	0.18	0.28
	<i>Flavobacterium</i>	0.06	0.12
	<i>Rubrivivax</i>	0.02	0.08

体占比(44.82%)明显高于加磷前(13.47%),说明添加无机磷促进了反硝化菌的生长.尤其是自养和兼养反硝化菌,其中兼养反硝化菌 *Thiothrix* 占比从 3.99% 增加到 8.95%, *Acinetobacter* 从几乎为零增长到 5.62%, 自养反硝化菌 *Sulfurimonas* 占比从 0.09% 增加到 25.05%, 说明这些细菌在有无机磷的环境中生长繁殖更为旺盛,这可能也是反硝化效率显著提高的主要原因.以上结果表明,投加磷使得混养污泥中的优势菌属发生显著变化,并且有效促进了自养、异养以及兼性反硝化菌的生长.

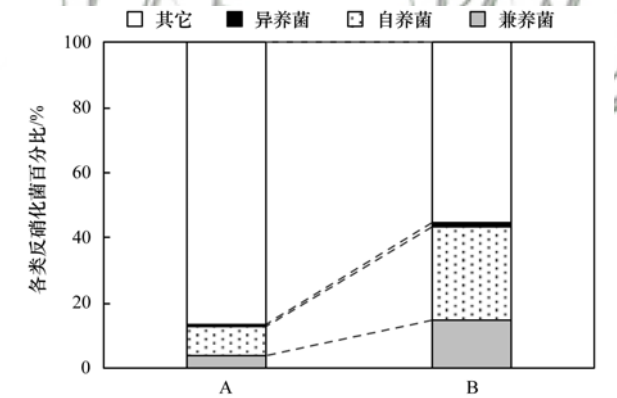


图 5 属水平下群落中自养、异养和兼养反硝化菌所占比例的变化

Fig. 5 Changes in the proportion of autotrophic, heterotrophic, and mixotrophic denitrifying bacteria at the genus level

3 结论

(1)无机磷是影响混养反硝化作用的重要因子.对比混养反硝化污泥在有机碳源、硫源两种电子供体下的反硝化速率,反硝化污泥的异养反硝化效率高于自养反硝化,在混养污泥中添加无机磷后,两者的脱氮效率都有明显提高,无机磷的存在

不仅提高了微生物量,而且明显提高反硝化菌的活性,其中异养反硝化活性的改善更为显著.

(2)通过高通量测序对比加磷前后污泥的微生物群落结构与多样性变化,发现无机磷的存在会促进污泥中的反硝化菌的生长,提高其优势菌属的占比,从而提高混养污泥的脱氮能力.

参考文献:

[1] Nestler A, Berglund M, Accoe F, *et al.* Isotopes for improved management of nitrate pollution in aqueous resources: review of surface water field studies [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2011, **18**(4): 519-533.

[2] Oh S E, Yoo Y B, Young J C, *et al.* Effect of organics on sulfur-utilizing autotrophic denitrification under mixotrophic conditions [J]. Journal of Biotechnology, 2001, **92**(1): 1-8.

[3] Xu G H, Peng J J, Feng C J, *et al.* Evaluation of simultaneous autotrophic and heterotrophic denitrification processes and bacterial community structure analysis[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(15): 6527-6536.

[4] Zhou W L, Li Y, Liu X, *et al.* Comparison of microbial communities in different sulfur-based autotrophic denitrification reactors[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2017, **101**(1): 447-453.

[5] Ucar D, Cokgor E U, Sahinkaya E, *et al.* Simultaneous nitrate and perchlorate removal from groundwater by heterotrophic-autotrophic sequential system[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, **116**: 83-90.

[6] Guerrero L, Aguirre J P, Muñoz M A, *et al.* Autotrophic and heterotrophic denitrification for simultaneous removal of nitrogen, sulfur and organic matter[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2016, **51**(8): 650-655.

[7] Sahinkaya E, Kilic A. Heterotrophic and elemental-sulfur-based autotrophic denitrification processes for simultaneous nitrate and Cr(VI) reduction[J]. Water Research, 2014, **50**: 278-286.

[8] Aminzadeh B, Torabian A, Azimi A A, *et al.* Salt Inhibition effects on simultaneous heterotrophic/autotrophic denitrification of high nitrate wastewater [J]. International Journal of Environmental Research, 2010, **4**(2): 255-262.

[9] Zhao Y X, Feng C P, Wang Q H, *et al.* Nitrate removal from groundwater by cooperating heterotrophic with autotrophic denitrification in a biofilm-electrode reactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **192**(3): 1033-1039.

