

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾珺杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) -臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐珺, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨滢, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12) 《环境科学》征订启事 (194) 信息 (21, 51)	

有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响

王书永¹, 钱飞跃^{1,2,3}, 王建芳^{1,2,3*}, 沈耀良^{1,2,3}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009; 3. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

摘要: 为探明易降解有机物短期冲击对全自养亚硝化颗粒污泥 (PNG) 中不同功能菌活性的影响, 本研究采用多批次连续实验, 系统考察了 PNG 在有机物胁迫与恢复阶段, 氮素转化性能与溶解氧 (DO) 利用情况的演化规律。结果表明, 基质 C/N 比越高, 亚硝态氮比累积速率 [$q(\text{NO}_2^- - \text{N})$] 的降幅就越大。期间, 异养菌 (HeB) 活性的增强, 加快了 PNG 对 DO 的消耗速率, 使得氧亲和力和较差的亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 活性得到了有效抑制。当重新采用无机碳源配水时, $q(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 数值明显增大, 同时 HeB 与 NOB 的活性均处于较低水平。因此, 易降解有机物对全自养 PNG 系统的冲击具有一定可逆性, 该过程有助于巩固氨氧化菌 (AOB) 的相对优势, 提升亚硝化反应的稳定性。

关键词: 亚硝化颗粒污泥; 易降解有机物; 氨氧化菌; 亚硝酸盐氧化菌; 异养菌; 功能菌活性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0269-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201607076

Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules

WANG Shu-yong¹, QIAN Fei-yue^{1,2,3}, WANG Jian-fang^{1,2,3*}, SHEN Yao-liang^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu High Education Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China)

Abstract: To explore the short-term impact of biodegradable organic matter on the activities of different functional microbes in autotrophic partial nitrification granular sludge (PNG), the variations of both nitrogen transformation performance and dissolved oxygen (DO) uptake of PNG were investigated in this study, by carrying out successive batch tests with and without the organics stressing. The results showed that the higher the C/N ratio, the lower the specific nitrite accumulation rate of $q(\text{NO}_2^- - \text{N})$. Meanwhile, the increase of heterotrophic bacteria (HeB) activities caused the fast DO uptake by PNG, which could effectively suppress nitrite oxidizing bacteria (NOB) with the low oxygen affinity. When inorganic substrate culture was employed in the following phase, both HeB and NOB showed low activities, with significant increase in $q(\text{NO}_2^- - \text{N})$. In short, the adverse effects of biodegradable organic matter on the performance of PNG system were partially reversible, which could benefit to enhance the advantage of ammonium oxidizing bacteria (AOB) and improve the stability of partial nitrification reaction.

Key words: partial nitrification granules; biodegradable organic matter; ammonium oxidizing bacteria; nitrite oxidizing bacteria; heterotrophic bacteria (HeB); functional microbe activities

众所周知, 厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 菌能够在特定条件下, 分别以氨氮和亚硝态氮为电子供体和电子受体, 完成自养脱氮过程, 生成氮气和少量硝态氮。与传统全程硝化-反硝化脱氮工艺相比, 该过程可减少约 60% 的曝气能耗、100% 的有机碳源和 90% 的污泥产量, 并被认为是实现未来污水处理厂能源自给的重要技术基础^[1]。目前, 除了 ANAMMOX 菌世代时间长、生长条件苛刻和易受到毒物冲击等固有因素外, 如何实现亚硝态氮的稳定供给仍是阻碍 ANAMMOX 工艺推广的关键问题之一^[2]。有研究表明, 协同控制水温、pH 值、溶解氧 (DO) 或曝气强度、氨氮负荷、污泥停留时间 (SRT) 和碱度等操作条件, 可以在有效富集氨氧化菌 (AOB) 的同时, 选择性地抑制亚硝酸盐氧化菌

(NOB) 活性, 使污泥获得良好的亚硝化性能。在此基础上, 如果将污泥颗粒化与亚硝化技术相结合, 将有助于实现更高效的亚硝酸盐累积。刘文如等^[3]利用序批式颗粒污泥反应器, 实现了 $2.0 \sim 4.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积速率, 该值远高于传统 SHARON® 工艺的 $0.3 \sim 0.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。Bartolí 等^[4]基于连续流颗粒污泥反应器, 通过实时控制溶解氧与总氨氮质量浓度之比 ($\text{DO}/\text{TAN} < 0.35$), 使

收稿日期: 2016-07-12; 修订日期: 2016-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308367, 51578353); 江苏省高校自然科学基金项目 (15KJB610013); 苏州科技大学研究生创新工程项目 (SKCX15-033); 江苏高校优势学科建设项目

作者简介: 王书永 (1986 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物处理理论与技术, E-mail: 563082602@qq.com

