

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

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

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何晶晶 (467)

纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响

周丰¹, 王翻翻¹, 钱飞跃^{1,2,3*}, 黄慧敏¹, 沈耀良^{1,2,3}, 周建民¹

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 为探究连续流条件下, 纳米零价铁 (nZVI) 对反硝化颗粒污泥 (DGS) 性能的影响, 本文利用升流式污泥床 (USB), 系统考察了反应器脱氮效能、污泥形态和反硝化特性随进水 nZVI 浓度的变化规律。结果表明, 当 nZVI < 5 mg·L⁻¹ 时, 反应器脱氮效能与对照期 (nZVI = 0 mg·L⁻¹) 相差很小, DGS 活性略微增大。当 nZVI 浓度在 5 ~ 10 mg·L⁻¹ 时, DGS 对 nZVI 的生物抑制作用表现出一定适应性, 污泥浓度和颗粒粒径仍保持增长趋势, 但泥相中总铁含量明显增大, DGS 活性开始降低。当 nZVI 浓度增至 30 mg·L⁻¹ 时, 反应器对 COD 和 NO₃⁻-N 的去除率分别降至对照期的 23.3% 和 20.3%。DGS 因吸附大量 nZVI 而呈黑色, 颗粒粒径减小, 污泥表面短杆菌等微生物密度明显降低。停止投加 nZVI 后, 污泥浓度与 DGS 活性的持续上升, 使得反应器脱氮效能可在 20 d 内基本恢复至对照期的水平。异养菌在颗粒表面的快速增殖是实现上述目标的主要原因。

关键词: 纳米零价铁; 上流式污泥床; 颗粒污泥; 反硝化; 生物抑制作用

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0263-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201706177

Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor

ZHOU Feng¹, WANG Fan-fan¹, QIAN Fei-yue^{1,2,3*}, HUANG Hui-min¹, SHEN Yao-liang^{1,2,3}, ZHOU Jian-min¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Resource Utilization Technology of Municipal Sewage, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou 215009, China)

Abstract: In order to examine the effects of nanoscale zero-valent iron (nZVI) on the performance of denitrifying granular sludge (DGS) in a continuous flow model, the variations of nitrogen removal efficiency in the reactor, sludge morphology, and denitrifying characteristics at different influent nZVI concentrations were investigated in an upflow sludge bed (USB). The results showed that nZVI concentrations lower than 5 mg·L⁻¹ did not influence the nitrogen removal performance of the reactor significantly, and the activity of DGS was improved slightly. When the influent nZVI concentration was in the range of 5 to 10 mg·L⁻¹, the DGS could adapt to the biological inhibition of nZVI partially, with the increase of sludge concentration and grain size. However, the higher total iron contents in the sludge resulted in the lower denitrifying activity of the DGS. The removal efficiencies of COD and NO₃⁻-N in the reactor decreased to 23.3% and 20.3%, respectively, at the influent nZVI concentration of 30 mg·L⁻¹. Moreover, the DGS was a dark color and of a smaller grain size because of the adsorption of a large amount of nZVI, while the microbe density, such as that of the bacillus species, on the granule surface decreased significantly. In the recovery phase, the nitrogen removal performance of the reactor could almost reach its initial level at nZVI = 0 mg·L⁻¹ during an operation of 20 days due to the fast growth of heterotrophic microbes on the surface of the DGS.

Key words: nanoscale zero-valent iron; upflow sludge bed; granular sludge; denitrifying; biological inhibition

纳米零价铁 (nZVI) 是一种粒径小于 100 nm, 具有高反应活性的零价铁颗粒, 可用于去除多种环境介质中的氯代有机物、重金属和硝酸盐等污染物^[1, 2]。尽管铁元素不属于重金属, 但 nZVI 的输入仍会对污水生化处理系统产生显著影响^[3, 4]。Wu 等^[5]的研究表明, 投加低浓度 nZVI (20 mg·L⁻¹) 可以显著改善絮状活性污泥的除磷效果, 而高浓度 nZVI (200 mg·L⁻¹) 则会破坏部分微生物的细胞结构, 显著降低脱氢酶活性, 严重抑制污泥的脱氮、除碳性能。对于适应高溶解氧条件的亚硝化颗粒污泥 (NGS) 而言, nZVI 对氨氮去除速率的半抑制浓度为

