

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)

郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)

能见度与 PM_{2.5} 浓度关系及其分布特征 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)

基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)

办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦春春 (3008)

南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)

水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)

银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)

渝江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 唐金平, 张强, 胡谦, 张宇, 聂保伟 (3089)

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因素分析 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)

微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 鹏飞, 王凯军 (3126)

钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)

基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)

N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBk5 染料废水 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)

Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)

CANON 中试反应器启动及性能优化 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王伟佳, 张树军 (3195)

ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)

在线 NaClO 反洗对倒置 A²O-MBR 系统微生物群落的影响 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)

北京市清水与再生水协同利用优化模型 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)

N-亚硝酸胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)

北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅男 (3249)

紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)

四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)

热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)

鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)

宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)

石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)

磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)

会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)

改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)

重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N₂O 排放影响 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)

渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)

西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)

《环境科学》征订启事(3194) 《环境科学》征稿简则(3222) 信息(3256, 3284, 3323)

Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响

买文可^{1,2}, 彭永臻^{1,2*}, 吉建涛^{1,2}

(1. 北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124; 2. 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘要: 短程生物脱氮工艺在废水处理中已经得到较为广泛的应用, 其反硝化过程是实现氮去除的关键步骤, 而关于废水中常见重金属离子 Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响尚无系统研究. 选取 A/O 反应器内具有良好短程生物脱氮特性的污泥, 通过批次试验及 SBR 长期试验分别探究了 Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的短期及长期影响. 短期试验结果表明, Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程具有明显抑制作用, 对污泥反硝化活性的半抑制浓度 EC₅₀ 为 4.79 mg·L⁻¹. 在长期影响试验中逐渐提高污泥对 Cu²⁺ 的耐受浓度, 当 Cu²⁺ 浓度为 0.5 mg·L⁻¹ 和 1 mg·L⁻¹ 时, 污泥反硝化活性降低后均能够通过驯化恢复至原有水平; 而 Cu²⁺ 浓度升高至 3 mg·L⁻¹ 后污泥反硝化性能遭到破坏且难以恢复, NO₂⁻-N 去除率降低至 10% 以下, 反硝化系统遭到严重抑制. 但是, 停止投加 Cu²⁺ 后污泥反硝化活性在第 14 d 恢复至原有水平. 同时, 在 Cu²⁺ 的长期影响过程中, EPS 含量增多, 对微生物抵御 Cu²⁺ 的毒害起到重要保护作用, 促使污泥粒径增大, 污泥沉降性得到提高.

关键词: Cu²⁺; NO₂⁻; 反硝化; 短期影响; 长期影响

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3162-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812125

Effect of Cu²⁺ on Denitrification Using NO₂⁻ as an Electron Acceptor

MAI Wen-ke^{1,2}, PENG Yong-zhen^{1,2*}, JI Jian-tao^{1,2}

(1. National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing 100124, China)

Abstract: The short-cut biological nitrogen removal process has been widely used in industrial wastewater treatment, and denitrification is a crucial step for removing nitrogen on which the effect of Cu²⁺, a common heavy metal ion in wastewater, has not been studied. In this study, sludge with good short-range biological nitrogen removal characteristics in an A/O reactor was selected to investigate the short-term and long-term effects of Cu²⁺ on denitrification using NO₂⁻ as an electron acceptor. The results showed that Cu²⁺ had a significant inhibitory effect on denitrification process using NO₂⁻ as an electron acceptor, and the semi-inhibitory concentration EC₅₀ of sludge activity was 4.79 mg·L⁻¹. In the long-term experiment, the concentration of Cu²⁺ was gradually increased. When the concentration of Cu²⁺ was 0.5 mg·L⁻¹ and 1 mg·L⁻¹, the denitrification activity of the sludge could be restored to the original level after acclimation. When the concentration of Cu²⁺ was increased to 3 mg·L⁻¹, the denitrification performance was destroyed and difficult to recover, at which point the NO₂⁻-N removal rate was reduced to less than 10% and the denitrification system was severely inhibited. However, there was some recovery of sludge denitrification capacity after the addition of Cu²⁺ had been stopped for 14 days. At the same time, during the long-term effect of Cu²⁺, the EPS content increased, which played an important role in protecting the microorganism against Cu²⁺ toxicity, and increased the sludge particle size and, as a result, sludge sedimentation.

Key words: Cu²⁺; NO₂⁻; denitrification; short-term effect; long-term effect

短程硝化反硝化是指将 NH₄⁺ 氧化过程控制在 NO₂⁻ 阶段, 然后以 NO₂⁻ 为电子受体将其反硝化至 N₂ 的过程^[1]. 相对于传统硝化反硝化工艺, 短程硝化反硝化工艺 (SHARAN 工艺) 具有节省曝气能耗, 降低碳源投加费用, 缩短反应历程等优点^[2,3]. 目前以过程控制为手段的 SHARAN 工艺 SBR 中试已经实现了长久稳定的维持^[4], 而其中以 NO₂⁻ 为电子受体的短程反硝化过程是该工艺的关键步骤之一^[5]. 该工艺在对工业含氮废水 (如焦化厂废水^[6] 和催化剂生产废水等^[7]) 的处理中也得到广泛应用.