* 通信作者, E-mail: wj302@163.com

NO_2^- -N 累积速率达到了惊人的 $6.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. Peng 等^[5]的研究表明,对于低浓度生活污水,采用类似的控制策略,颗粒污泥同样能够在连续流状态下,获得超过 85% 的亚硝态氮累积率(NAR). 需要指出的是,为了维护自养菌的优势地位,上述亚硝化颗粒污泥(PNG)的培养和运行过程需要将基质C/N 比控制在 0.1~4.2 范围内. 然而,在实际废水处理过程中,高浓度有机物的冲击是很常见的. 大量易降解有机物的输入会导致异养菌(HeB)的快速增殖,后者将与硝化菌争夺 DO 和生长空间,进而削弱亚硝化反应的稳定性^[6,7]. 因此,有必要全面了解有机物浓度对 PNG 性能的影响,这对于提升该技术的实用化水平具有重要意义.

在本研究中,采用批次实验模拟反应器操作过程,系统考察了在不同基质 C/N 比条件下,全自养 PNG 对氮素转化性能的变化情况. 通过分析对氨氮比降解速率 $[q(\text{NH}_4^+-\text{N})]$ 、硝态氮比累积速率 $[q(\text{NO}_3^--\text{N})]$ 、亚硝态氮比累积速率 $[q(\text{NO}_2^--\text{N})]$

和比耗氧呼吸速率(SOUR)等动力学参数的分析,详细阐述了功能菌活性在有机物胁迫和自然恢复过程中的演化规律,以期为实现亚硝化颗粒污泥系统的稳定运行提供了参考.

1 材料与方法

1.1 接种污泥来源

本研究使用的 PNG 取自小型连续流好氧反应器(CSTR)内,其有效容积约为 1.7 L,结构图详见文献[8]. 反应器进水氨氮质量浓度为 $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,不投加任何有机物,水力停留时间(HRT)为 1.5 h,对应的氮容积负荷达到 $2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 另外,控制进水 pH 为 (8.0 ± 0.1) ,DO 质量浓度为 $(0.6 \pm 0.2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水温为 $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$. 此前,CSTR 已在全自养状态下运行超过 200 d,氨氮去除率稳定在 90%~95%,出水 NAR 接近 80%.