700 mg·L⁻¹。另外, 投加 10 mg·L⁻¹ 的 nZVI 可使 NGS 的亚硝累积速率提升约 12.5%^[6]。相比之下, 在缺氧环境中, nZVI 对反硝化颗粒污泥 (DGS) 表现出更强的抑制作用。当基质 C/N = 6 时, 投加 100 mg·L⁻¹ 的 nZVI 即可使 DGS 的脱氮速率下降约

收稿日期: 2017-06-18; 修订日期: 2017-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51608341); 江苏省自然科学基金项目 (BK20150284); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 江苏省研究生科研创新计划项目 (KYLX16-1359); 苏州科技大学研究生科研创新计划项目 (SKCX16-025)

作者简介: 周丰 (1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制新技术, E-mail: b179097755@163.com

* 通信作者, E-mail: feiyuehandler@163.com

56.7%^[7]. 需要注意的是,上述结论都是基于批次实验获得的. Hu 等发现^[8],在考察 Cu、Zn、Ni 和 Cd 对活性污泥活性的影响时,短期批次实验的结果明显低估了重金属的生物抑制作用. 因此,有必要采用连续流运行方式,深入探究 nZVI 对典型生化处理系统的影响.

上流式污泥床(USB)是培养高性能 DGS 的常用反应器之一,其可用于处理进水硝态氮浓度在 20~2 000 mg·L⁻¹ 的各类废水,污泥去除负荷(以 NO₃⁻-N/VSS 计)可达 0.2~1.1 kg·(kg·d)⁻¹^[9~11]. 本文选取对 nZVI 较为敏感 DGS 作为研究对象,在碳源较充足(C/N=4)的条件下,分阶段设置 USB 的进水 nZVI 浓度,系统考察了反应器效能、污泥形态和反硝化特性的变化情况,并对 nZVI 生物抑制作用的可逆性进行了验证分析.

1 材料与方法

1.1 实验装置

如图 1 所示,实验采用小型圆柱形 USB, DGS 填充在内径 20 mm、总高约 600 mm 的中心管内,污泥有效容积约 0.16 L,人工配水经蠕动泵由中心管底部进入,从顶部溢出流入外侧套管内排出反应器. 中心管上端和下端均设置有污泥采样管. DGS 取自本实验室另一个带内循环的 USB 反应器(有效容积 3.5 L),污泥呈乳白色,颗粒粒径介于 1.3~2.5 mm,5 min 污泥沉降指数(SVI)约为 40 mL·g⁻¹. 当外加碳源充足时,DGS 最大比反硝化速率($\mu_{\max}$ 值,以 NO₃⁻-N/VSS 计,下同)可达 20~30 mg·(g·h)⁻¹.

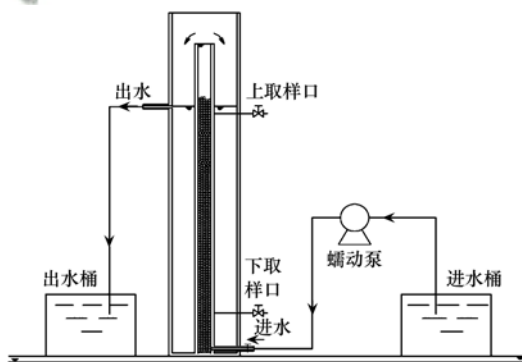


图 1 USB 反应装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the USB reactor

1.2 废水水质

实验采用人工配水,以乙酸钠和硝酸钾为碳、氮源. 为防止异养菌生长速率过快,控制进水 COD、NO₃⁻-N 浓度分别为 200 mg·L⁻¹ 和 50 mg·L⁻¹ (C/N=4),微量元素投加量为 1 mL·L⁻¹. 微量元素浓缩