重金属作为主要有毒成分之一广泛存在于化

工、冶金等工业废水中^[8]. 微量的重金属是微生物生命活动需要的营养物质, 但过量的重金属对生物具有毒害作用, 不可避免地会导致生物废水处理系统的恶化^[9,10]. 而 Cu²⁺ 是工业废水中最常见的重金属离子之一, 关于 Cu²⁺ 对活性污泥系统如缺氧生物膜系统^[11]、硝化系统^[12]、生物强化除磷系统^[13,14] 及反硝化除磷系统^[15] 等的影响已有广泛研究, 而有关其对反硝化污泥系统影响的研究还较

收稿日期: 2018-12-15; 修订日期: 2019-01-12

基金项目: 北京市科技计划项目 (D171100001017002); 北京市教委项目

作者简介: 买文可 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水脱氮理论与技术, E-mail: 393315366@qq.com

* 通信作者, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

少. 因此, 研究 Cu^{2+} 对以 NO_2^- 为电子受体反硝化过程的影响对 SHARAN 工艺处理污水的实际应用具有重要意义.

本研究表明活性污泥细胞外聚合物 (EPS) 中包含的具有高吸收官能团的高分子量化合物 (主要是多糖、蛋白质、腐殖质和 DNA) 对重金属具有吸附和黏附性质, 其存在的带电荷的部分可作为配体源为金属带电粒子提供结合位点, 因此 EPS 在一定浓度重金属范围内对于降低其潜在毒性有重要作用^[16].

基于以上背景, 本试验采用 SBR 考察了 Cu^{2+} 对还原 NO_2^- 过程的短期毒性作用, 并对 Cu^{2+} 负荷下微生物还原 NO_2^- 能力进行长期培养驯化, 通过逐步提高污泥对 Cu^{2+} 的耐受浓度考察了长期影响过程中以 NO_2^- 为电子受体的反硝化污泥对 Cu^{2+} 的耐受度变化, 同时探究了长期影响试验中 EPS 及污泥性质的变化情况, 以期对短程脱氮工艺的实际应用起到一定指导作用.

1 材料与方法

1.1 试验装置及接种污泥

本研究分别采用有效体积分别为 500 mL 试剂瓶和 3 L 的 SBR 反应器进行短期和长期试验, 本试

表 1 长期影响试验运行阶段

Table 1 Operation stages of the long-term experiment

试验阶段	I	II	III	IV	V
时间/d	1 ~ 10	11 ~ 25	26 ~ 40	41 ~ 70	71 ~ 90
Cu^{2+} 投加浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0.5	1	3	0

1.3 检测指标和分析方法

水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤进行参数测定. 其中 NO_2^- -N 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定; pH 采用德国 WTW 便携式多功能检测仪 (Multi 340i) 进行实时监测; MLSS 采用滤纸称重法测定; MLVSS 采用马弗炉灼烧重量法测定; 通过测定不同时刻的 NO_2^- -N 浓度值, 绘制 NO_2^- -N 浓度随时间的变化曲线图, 计算曲线的斜率与反应器 MLVSS 的比值, 可求得 NO_2^- -N 比还原速率, 即 NO_2^- -N 反硝化活性; 多糖选用蒽酮比色法测定; DNA 以小牛胸腺 DNA 作为标准物质, 采用二苯胺法测定; 菌群致死率采用 LIVE/DEAD BacLight 细菌细胞活性测定试剂染色法测定 (以细胞膜的完整性为基础), 采用绿色荧光核酸染色剂 SYTO® 9 和红色荧光核酸染色剂 Propidium (PI) 分别对完好与受损的细胞膜进行标记后, 使用荧光显微镜 (OLYMPUS-BX61) 对每个污泥样品拍摄 30 组照片, 并用 Image-Pro Plus 软件对照片进行处理与分析, 计算出平均细菌死亡率; 胞

外聚合物 (EPS) 采用超声波法分层提取^[17], EPS 中蛋白质以牛血清蛋白作为标准物质, 用修正的 Folin-酚法测定; 污泥粒径采用 Microtrac S3500 激光粒度仪测定; SVI 采用静沉法测定.

接种污泥取自北京工业大学 A/O 短程硝化反硝化中试反应器, 污泥具有良好的短程生物脱氮性能.

1.2 试验方案

短期影响: 基于批次试验, 采用 8 个 500 mL 试剂瓶考察不同浓度铜离子 (0、0.5、1、2、3、5、7 和 $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对污泥反硝化过程的短期影响. SBR 内污泥浓度均为 $3000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 运行方式为瞬间进水, 一次性投加基质, 稀释后的基质浓度为 $150\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ COD (乙酸钠) 和 $50\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NaNO_2 , 缺氧搅拌 4 h. 批次试验共进行 3 次, 结果为 3 次试验结果的平均值.