颗粒污泥外观如图 1 所示, PNG 呈棕红色,平均粒径为 0.58 mm,其中,粒径在 0.3~0.8 mm 的颗

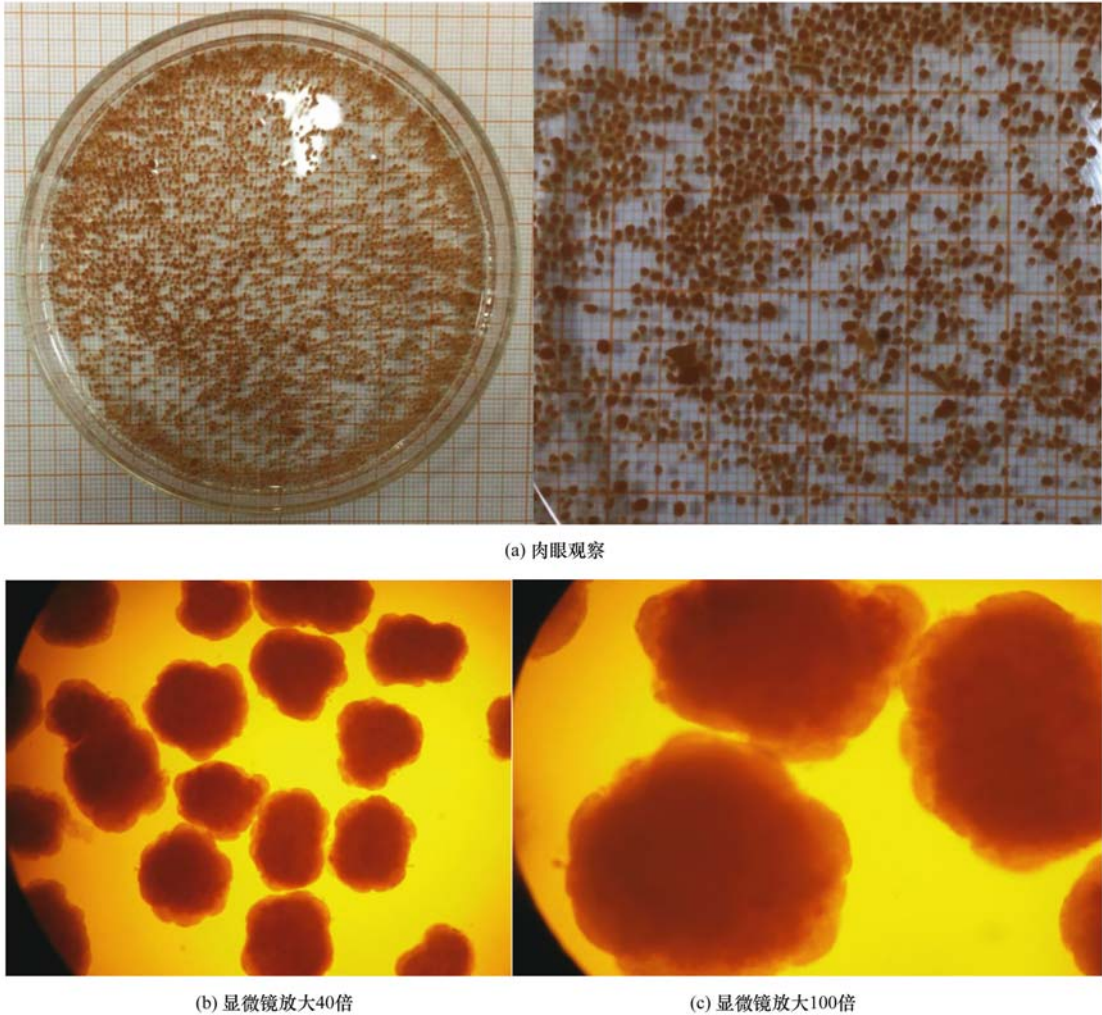


图 1 亚硝化颗粒污泥的外观形态

Fig. 1 Morphological appearance of partial nitrification granules

粒约占总量的 89%, 平均沉降速度为 $57.6 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, 5 min 污泥沉降指数 (SVI_5) 为 $34 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$.

1.2 批次实验方法

阶段 I: 有机物胁迫阶段

采用氯化铵、乙酸钠分别作为基质溶液的氮源和碳源, 初始 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度控制在 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 依据 C/N 质量比 (C/N 比) 依次为 0 (对照组)、1、2、4、8 设立 5 个实验分组, 用 NaHCO_3 溶液调节 pH 值至 8.0 ~ 8.1, 并加入微量元素^[9]. 取自 CSTR 中的 PNG 经生理盐水反复冲洗后, 分装于 250 mL 装有基质溶液的具塞锥形瓶中, 污泥质量浓度设为 $(1230 \pm 20) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 将锥形瓶置于振荡器, 高转速 $(210 \pm 10) \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 可使纯水 DO 浓度达到 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 温度控制在 $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$, 每组做 2 个平行样. 反应期间, 定时取上清液测定 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度, 并利用线性段计算比降解/累积速率 q 值. 当溶液中氨氮全部消耗完时, 使用对应基质溶液再次清洗 PNG, 进入下一周期. 该阶段实验共进行 11 个周期, 单周期反应时间为 60 min, 每隔 2 个周期记录 1 次 q 值.

阶段 II: 自然恢复阶段

自第 12 周期起, 对各组连续进行 10 个周期的性能恢复实验. 保持基质溶液中初始 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度不变, 同时不再外加碳源, 其余操作条件与有机物胁迫阶段相同.

1.3 比降解/累积速率

为表征 AOB 与 NOB 的降解活性, 并对污泥亚硝化性能进行评价, 比速率 q 值采用的计算公式见式 (1)、(2) 和 (3).

AOB 降解活性:

$$q(\text{NH}_4^+ \text{-N}) = -\Delta c(\text{NH}_4^+ \text{-N}) / (\Delta t \cdot \text{MLVSS}) \quad (1)$$

NOB 降解活性:

$$q(\text{NO}_3^- \text{-N}) = -\Delta c(\text{NO}_3^- \text{-N}) / (\Delta t \cdot \text{MLVSS}) \quad (2)$$

PNG 亚硝化性能:

$$q(\text{NO}_2^- \text{-N}) = -\Delta c(\text{NO}_2^- \text{-N}) / (\Delta t \cdot \text{MLVSS}) \quad (3)$$

式中, $q(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 、 $q(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 和 $q(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 分别为 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比降解速率、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 比累积速率和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 比累积速率, $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; $\Delta c(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 、 $\Delta c(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 和 $\Delta c(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 分别指反应时间 Δt 内, 上清液中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度的变化量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; MLVSS 为挥发性悬浮固体质量浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; Δt 为各参数值线性变化的时间段, h.