液(mg·L⁻¹)包含:EDTA-Na₂ 5 000, ZnSO₄·7 H₂O 50, (NH₄)₂MoO₄ 21, CuSO₄·5H₂O 10, CoCl₂·6H₂O 50, H₃BO₄ 20, NiCl₂·6 H₂O 2 000, FeSO₄·7 H₂O 3 000, MnCl₂·4H₂O 5 000. 进水 pH 调节至 6.0~6.5 之间.

实验用 nZVI 采用液相还原法制备^[12]. 使用前,超声处理 10 min 以制备 nZVI 悬浊液,并投加适量至反应器进水中,以配置不同的 nZVI 进水浓度.

1.3 运行方法

为确保良好的水力流态,控制 USB 内上升流速为 4 m·h⁻¹,空床停留时间约为 7.5 min,有机物(以 COD 计)、硝态氮(以 NO₃⁻-N 计)容积负荷分别为 38.4 kg·(m³·d)⁻¹ 和 9.6 kg·(m³·d)⁻¹,水温在 22~25℃ 之间. 在最初的 10 d 内,进水中不投加 nZVI,作为对照期. 待反应器运行稳定后,逐步将进水 nZVI 浓度提高至 1、2、5、10、15 和 30 mg·L⁻¹. 随后,停止向进水中投加 nZVI,以考察污泥性能的恢复情况. 此外,各阶段在改变进水 nZVI 浓度前,需分别采集 USB 上端和下端的污泥样品,测定其比反硝化速率(μ 值)和泥相中总铁含量(q_m).

1.4 分析方法

COD、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、MLSS/MLVSS 和 SVI 值测定分别采用快速消解分光光度法、紫外分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺光度法、重量法和 5 min 沉降法^[13]. 定期采集反应器中部污泥样品,经固定、脱水预处理后,使用扫描电镜(日立 Model S-570 型)观察其表面结构变化^[14]. 污泥样品经混酸湿式消解处理后,采用原子吸收光谱仪(岛津 AA-6300C 型)测定 q_m ,单位为 mg·g⁻¹ (以 Fe/MLSS 计,下同).

采用批次实验(C/N=4)测定 μ 值,以表征 DGS 的反硝化活性. 计算时,需扣除亚硝态氮浓度的影响,具体方法详见文献^[15]. 以对照期 μ 值为基准,计算不同运行阶段颗粒污泥的比反硝化抑制率(IR,%)^[16]. 反硝化过程去除单位硝态氮消耗的有机物量用 $\Delta C/\Delta N$ 值表示,单位 g·g⁻¹ (以 COD/N 计,下同),计算公式见文献^[16].

2 结果与讨论

2.1 反应器处理效能随 nZVI 浓度的变化

如图 2 所示,当进水中不投加 nZVI 时(第 1~10 d),USB 对 COD、NO₃⁻-N 的去除率均值分别为 84.5%±1.6% 和 91.7%±0.9%,出水 NO₂⁻-N 浓度在 9.5 mg·L⁻¹ 左右. 由于出水中含有一定量新生成