长期影响: 考察 Cu^{2+} 对以 NO_2^- 为电子受体反硝化污泥的长期驯化过程, 采用 1 个 3 L SBR 反应器进行 90 d 长期试验, 每天运行 2 个周期, 每周期 4 h, 排水比为 50%, 污泥浓度不控制, 不单独排泥. 运行方式为瞬时进水, 每周期一次性投加基质 (成分和浓度同短期影响试验), 根据 Cu^{2+} 的投加浓度将长期试验分为 5 个阶段 (如表 1), 分别对应投加 Cu^{2+} 浓度为 0、0.5、1 和 $3\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以及系统反硝化效果遭到抑制后停止投加 Cu^{2+} 阶段.

外聚合物 (EPS) 采用超声波法分层提取^[17], EPS 中蛋白质以牛血清蛋白作为标准物质, 用修正的 Folin-酚法测定; 污泥粒径采用 Microtrac S3500 激光粒度仪测定; SVI 采用静沉法测定.

2 结果与讨论

2.1 不同浓度 Cu^{2+} 对以 NO_2^- 为电子受体反硝化过程的短期影响

不同浓度 Cu^{2+} 对以 NO_2^- 为电子受体反硝化污泥活性的抑制作用如图 1(a) 所示. 从中可以看出, Cu^{2+} 对反硝化活性表现出明显的抑制作用, 且随着 Cu^{2+} 浓度的升高, NO_2^- -N 比还原速率呈线性降低, 当 Cu^{2+} 浓度升高至 $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, NO_2^- -N 比还原速率降低至 $0\ \text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$. Cu^{2+} 对以 NO_2^- 为电子受体反硝化污泥活性的抑制规律很好地符合 Monod 方程, 相关系数 R^2 大于 0.97^[18]. Monod 方程 [式 (1)] 模拟得出 Cu^{2+} 对 NO_2^- -N 反硝化活性的半抑制

浓度(EC_{50})为 $4.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

$$r = \frac{r_{\max}x}{p + x} \quad (1)$$

式中, r 为抑制率, %; p 为当 r 为 50% 时的抑制物浓度(即 EC_{50}), $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; r_{\max} 为最高抑制率, %; x 为限制物浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

有研究表明, 以 NO_2^- 为电子受体反硝化过程是碱度增加、pH 值连续升高的过程^[19]. 图 1 (b) 为不同浓度 Cu^{2+} 下 NO_2^- 反硝化过程 pH 值变化曲线. 随着反硝化过程的进行, pH 值均在不断上升达到最高值后基本不再变化, 但随着浓

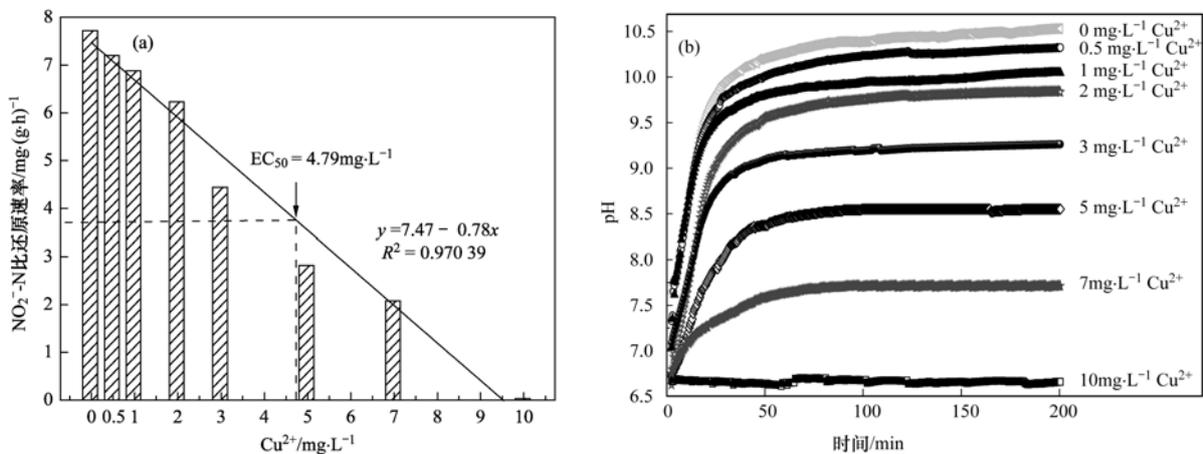


图 1 不同浓度 Cu^{2+} 下 NO_2^- -N 反硝化活性与 pH 变化

Fig. Specific activity and pH profiles during denitrification of NO_2^- -N at different concentrations of Cu^{2+}