1.4 比耗氧呼吸速率

通过测定不同基质条件下污泥的比耗氧呼吸速率 (SOUR), 比较 AOB、NOB 和 HeB 的活性变化, 具体步骤: 取一定量颗粒污泥, 经生理盐水反复冲洗后, 装入 250 mL 标准 BOD 瓶中, 分别用含 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 各 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 COD $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 3 种 DO 饱和溶液将瓶子充满. 在密闭条件下反应, 并记录 DO 读数随时间的变化过程, 利用最小二乘法拟合污泥耗氧速率 (OUR), 再除以 MLVSS 浓度, 计算 AOB、NOB 和 HeB 的 SOUR 值, 即 SOUR-A、SOUR-N 和 SOUR-H, 单位为 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ ^[10].

1.5 水质分析方法

本研究中, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 分别采用纳氏试剂光度法、紫外分光光度法和 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法测定; MLSS 和 MLVSS 采用重量法测定; pH 和 DO 质量浓度采用多水质分析仪 (903P 般特) 测定; 污泥形态通过 OLYMPUS CX41 型显微镜观察.

2 结果与讨论

2.1 PNG 的氮素转化性能评价

对整个实验过程中, 对照组在相同时间点的 3 种氮素浓度取均值 ($n = 11$), 并进行线性拟合, 结果如图 2 所示.

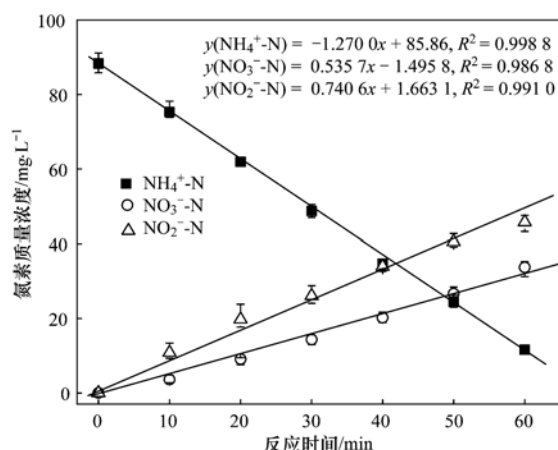


图 2 实验期间, 对照组 (C/N = 0) 的氮素转化性能

Fig. 2 Nitrogen transformation performance in the control group (C/N = 0) throughout the experiment

由图 2 可知, 当基质 C/N = 0 时, 溶液中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度随反应时间的变化过程遵循零级反应动力学, 这与 Cydzik-Kwiatkowska 等的报道一致^[11]. 对照组的 $q(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 、

$q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 和 $q(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 均值分别为 (69.7 ± 1.8) 、 (41.1 ± 1.5) 和 $(28.3 \pm 0.9) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 其中, $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 超出了常温条件下 ($20 \sim 30^\circ\text{C}$) 该值的典型范围, 即 $22.9 \sim 58.3 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ [12,13]. 同时, $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})/q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 值约为 2.5, 反应终点 NAR 均值为 58.9%. 这意味着尽管 AOB 在 PNG 中占据了优势地位, 但 NOB 仍表现出较高的活性. 此外, 在连续多批次的实验中, 3 种比速率值的相对平均偏差在 2.6% ~ 3.5%, 反应前后总氮含量基本守恒, 这说明 PNG 对氮素的转化性能具有良好的稳定性.

2.2 有机物对 PNG 氮素转化性能的影响

由图 3 ~ 5 可知, 在第 1 周期内, 基质 C/N 比由 0 提高到 4 时, $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、 $q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 和 $q(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 值的下降幅度较小, $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})/q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 值由 2.5 略微升高至 2.8. 相比之下, C/N = 8 对应的 $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、 $q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 和 $q(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 分别较对照组下降了 31.8%、48.4% 和 15.4%, $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})/q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 值升至 3.5 左右.

在整个阶段 I (第 1 ~ 11 周期), 比速率值的降幅与 C/N 比大小都呈现明显的正相关性. 与 AOB 相比, NOB 的降解活性更容易受到有机物浓度的影响. 当 C/N 比条件相同时, $q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 随反应周期的降幅要大于 $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})$. 运行至第 11 周期, C/N 为 1、2、4 和 8 对应的 $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})/q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 值分别达到了 4.3、4.5、17.1 和 18.7, $q(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 也降至第 1 周期的 75.8%、70.9%、57.9% 和 62.6%. 尽管投加高浓度乙酸钠 (C/N = 8) 时, $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、 $q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 仅相当于对照组的 34.3% 和 4.3%, 但 $q(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 仍可达到 $22.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 反应终点的 NAR 接近 93%. 另外, 由于接种污泥长期生长于无机营养条件下, 因此, 批次实验中并未发现明显的反硝化作用, PNG 的总氮损失始终在 8% 以下.