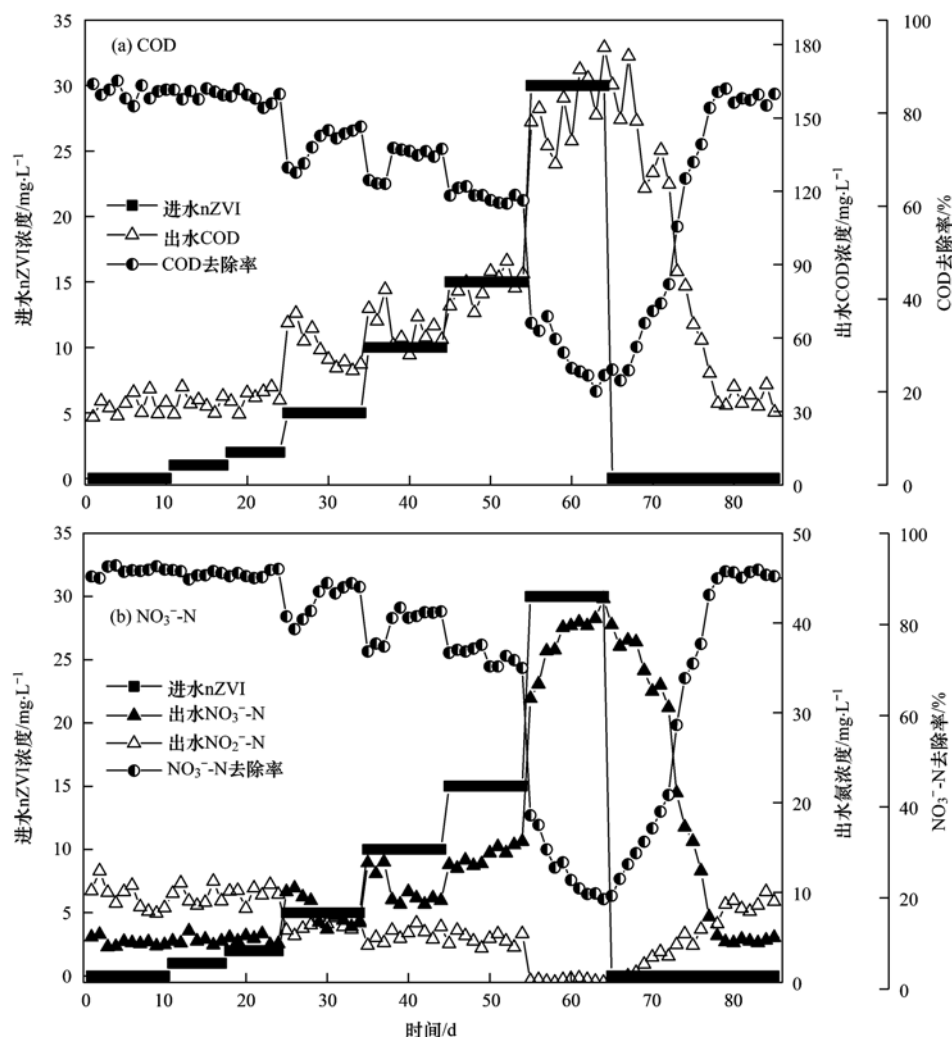


图2 运行期间,USB 处理效能随进水 nZVI 浓度的变化过程

Fig. 2 COD and NO_3^- -N removal by the USB at different influent nZVI concentrations throughout the operation period

的微生物代谢产物(SMP),因此,污泥去除单位硝态氮所消耗的 COD ($\Delta C/\Delta N = 4.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) 低于理论值 $4.85 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[17]. 当进水 nZVI 浓度为 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (第 11 ~ 24 d) 时,反应器对 COD、 NO_3^- -N 的去除效能并无明显变化. 当 $\text{nZVI} = 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,DGS 反硝化性能在经历短期冲击后逐渐恢复,COD 和 NO_3^- -N 去除率最终稳定在 $75.8\% \pm 0.9\%$ 和 $87.9\% \pm 1.0\%$. 在此基础上,将 nZVI 投加量增大一倍,反应器效能的变化与前一阶段相近,这意味着 DGS 对 nZVI 的胁迫作用表现出一定的抵抗力和适应性. 有报道表明,使用活性污泥处理低浓度含 Cu^{2+} ($10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 废水时,硝化菌活性也会出现类似的“抑制-恢复”过程^[18].