Cu^{2+} 对反硝化活性表现出明显毒性抑制作用的原因可能是当 Cu^{2+} 浓度较高时, 会侵入微生物机体影响其正常的生理代谢功能, 破坏其细胞结构, 最终使生物体表现为中毒甚至死亡^[20]. 为了探究 Cu^{2+} 对以 NO_2^- 为电子受体反硝化污泥活性影响的作用机制, 测定了不同浓度 Cu^{2+} 对 NO_2^- 反硝化污泥的相对细菌致死率(相对于 Cu^{2+} 浓度为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[21], 污泥死亡率与 Cu^{2+} 浓度的关系如图 2 所示. 从中可以看出 Cu^{2+} 对 NO_2^- 反硝化污泥的致死作用与 Cu^{2+} 浓度存在明显线性正相关关系(相关系数 R^2 大于 0.99), 即 Cu^{2+} 对 NO_2^- 反硝化污泥毒性造成的细菌致死率随着 Cu^{2+} 浓度增加而升高, 致使系统比 NO_2^- -N 反硝化速率逐渐降低, 根据线性关系可得 Cu^{2+} 对 NO_2^- 反硝化污泥的半致死率浓度 LC_{50} 为 $11.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 当 Cu^{2+} 浓度升高至 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, Cu^{2+} 对 NO_2^- 反硝化污泥的相对细菌致死率为 45.0%, 即系统中仍有多数细菌存活, 说明 NO_2^- 反硝化活性在 Cu^{2+} 毒性冲击后有可能得到恢复^[22].

2.2 Cu^{2+} 对系统反硝化脱氮效果的长期影响

Cu^{2+} 对以 NO_2^- 为电子受体反硝化过程中系统

度的升高, pH 值变化曲线的斜率及最高值逐渐降低, 表明 Cu^{2+} 对 NO_2^- 反硝化活性产生抑制作用的同时也抑制了该过程中 pH 值的升高, 可用于 Cu^{2+} 对 NO_2^- 反硝化系统毒性冲击的预警监测. 值得注意的是, 彭永臻等^[3] 研究发现, 适宜 pH 下以 NO_2^- 为电子受体反硝化还原菌活性较强, 因而对 ρ (FNA) 抑制剂的抵抗能力也较强. 本试验中 Cu^{2+} 浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 系统 pH 值维持在 6.7 左右, 反硝化污泥对 ρ (FNA) 抑制的抵御能力较弱, 从而发生恶性循环使系统丧失反硝化活性.

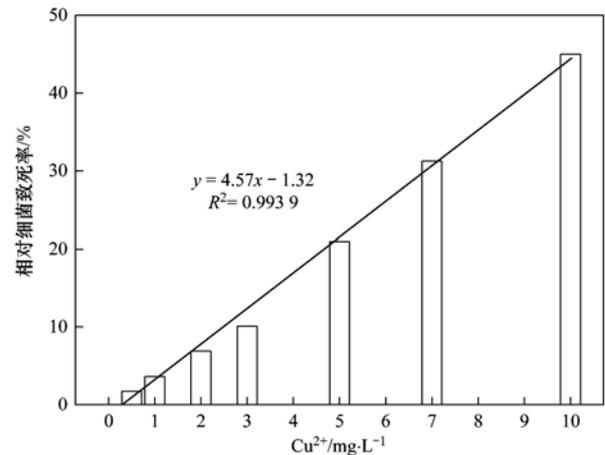


图 2 不同浓度 Cu^{2+} 对 NO_2^- -N 反硝化污泥的相对细菌致死率

Fig. 2 Relative rate of biocidal cells in NO_2^- -N denitrifying sludge with different concentrations of Cu^{2+}

NO_2^- -N 去除效果与污泥反硝化活性的长期影响如图 3 所示. 从中可以看出, 接种污泥后成功启动了以 NO_2^- 为电子受体的反硝化反应器, 反应器稳定运行 10 d, 反硝化活性达到 $13.5 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, NO_2^- -N 去除率稳定维持在 99% 以上后, 开始投加 Cu^{2+} . 投加 Cu^{2+} 浓度为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,

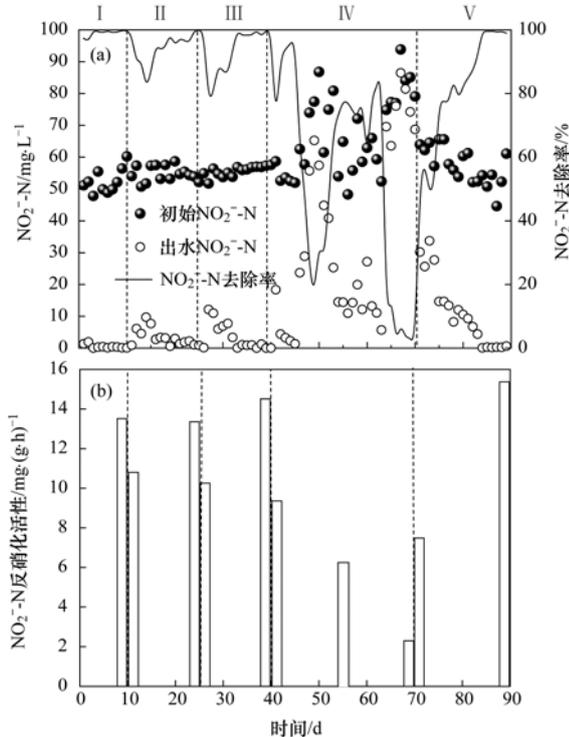


图3 Cu^{2+} 长期影响下的 NO_2^- -N 去除效果及反硝化活性变化
Fig. 3 NO_2^- -N removal performance and changes in denitrification activity under the long-term influence of Cu^{2+}