从第 12 周期开始 (阶段 II), 基质中不再投加乙酸钠, 无机配水有助于 PNG 亚硝化性能的恢复. 随着有机物胁迫作用的解除, $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 出现明显上升, 但阶段 I 的 C/N 比仍会显著影响最终数值. 相比之下, $q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 的恢复过程要缓慢得多, 尤其是前期 C/N ≥ 4 的分组. 运行至第 21 周期, C/N 为 1、2、4 和 8 的 $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 分别相当于对照组的 81.9%、73.0%、63.4% 和 47.8%, $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})/q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 值约为 3.2、3.8、9.9 和 11.3. 对应的 $q(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 回升至第 1 周期的 97.8%、93.5%、

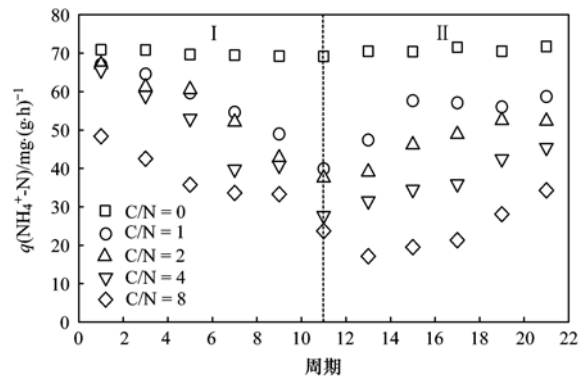


图 3 不同 C/N 比条件下, PNG 的氨氮比降解速率随反应周期的变化过程

Fig. 3 Changes in the specific ammonium degradation rate of PNG with reaction cycles at different C/N ratios

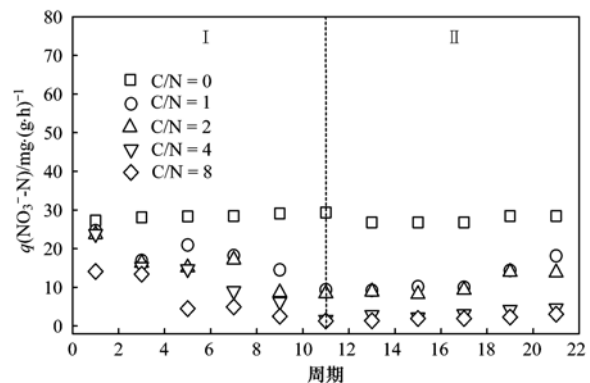


图 4 不同 C/N 比条件下, PNG 的硝态氮比累积速率随反应周期的变化过程

Fig. 4 Changes in the specific nitrate accumulation rate of PNG with reaction cycles at different C/N ratios

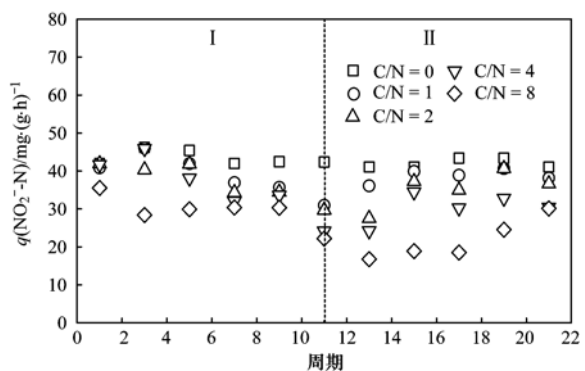


图 5 不同 C/N 比条件下, PNG 的亚硝态氮比累积速率随反应周期的变化过程

Fig. 5 Changes in the specific nitrite accumulation rate of PNG with reaction cycles at different C/N ratios

87.4%、78.7% 和 84.8%, 反应终点的 NAR 分别达到 65.0%、70.0%、67.0% 和 87.8%, 均高于对照组的 57.2%.

2.3 有机物冲击对功能菌活性的影响

在阶段 I 末期(第 11 周期),不同基质 C/N 比对应的 SOUR-A、SOUR-N 和 SOUR-H 数值如图 6 所示. 与 $q(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $q(\text{NO}_3^--\text{N})$ 的变化趋势类似, C/N 比越高, AOB 与 NOB 的受抑制程度越大, HeB 活性就越强. 当 C/N = 8 时, SOUR-A、SOUR-N 分别降为对照组的 64.1% 和 10.9%, 但 SOUR-A/SOUR-N 值远大于对照组的 1.7, 达到了 9.8. 另外, SOUR-H 较对照组提高了约 16 倍, 数值介于 SOUR-A 和 SOUR-N 之间.