然而,当 $\text{nZVI} = 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,COD 和 NO_3^- -N 的去除率不再出现恢复过程,两者均值分别为 $62.1\% \pm 1.2\%$ 和 $72.6\% \pm 1.9\%$,且出水 NO_2^- -N 浓度小于

$5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在第 55 d,再次将进水 nZVI 浓度增大一倍. 运行 6 d 后,USB 对 COD、 NO_3^- -N 的去除率大幅降至 $23.3\% \pm 1.9\%$ 和 $20.3\% \pm 1.6\%$,仅相当于对照期的 27.6% 和 22.1% . 出水中极低的 NO_2^- -N 浓度 ($< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 也表明,反硝化过程 (NO_3^- -N $\longrightarrow$ NO_2^- -N $\longrightarrow$ N_2) 中更容易进行的 NO_3^- -N 还原反应受到了明显抑制^[17, 19]. 同期,反应器的 $\Delta C/\Delta N$ 值上升至 $4.7 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$,与以往批次实验的结果类似^[16].

为考察反应器效能的可恢复性,从第 65 d 起停止向进水中投加 nZVI. 经过 12 d 的快速上升过程,USB 对 COD、 NO_3^- -N 的去除率在第 77 ~ 85 d 稳定在 $83.2\% \pm 1.4\%$ 和 $90.4\% \pm 1.7\%$,出水 NO_2^- -N 浓度均值为 $8.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,已基本恢复至对照期的水平. 这表明在适宜条件下,nZVI 对 DGS 反硝化性能的抑制作用是可逆的.

2.2 污泥浓度与颗粒形态随 nZVI 浓度的变化

在运行期间,USB 内污泥浓度随进水 nZVI 浓度发生了显著变化,如图 3 所示. 在第 10 d ($nZVI = 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),反应器内 MLSS 浓度为 $27.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,污泥中活性组分比例 (MLVSS/MLSS 值) 约为 0.44. 由前文可知,当进水 nZVI 浓度低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,DGS 对 COD、 NO_3^- -N 去除率始终保持在较高水平,污泥呈现增殖趋势. 在第 44 d ($nZVI = 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),MLSS、MLVSS 浓度均达到运行期间的最高值,MLVSS/MLSS 值升至 0.49. 当进一步提高进水 nZVI 浓度时,污泥浓度与反应器效能同步降低. USB 内 $4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 的上升流速为颗粒污泥提供了较高的水力选择压. 在第 64 d ($nZVI = 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),MLSS 浓度仅相当于第 10 d 的 59.1%,MLVSS/MLSS 值降至 0.35. 此后,停止向进水中投加 nZVI,反应器处理效能逐渐恢复. 在第 85 d,MLSS 浓度和 MLVSS/MLSS 值分别回升至 $25.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.56.

由图 4(a) 可知,原始 DGS 呈乳白色,形态为规则的球形. 颗粒表面粗糙度较大,微生物以短杆菌和丝状菌为主,发达的孔隙结构是基质扩散和产气 (如 N_2) 释放的重要通道^[20]. 当进水 nZVI 浓度逐步提高至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,DGS 因表面吸附纳米颗粒而呈现棕黄色,如图 4(b),平均粒径 $2.1 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ 略大于接种污泥的 $1.9 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$. 同时,污泥表面菌体密度明显减少,丝状菌几乎绝迹. 在缺

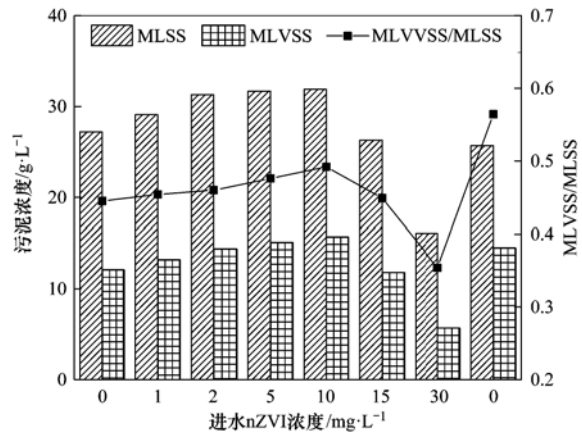


图 3 反应器内污泥浓度随进水 nZVI 浓度的变化过程

Fig. 3 Variation of biomass in the reactor at different influent nZVI concentrations

氧条件下,nZVI 表面腐蚀和氧化速率介于好氧与厌氧条件之间,更容易通过氧化还原反应,释放出活性氧 (ROS) 和大量铁离子,造成不可逆的细胞结构性损伤,因而表现出更强的杀菌效应^[2, 19, 21, 22]. 与短杆菌相比,丝状菌的比表面积更大,更容易与 nZVI 相接触而被杀灭.