系统 NO_2^- -N 去除率在投加初始均出现明显降低, 出水 NO_2^- -N 浓度升高, NO_2^- 反硝化活性分别降低 20.1% 和 23.3%, 但经驯化后系统 NO_2^- 反硝化性能均能得到恢复, NO_2^- -N 去除率恢复至 99% 以上, 且 NO_2^- 反硝化活性恢复至原有水平. 说明当 Cu^{2+} 浓度不大于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, NO_2^- 反硝化污泥具有良好的耐受性, NO_2^- -N 去除率与反硝化活性能够随着运行时间的增加得到恢复. 然而, 当投加 Cu^{2+} 浓度升高至 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, NO_2^- -N 去除率及反硝化活性同样出现降低, 到第 49 d NO_2^- -N 去除率降低至 15.7% 后系统 NO_2^- -N 反硝化性能出现逐步恢复至 80% 左右, 后又开始下降. 在第 64 d, NO_2^- -N 去除率降低至 10% 以下, NO_2^- -N 反硝化活性降低至 $2.3\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 此时, NO_2^- 反硝化性能难以得到恢复, 即在 Cu^{2+} 浓度为 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 运行 30 d 后, 系统崩溃, 几乎丧失了 NO_2^- 反硝化能力. 其原因可能是在阶段初期, 污泥吸附及胞外聚合物络合等作用可以缓解 Cu^{2+} 对污泥活性的抑制作用, 使污泥活性在受到抑制后能够得到恢复, 但随着运行时间的增加, 在长期暴露于高浓度 Cu^{2+} 环境中后, 污泥吸附及胞外聚合物络合等作用达到饱和, 过多的 Cu^{2+} 侵入机体与生物分子(蛋白质、氨基酸和核酸)结合, 生成金属络合物或金属螯合物, 改变生物大分子正常的生理代谢功能, 使生物体表现为中毒现象

甚至死亡, 从而使反硝化活性受到累积抑制, 基本失去反硝化能力^[23]. 为了恢复系统 NO_2^- 反硝化性能, 在第 70 d 停止投加 Cu^{2+} . 停止投加 Cu^{2+} 后, 系统 NO_2^- -N 去除率在第 14 d 得到恢复, 在第 84 d, NO_2^- -N 去除率恢复至 99.0% 以上并能够维持稳定, 反硝化活性恢复至 $15.37\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.

2.3 长期影响过程中系统生物量及 EPS 含量与污泥性质变化

长期驯化过程中以 NO_2^- 为电子受体的反硝化性能也和系统污泥生物量及细胞分泌的 EPS 含量变化有关. 图 4 为长期驯化过程中各阶段污泥 MLSS、MLVSS 及 MLVSS/MLSS 值变化, 在不投加 Cu^{2+} 的对照阶段, 经过 10 d 培养, 污泥 MLSS、MLVSS 均升高, MLVSS/MLSS 值在 60.0% 以上. 投加 Cu^{2+} 阶段, 污泥 MLSS 仍然逐渐升高, 而 MLVSS 及 MLVSS/MLSS 值却在逐渐降低, 表明投加 Cu^{2+} 后仍然存在微生物的增殖, 系统污泥 MLSS 升高, 然而 Cu^{2+} 毒性作用致使较多微生物死亡, 导致 MLVSS 及 MLVSS/MLSS 值逐渐降低, 但在阶段 I 和阶段 II, 系统内仍有足够生物量保证系统反硝化效果能够得到恢复. 随着投加 Cu^{2+} 浓度逐渐升高, 至第 70 d, 系统 MLVSS 降低至仅有 $1\text{ 000 mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但在停止投加后系统 MLVSS 值升高, 污泥生物量有所恢复, 这也为系统反硝化性能得到恢复提供条件.

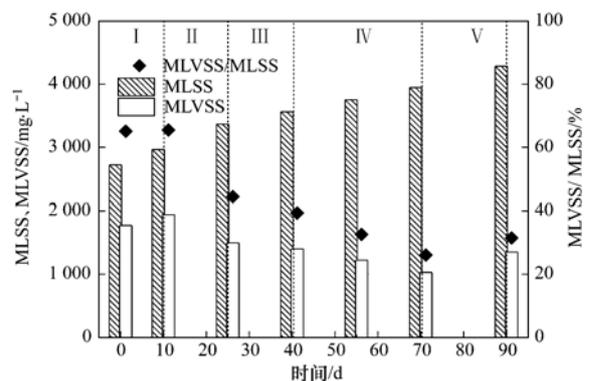


图4 长期驯化过程中污泥生物量变化
Fig. 4 Changes in biomass at various stages of the experiment

长期运行过程中各阶段 EPS 含量变化如图 5 所示. 从中可看出, 相较于前一个阶段末, 在 Cu^{2+} 投加浓度升高的每个阶段初, EPS 含量均出现明显的增高(图 5 中虚线圈内所示), 这可能是由于细胞通过分泌 EPS 来应对 Cu^{2+} 浓度突然升高这一外界环境的变化以维持系统的稳定性^[24]. 同时, 从开始投加 Cu^{2+} 到 Cu^{2+} 浓度升高到 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的阶段 IV 初期, 系统 EPS 含量均在逐步增加. 作为细胞与外界环境之间的扩散屏障, EPS 的产生能够作为细菌对