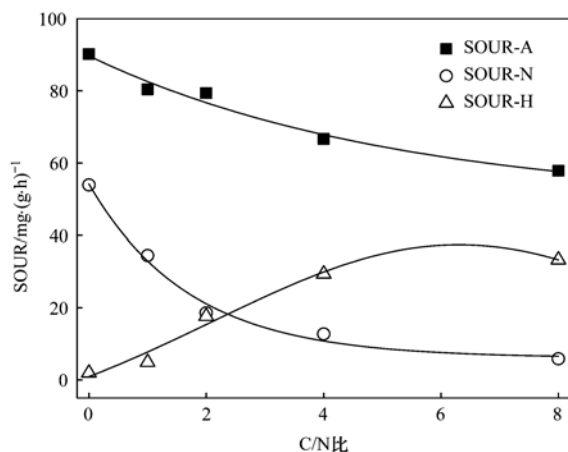


图 6 在第 11 周期,不同 C/N 比对应的各功能菌活性情况

Fig. 6 Functional microbe activities at different C/N ratios in cycle 11

众多研究表明,对于长期在全自养条件下运行的硝化颗粒污泥而言, AOB 主要分布于表层 0 ~ 100 μm 的区域内,而 NOB 的氧化对象是 AOB 的代谢产物,因此,多集中在颗粒表面以下 200 ~ 300 μm 的内层^[14~16]. 本研究中 PNG 的生长环境与上述报道非常类似. 考虑到异养菌的比增殖速率(0.25 h^{-1} , 20°C)远大于硝化菌(0.032 h^{-1} , 20°C)^[17],在批次反应期间,投加高浓度的易降解有机物势必会促进 HeB 在 PNG 表面的增殖^[18,19]. 此时, SOUR-H 的显著增大意味着 HeB 将与硝化菌争夺颗粒表面有限的 DO,使得后者成为了微生物生长的限制性因素^[7,20]. 如图 7 所示,在第 11 周期内,对照组的 DO 浓度在反应的前 40 min 内呈现下降趋势,随后又出现复氧现象,这与 PNG 较高的 $q(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 是密切相关的. 相比之下,当 C/N = 8 时,各时间点 DO 浓度始终低于对照组. 反应 30 min 后, DO 降至 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,直至反应结束. 这说明在相同的振荡条件下, HeB 活性的增强明显加快了 PNG 对 DO 的消耗速率.

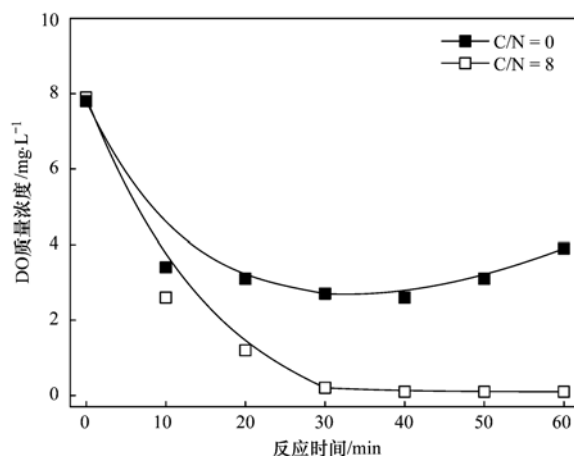


图 7 在第 11 周期内, C/N = 0 (对照组) 与 C/N = 8 对应的 DO 浓度变化过程

Fig. 7 Variations of DO concentration at C/N = 0 and C/N = 8 during cycle 11

一方面,由于大量胞外聚合物的包裹,好氧颗粒污泥内部通常存在明显的氧传质梯度,一般 DO 的渗透深度只有 75 ~ 200 μm ^[21,22]. 另一方面,不同功能菌对 DO 的半饱和速率常数通常遵循: NOB ($1.2 \sim 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > AOB ($0.2 \sim 0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > HeB ($0.01 \sim 0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[17]. 因此,借助自身的空间分布优势与更强的 DO 亲和能力,新增殖的 HeB 将与 AOB 一同快速消耗颗粒表面的溶解氧,从而更有效地抑制 NOB 的生长. 因此,在阶段 I 中,高 C/N 比会导致 $q(\text{NH}_4^+-\text{N})/q(\text{NO}_3^--\text{N})$ 值和 SOUR-A/SOUR-N 值的显著升高. 实际上,这与絮状污泥系统中,通过严格控制 DO 浓度水平获得稳定亚硝化反应的基本原理是一致的^[23~25]. 类似地, Xu 等^[26]发现,与采用无机碳源相比,进水中加入一定量葡萄糖 (C/N = 2.6) 将显著缩短亚硝化生物膜反应器的启动时间,显著提高其对 NO_2^--N 的累积效能. 这是因为生物膜表面被快速生长的异养菌覆盖,可防止 AOB 受到水流冲刷,同时,相对激烈的基质竞争也有利于更快地淘汰 NOB.