随着与高浓度 nZVI 的持续接触,DGS 平均粒径明显减小 ($1.6 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$),部分颗粒颜色变为黑色,污泥表面结构变得松散,菌体高度聚集的情况基本消失,如图 4(c). 这与该阶段反应器效能大幅降低 (图 2)、污泥浓度明显减少 (图 3) 是一致的. 有研究表明,利用范德华力、表面基团络合和

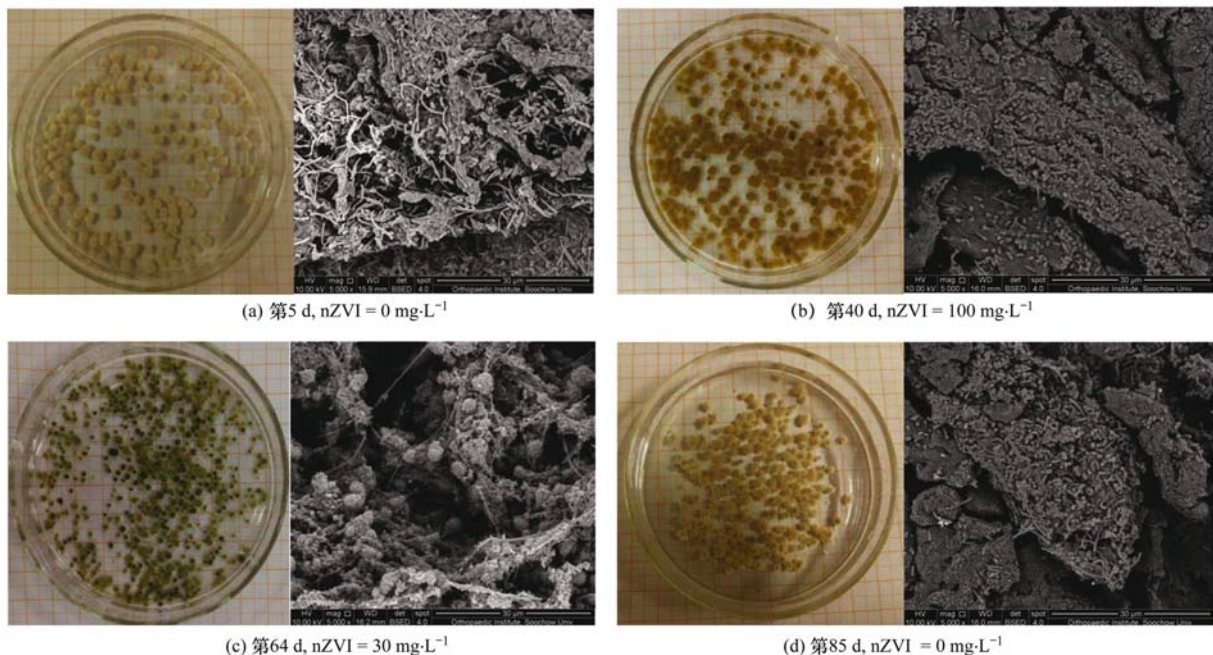


图 4 不同进水 nZVI 浓度下,DGS 的外观形态 (肉眼观察) 与表面 SEM 照片 ($\times 5000$ 倍)

Fig. 4 Morphological photos (naked eyes) and superficial SEM images ($\times 5000$ times) of the DGS at different influent nZVI concentrations