自身的保护性反应,从而维持系统稳定^[25].所以,在 Cu^{2+} 浓度升高时,细菌通过分泌更多 EPS 并且紧密聚集来保护自身,降低 Cu^{2+} 毒性,这也解释了在 Cu^{2+} 浓度为 0.5 和 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 阶段系统反硝化性能能够得到恢复,对 Cu^{2+} 的耐受性得到提高的原因.而在 Cu^{2+} 浓度升高到 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,细胞通过分泌 EPS 抵御 Cu^{2+} 毒性, EPS 含量出现升高,但由于 Cu^{2+} 的持续毒性超过系统负荷及 EPS 保护阈值,致使过多细菌中毒死亡,导致系统 MLVSS 降低,生物分泌的 EPS 含量逐渐减少,对毒性的抵御能力下降,恶性循环最终导致系统崩溃,反硝化性能丧失.而在停止投加 Cu^{2+} 的恢复阶段,随着系统生物量升高, EPS 含量也逐渐升高,系统反硝化性能得到恢复.

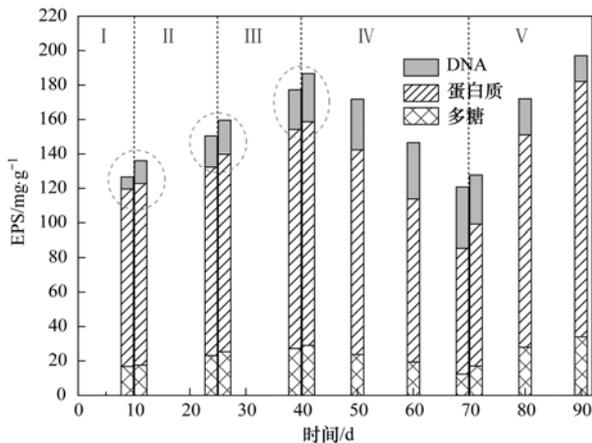


图 5 各阶段污泥 EPS 含量变化

Fig. 5 Changes in EPS content at various stages of the experiment

另由图 5 可知,所有 EPS 层中均以蛋白质为主,这可能是由于 EPS 是细胞体与水溶液间的离子传递通道,而离子的转移过程需要转移蛋白参与,因而会有大量蛋白质分泌到胞外参与转移过程^[26].而随着 Cu^{2+} 浓度升高, EPS 中 DNA 含量逐渐增加,这可能是由于 Cu^{2+} 毒性导致细胞膜、细胞壁等细胞结构遭到破坏,从而导致包括 DNA 在内的细胞成分的泄漏^[27].

图 6 为各阶段污泥平均粒径及 SVI 的变化.从中可以看出,污泥平均粒径及污泥沉降性与 EPS 含量变化呈明显的相关性.阶段 III 末,随着系统 EPS 含量的升高,污泥平均粒径由阶段 I 的 $79.7 \mu\text{m}$ 升高至 $103.4 \mu\text{m}$,污泥 SVI 由 $64.4 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 逐渐降低至 $45.2 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,沉降性得到明显提高.随后在阶段 IV,随着污泥 EPS 的降低,污泥平均粒径逐渐降低至 $86.3 \mu\text{m}$,SVI 上升.在停止投加 Cu^{2+} 的恢复期,因 EPS 的含量升高污泥粒径增长至 $128.2 \mu\text{m}$,污泥 SVI 降低至 $27.7 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,污泥沉降性得到明显提高.有研究表明, EPS 对颗粒污泥的形成具有

积极的作用^[28],其中起主要作用的是多糖与蛋白,它们可通过絮凝的方式将细小的颗粒凝聚成较大的污泥颗粒,使得污泥粒径增加^[29].EPS 对污泥沉降性有明显影响,这可能与 EPS 吸附 Cu^{2+} 导致污泥密度增加有关^[30].此外, EPS 中负电荷基团(如羧基、羟基和酰胺等)与带有正电荷的 Cu^{2+} 结合可降低污泥间斥力,也可造成污泥更容易沉降^[31].