对比图 6 和图 8 可知,当重新采用无机碳源配水(阶段 II)时,随着 AOB 活性的恢复,前期高 C/N 比对应的 HeB 活性明显下降,但 SOUR-N 的变化相对较小, SOUR-A/SOUR-N 值远高于对照组. 同样以 C/N = 8 为例,第 21 周期的 SOUR-H 仅为 $13.5 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,较第 11 周期下降约 59.6%, SOUR-A 和 SOUR-N 分别升至对照组的 80.4% 和 14.5%, SOUR-A/SOUR-N 值(约 9.3)与第 11 周期非常接近. 这意味着此时 PNG 中 AOB 的相对优势较接种污泥有了明显提升.

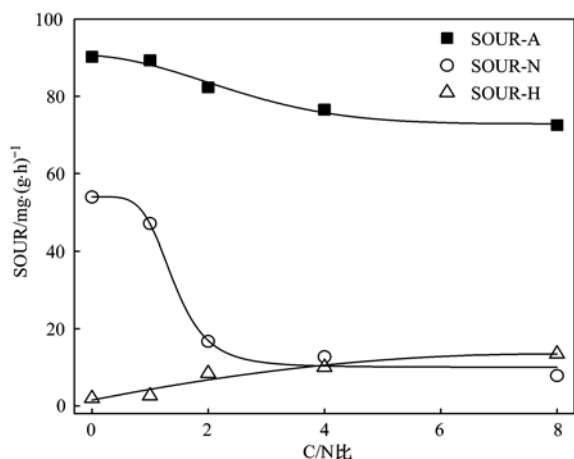


图8 在第21周期,不同C/N比对应的各功能菌活性情况

Fig. 8 Functional microbe activities at the different C/N ratios in cycle 21

总之,与以往研究者^[27,28]只关注进水有机物(COD在400~800 mg·L⁻¹)对硝化过程的负面效应不同,本研究从氮素转化 $[q(\text{NH}_4^+-\text{N})/q(\text{NO}_3^--\text{N})]$ 值和DO利用(SOUR-A/SOUR-N值)两方面证明,对于全自养PNG系统而言,易降解有机物的可逆冲击过程可以作为巩固AOB优势、抑制NOB生长的有效调控手段。

3 结论

(1)投加易降解有机物(乙酸钠)对全自养PNG的氮素转化性能具有明显的抑制作用。 $q(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $q(\text{NO}_3^--\text{N})$ 和 $q(\text{NO}_2^--\text{N})$ 的降幅都与基质C/N比呈现正相关性。当C/N=8时,反应11个周期后,颗粒污泥的 $q(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $q(\text{NO}_3^--\text{N})$ 仅相当于对照组的34.3%和4.3%,但 $q(\text{NO}_2^--\text{N})$ 仍可达到22.2 mg·(g·h)⁻¹,反应终点的NAR接近93%。

(2)投加高浓度有机物可有效提高PNG中HeB的活性,后者通过参与基质竞争,使得系统中DO的消耗速率明显加快。颗粒表面较大的DO分布梯度可能是有效抑制NOB活性的主要因素。

(3)重新采用无机碳源配水时,PNG的 NO_2^--N 累积效能得到了显著恢复,HeB和NOB的活性均被有效抑制。 $q(\text{NH}_4^+-\text{N})/q(\text{NO}_3^--\text{N})$ 值与SOUR-A/SOUR-N值的变化均表明,有机物的短期冲击与恢复过程可进一步巩固AOB的优势地位,有助于提升PNG亚硝化性能的稳定性。

参考文献:

[1] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences-an application survey [J]. Water Research, 2014, **55**: 292-303.

[2] Ali M, Okabe S. Anammox-based technologies for nitrogen removal: advances in process start-up and remaining issues[J]. Chemosphere, 2015, **141**: 144-153.

[3] 刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 等. 接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2302-2308.

Liu W R, Shen Y L, Ding L L, *et al.* Study on rapid start-up of a nitrifying process using aerobic granular sludge as seed sludge [J]. Environmental Science, 2013, **34**(6): 2302-2308.

[4] Bartroli A, Pérez J, Carrera J. Applying ratio control in a continuous granular reactor to achieve full nitrification under stable operating conditions[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(23): 8930-8935.

[5] Peng Y Z, Guo J H, Horn H, *et al.* Achieving nitrite accumulation in a continuous system treating low-strength domestic wastewater: switchover from batch start-up to continuous operation with process control[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, **94**(2): 517-526.

[6] Ma J X, Wang Z W, Zhu C W, *et al.* Analysis of nitrification efficiency and microbial community in a membrane bioreactor fed with low COD/N-ratio wastewater[J]. Plos One, 2013, **8**(5): e63059.