[10] Jiang F, Liang Z S, Peng G L, *et al.* Nitrogen removal capacity of simultaneously autotrophic and heterotrophic denitrification in a sewer receiving nitrified source-separated urine [J]. Water Practice and Technology, 2013, **8**(1): 33-40.

[11] 袁莹,周伟丽,王晖,等.不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究[J].环境科学, 2013, **34**(5): 1835-1844.

Yuan Y, Zhou W L, Wang H, *et al.* Study on sulfur-based autotrophic denitrification with different electron donors [J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 1835-1844.

[12] GB 11901-1989, 水质 悬浮物的测定 重量法[S].

[13] Sahinkaya E, Dursun N, Kilic A, *et al.* Simultaneous heterotrophic and sulfur-oxidizing autotrophic denitrification process for drinking water treatment: control of sulfate production [J]. Water Research, 2011, **45**(20): 6661-6667.

- [14] Lv X M, Li J, Sun F Y, *et al.* Denitrifying phosphorus removal for simultaneous nitrogen and phosphorus removal from wastewater with low C/N ratios and microbial community structure analysis [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(4): 1890-1899.
- [15] Chao A N. Nonparametric estimation of the number of classes in a population [J]. *Scandinavian Journal of Statistics*, 1984, **11**(4): 265-270.
- [16] Chao A N, Ma M C, Yang M C K. Stopping rules and estimation for recapture debugging with unequal failure rates [J]. *Biometrika*, 1993, **80**(1): 193-201.
- [17] Shannon P, Markiel A, Ozier O, *et al.* Cytoscape: A software environment for integrated models of biomolecular interaction networks [J]. *Genome Research*, 2003, **13**(11): 2498-2504.
- [18] Simpson E H. Measurement of diversity [J]. *Nature*, 1949, **163**(4148): 688.
- [19] Rubio-Rincón F J, Welles L, Lopez-Vazquez C M, *et al.* Long-term effects of sulphide on the enhanced biological removal of phosphorus: the symbiotic role of *Thiothrix caldifontis* [J]. *Water Research*, 2017, **116**: 53-64.
- [20] Garrity G, Brenner D J, Krieg N R, *et al.* *Bergey's manual® of systematic bacteriology: Volume 2: The proteobacteria, Part B: The gammaproteobacteria* (2nd ed.) [M]. Boston, MA: Springer, 2005. 131-142.
- [21] Howarth R, Unz R F, Seviour E M, *et al.* Phylogenetic relationships of filamentous sulfur bacteria (*Thiothrix* spp. and Eikelboom type 021N bacteria) isolated from wastewater-treatment plants and description of *Thiothrix eikelboomii* sp. nov., *Thiothrix unzii* sp. nov., *Thiothrix fructosivorans* sp. nov. and *Thiothrix defluvii* sp. nov [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 1999, **49**(4): 1817-1827.
- [22] Nielsen P H, De Muro M A, Nielsen J L. Studies on the *in situ* physiology of *Thiothrix* spp. present in activated sludge [J]. *Environmental Microbiology*, 2000, **2**(4): 389-398.
- [23] Gao L, Zhou W L, Huang J C, *et al.* Nitrogen removal by the enhanced floating treatment wetlands from the secondary effluent [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **234**: 243-252.
- [24] Han Y C, Perner M. The globally widespread genus *Sulfurimonas*: versatile energy metabolisms and adaptations to redox clines [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, **6**: 989.
- [25] Han Y C, Perner M. The role of hydrogen for *Sulfurimonas denitrificans*' metabolism [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(8): e106218.
- [26] Takai K, Suzuki M, Nakagawa S, *et al.* *Sulfurimonas paralvinellae* sp. nov., a novel mesophilic, hydrogen-and sulfur-oxidizing chemolithoautotroph within the *Epsilonproteobacteria* isolated from a deep-sea hydrothermal vent polychaete nest, reclassification of *Thiomicrospira denitrificans* as *Sulfurimonas denitrificans* comb. nov. and emended description of the genus *Sulfurimonas* [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2006, **56**(8): 1725-1733.
- [27] Labrenz M, Grote J, Mammitzsch K, *et al.* *Sulfurimonas gotlandica* sp. nov., a chemoautotrophic and psychrotolerant epsilonproteobacterium isolated from a pelagic redoxcline, and an emended description of the genus *Sulfurimonas* [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2013, **63**(11): 4141-4148.
- [28] 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 等. 基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2652-2658.
- Chen C J, Zhang H Q, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of microbial community in each compartment of ABR ANAMMOX reactor based on high-throughput sequencing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2652-2658.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria natans</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)