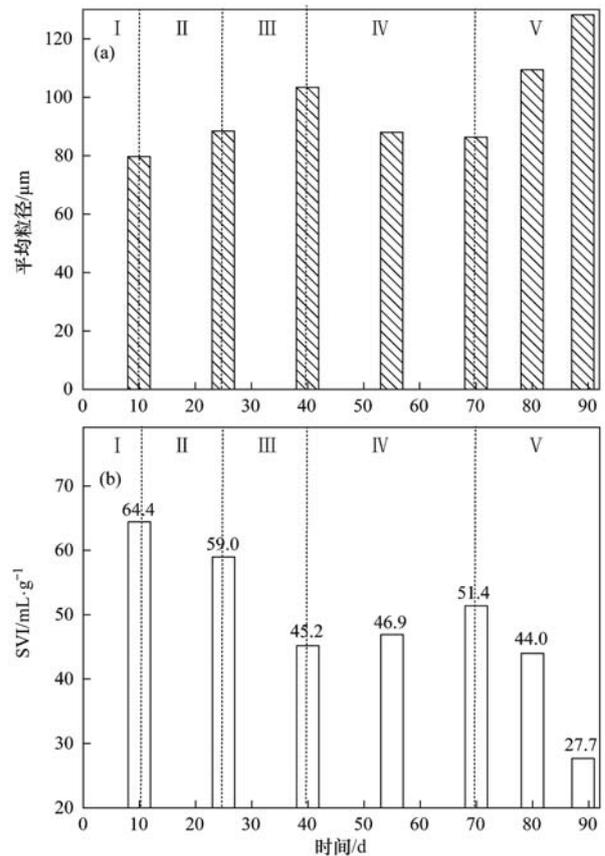


图 6 各阶段污泥平均粒径及 SVI 变化

Fig. 6 Variations in the average particle size and the SVI value at various stages of the experiment

3 结论

(1) Cu^{2+} 对以 NO_2^- 为电子受体的反硝化过程具有明显抑制作用, NO_2^- -N 去除率随 Cu^{2+} 浓度升高呈线性降低, EC_{50} 为 $4.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这与 Cu^{2+} 对反硝化污泥的细菌致死作用有关,其 LC_{50} 为 $11.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

(2) 长期影响试验中, Cu^{2+} 浓度为 0.5 和 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,能够通过驯化恢复使污泥 NO_2^- 反硝化活性至原有水平;而当 Cu^{2+} 浓度升高至 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,反硝化污泥活性降低后难以通过驯化恢复, NO_2^- -N 去除率降低至 10% 以下, NO_2^- 反硝化系统遭到严重破坏,停止投加 Cu^{2+} 后 14 d 污泥 NO_2^- 反硝化能力得到恢复.

(3) 长期驯化过程中, Cu^{2+} 浓度为 0.5 和 1

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 细胞 EPS 含量升高, 对降低 Cu^{2+} 毒害起到重要作用, 能够促使系统 NO_2^- 反硝化性能得到恢复, 提高污泥平均粒径及污泥沉降性。 Cu^{2+} 浓度升高至 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 长时间累积的 Cu^{2+} 超过系统 EPS 保护阈值, 系统生物量降低, EPS 含量减少, 反硝化性能下降。

(4) 通过驯化反硝化污泥能够提高其对 Cu^{2+} 的耐受度。但是, 随着 Cu^{2+} 浓度的增加, 系统处理能力下降, 建议在处理较高浓度的含铜废水时, 根据条件对其进行预处理, 将 Cu^{2+} 浓度降低到系统能够忍受的范围内。

参考文献:

- [1] Chung J, Bae W. Nitrite reduction by a mixed culture under conditions relevant to shortcut biological nitrogen removal [J]. *Biodegradation*, 2002, **13**(3): 163-170.
- [2] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration [J]. *Water Research*, 2003, **37**(6): 1371-1377.
- [3] 彭永臻, 刘壮, 宋燕杰, 等. FNA 对为电子受体反硝化的抑制动力学研究 [J]. *北京工业大学学报*, 2012, **38**(6): 890-897.
Peng Y Z, Liu M, Song Y J, *et al.* Inhibition kinetics of FNA to denitrification using nitrite as electron acceptors [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2012, **38**(6): 890-897.
- [4] Yang Q, Peng Y Z, Liu X H, *et al.* Nitrogen removal via nitrite from municipal wastewater at low temperatures using real-time control to optimize nitrifying communities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(23): 8159-8164.
- [5] 吴雪, 赵鑫, 刘一威, 等. 高氨氮废水短程硝化系统影响因素研究 [J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(S1): 5-9, 59.
Wu X, Zhao X, Liu Y W, *et al.* The effects of environmental factors on high strength ammonia wastewater treatment by shortcut nitrification processing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(S1): 5-9, 59.
- [6] 刘超翔, 胡洪营, 彭党聪, 等. 短程硝化反硝化工艺处理焦化高氨废水 [J]. *中国给水排水*, 2003, **19**(8): 11-14.
Liu C X, Hu H Y, Peng D C, *et al.* Short-cut nitrification and denitrification for treatment of high ammonia content wastewater from coking plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2003, **19**(8): 11-14.
- [7] 高会杰, 李志瑞, 黎元生. 短程硝化反硝化处理来自 FCC 催化剂生产中含氨废水 [J]. *石油炼制与化工*, 2010, **41**(1): 59-61.
Gao H J, Li Z R, Li Y S. Treating ammonia-containing wastewater from FCC catalyst production by short-cut nitrification-denitrification [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2010, **41**(1): 59-61.
- [8] Hammami A, Ballester A, Blázquez M L, *et al.* Effect of the presence of lead on the biosorption of copper, cadmium and zinc by activated sludge [J]. *Hydrometallurgy*, 2002, **67**(1-3): 109-116.
- [9] 汪良珠. 重金属冶炼厂废水的危害及治理 [J]. *金属世界*, 2000, (5): 12.
- [10] 王鲁民. 微生物法处理重金属污水的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- [11] Feng B, Fang Z, Hou J C, *et al.* Effects of heavy metal wastewater on the anoxic/aerobic-membrane bioreactor bioprocess and membrane fouling [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **142**: 32-38.
- [12] You S J, Tsai Y P, Huang R Y. Effect of heavy metals on nitrification performance in different activated sludge processes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 987-994.
- [13] Tsai Y P, Tzeng H F, Lin J W, *et al.* Verification of enzymes deterioration due to Cu(II) presence in an enhanced biological phosphorus removal system [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(5): 602-607.
- [14] Wu G X, Rodgers M. Inhibitory effect of copper on enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Science and Technology*, 2010, **62**(7): 1464-1470.
- [15] Wang Y Y, Qin J, Zhou S, *et al.* Identification of the function of extracellular polymeric substances (EPS) in denitrifying phosphorus removal sludge in the presence of copper ion [J]. *Water Research*, 2015, **73**: 252-264.
- [16] 王子超. 盐度和重金属对序批式生物反应器性能及微生物群落结构影响的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Wang Z C. Effects of salinity and heavy metals on the performance and microbial community structure of sequencing batch bioreactor [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [17] 袁冬琴, 王毅力. 活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3522-3528.
Yuan D Q, Wang Y L. Study on the stratification components of extracellular polymeric substances (EPS) in activated sludge and their variation characteristics in physicochemical properties [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3522-3528.
- [18] 荣宏伟, 王勤, 张朝升, 等. Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 对生物脱氮系统的影响 [J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(4): 617-620.
Rong H W, Wang Q, Zhang C S, *et al.* Effect of Cu^{2+} and Zn^{2+} on the biological nitrogen removal system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, **3**(4): 617-620.
- [19] 马娟, 彭永臻, 王丽, 等. 温度对反硝化过程的影响以及 pH 值变化规律 [J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(11): 1004-1008.
Ma J, Peng Y Z, Wang L, *et al.* Effect of temperature on denitrification and profiles of pH during the process [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(11): 1004-1008.
- [20] Wang R, Zheng P, Ding A Q, *et al.* Effects of inorganic salts on denitrifying granular sludge: The acute toxicity and working mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **204**: 65-70.
- [21] Ma B, Peng Y Z, Wei Y, *et al.* Free nitrous acid pretreatment of wasted activated sludge to exploit internal carbon source for enhanced denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **179**: 20-25.
- [22] Ji J T, Peng Y Z, Wang B, *et al.* Effects of salinity build-up on the performance and microbial community of partial-denitrification granular sludge with high nitrite accumulation [J]. *Chemosphere*, 2018, **209**: 53-60.
- [23] Wang X H, Gai L H, Sun X F, *et al.* Effects of long-term addition of Cu(II) and Ni(II) on the biochemical properties of aerobic granules in sequencing batch reactors [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **86**(6): 1967-1975.
- [24] 王然登, 程战利, 彭永臻, 等. 强化生物除磷系统中胞外聚合物的特性 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(11): 2838-2843.
Wang R D, Cheng Z L, Peng Y Z, *et al.* Characteristics of EPS taken from an enhanced biological phosphorus removal system [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(11): 2838-2843.

- [25] Jia X S, Furumai H, Fang H H P. Yields of biomass and extracellular polymers in four anaerobic sludges [J]. *Environmental Technology*, 1996, **17**(3): 283-291.
- [26] Nielsen P H, Frølund B, Keiding K. Changes in the composition of extracellular polymeric substances in activated sludge during anaerobic storage[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1996, **44**(6): 823-830.
- [27] Zhao H. Effect of ions and other compatible solutes on enzyme activity, and its implication for biocatalysis using ionic liquids [J]. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 2005, **37**(1-6): 16-25.
- [28] Bruus J H, Nielsen P H, Keiding K. On the stability of activated sludge flocs with implications to dewatering [J]. *Water Research*, 1992, **26**(12): 1597-1604.
- [29] 田志娟. 胞外多聚物对好氧颗粒污泥形成与结构稳定化的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [30] Li J, Liu X, Liu Y, *et al.* The effect of continuous exposure of copper on the properties and extracellular polymeric substances (EPS) of bulking activated sludge [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(9): 1567-1573.
- [31] Sun X F, Wang S G, Zhang X M, *et al.* Spectroscopic study of Zn^{2+} and Co^{2+} binding to extracellular polymeric substances (EPS) from aerobic granules [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, **335**(1): 11-17.

环 境 科 学

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)