[7] Pérez J, Lotti T, Kleerebezem R, *et al.* Outcompeting nitrite-oxidizing bacteria in single-stage nitrogen removal in sewage treatment plants: a model-based study [J]. Water Research, 2014, **66**: 208-218.

[8] 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 等. CSTR中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4230-4236.

Yin F F, Liu W R, Wang J F, *et al.* Research on change process of nitrosation granular sludge in continuous stirred-tank reactor [J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4230-4236.

[9] 吴蕾, 彭永臻, 王淑莹, 等. 短程硝化颗粒污泥SBR的快速启动与维持[J]. 化工学报, 2010, **61**(11): 2931-2937.

Wu L, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Quick start and maintenance of nitrifying granular sludge in SBR process [J]. CIESC Journal, 2010, **61**(11): 2931-2937.

[10] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, **57**(1-2): 227-233.

[11] Cydzik-Kwiatkowska A, Wojnowska-Baryła I. Nitrifying granules cultivation in a sequencing batch reactor at a low organics-to-total nitrogen ratio in wastewater [J]. Folia Microbiologica, 2011, **56**(3): 201-208.

[12] Isanta E, Reino C, Carrera J, *et al.* Stable partial nitrification for low-strength wastewater at low temperature in an aerobic granular reactor [J]. Water Research, 2015, **80**: 149-158.

[13] Miao Y, Zhang L, Yang Y, *et al.* Start-up of single-stage partial nitrification-anammox process treating low-strength swage and its restoration from nitrate accumulation [J]. Bioresource Technology, 2016, **218**: 771-779.

[14] Chiu Z C, Chen M Y, Lee D J, *et al.* Oxygen diffusion and consumption in active aerobic granules of heterogeneous structure [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **75**(3): 685-691.

[15] Matsumoto S, Katoku M, Saeki G, *et al.* Microbial community structure in autotrophic nitrifying granules characterized by

- experimental and simulation analyses [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, **12**(1): 192-206.
- [16] Kishida N, Saeki G, Tsuneda S, *et al.* Rapid start-up of a nitrifying reactor using aerobic granular sludge as seed sludge [J]. *Water Science & Technology*, 2012, **65**(3): 581-588.
- [17] Grady Jr C P L, Daigger G T, Love N G, *et al.* *Biological wastewater treatment* (3rd ed.) [M]. London, UK: CRC Press, 2011. 99-102.
- [18] Jemaat Z, Suárez-Ojeda M E, Pérez J, *et al.* Partial nitrification and *o*-cresol removal with aerobic granular biomass in a continuous airlift reactor [J]. *Water Research*, 2014, **48**: 354-362.
- [19] Wan C L, Yang X, Lee D J, *et al.* Partial nitrification using aerobic granule continuous-flow reactor: operations and microbial community [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, **45**(5): 2681-2687.
- [20] Mozumder M S I, Picioreanu C, van Loosdrecht M C M, *et al.* Effect of heterotrophic growth on autotrophic nitrogen removal in a granular sludge reactor [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(8): 1027-1037.
- [21] Vázquez-Padín J R, Figueroa M, Campos J L, *et al.* Nitrifying granular systems: a suitable technology to obtain stable partial nitrification at room temperature [J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, **74**(2): 178-186.
- [22] Rathnayake R M L D, Oshiki M, Ishii S, *et al.* Effects of dissolved oxygen and pH on nitrous oxide production rates in autotrophic partial nitrification granules [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **197**: 15-22.
- [23] 苏东霞, 李冬, 张肖静, 等. 不同 DO 梯度下生活污水 SBR 短程硝化试验研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2015, **29**(3): 760-764.
- Su D X, Li D, Zhang X J, *et al.* Study on partial nitrification of domestic wastewater in a sequencing batch reactor under different dissolved oxygen gradients [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2015, **29**(3): 760-764.
- [24] Ge S J, Peng Y Z, Qiu S, *et al.* Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 95-105.
- [25] Ma B, Bao P, Wei Y, *et al.* Suppressing nitrite-oxidizing bacteria growth to achieve nitrogen removal from domestic wastewater via anammox using intermittent aeration with low dissolved oxygen [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 13048.
- [26] Xu H L, Wang C B, Liang Z W, *et al.* The structure and component characteristics of partial nitrification biofilms under autotrophic and heterotrophic conditions [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **99**(8): 3673-3683.
- [27] Cheng S S, Chen W C. Organic carbon supplement influencing performance of biological nitrification in a fluidized bed reactor [J]. *Water Science and Technology*, 1994, **30**(11): 131-142.
- [28] Mosquera-Corral A, González F, Campos J L, *et al.* Partial nitrification in a SHARON reactor in the presence of salts and organic carbon compounds [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(9): 3109-3118.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172