静电效应等途径,活性污泥能够快速捕集或吸附水中的纳米颗粒^[23]. 提高 nZVI 暴露浓度将促进其在污泥表面和孔道内的扩散、聚集和沉积,进而阻碍基质传递过程,并使得 nZVI 能更容易地进入到细胞内部,导致菌体损伤甚至死亡,从而造成污泥生物多样性的显著降低^[5,24]. 类似地,Wang 等发现^[25],高浓度 NaCl ($> 20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)、 Na_2SO_4 ($> 24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 Na_3PO_4 ($> 19 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 对 DGS 表现出明显的毒性. 大量无机离子不仅会使细胞周质中的多种还原酶失活,还能形成强静电力破坏细胞壁和细胞膜,导致 *Thauera*、*Hyphomicrobium* 等反硝化菌大量死亡.

如前所述,停止向进水中投加 nZVI 后,反应器效能和污泥浓度在 20 d 内基本恢复至对照期的水平. 如图 4d 所示,原先颗粒外缘被一层乳白色生物膜占据,平均粒径也增至 $1.8 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$,污泥表面重新出现短杆菌聚集的现象. 这意味着反硝化菌的快速增殖是 DGS 性能恢复的重要原因.

2.3 污泥反硝化特性与泥相总铁含量的相关性

依据 DGS 反硝化活性 μ 值(图 5)与泥相中总铁含量 q_m (图 6)的变化情况,可以对 nZVI 在连续流条件下的“剂量-效应”关系进行分析. 理论上,USB 为平推流式反应器,基质沿水流方向存在明显浓度梯度. 这使得在对照期内(第 10 d),USB 下端 DGS 的反硝化活性要略高于上端,两者的 μ 值均超过了 $20 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 有研究表明,少量 nZVI 或铁离子对部分氧化还原酶活性具有明显的刺激作用^[5,26]. 当进水 nZVI 浓度在 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,上、下端 DGS 的 μ 值均有所升高. 由于反应器下端污泥暴露于更高的 nZVI 浓度中,因此,其 q_m 含量明显

高于上端. 随进水 nZVI 浓度的提高,DGS 的 IR 值与泥相中 q_m 含量呈现明显正相关性. 当 $\text{nZVI} = 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,上、下端污泥的 IR 值均接近 70%,泥相中 q_m 含量达到了 DGS 最大吸附容量(Langmuir 等温方程, $q_{\max} = 12.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 的 65%^[16]. 此后,经过 20 d 的恢复运行,上、下端 DGS 的 IR 值分别降至 7.4% 和 6.6%, μ 值的相对大小与对照期类似. 结合图 3 中污泥浓度的变化可知,MLVSS 的显著增长是造成泥相中 q_m 含量大幅降低的主要原因. 反硝化菌在增殖过程中会分泌大量胞外聚合物(EPS),形成新的生物膜包裹原有颗粒,从而有效抑制了 nZVI 的反应活性^[3,27,28]. 此时,尽管泥相中 q_m 含量远高于对照期的水平,但 DGS 仍表现出较好的反硝化性能.

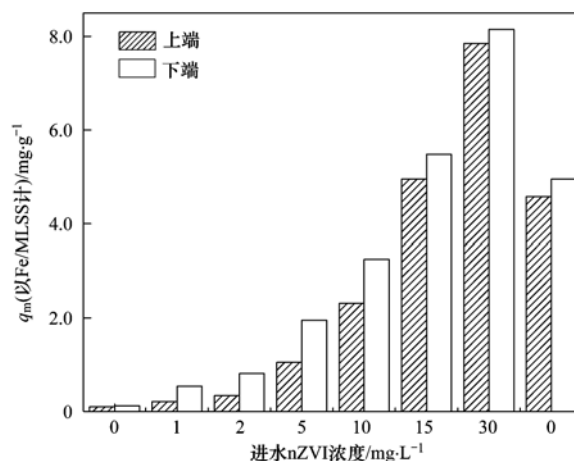


图 6 在反应器上、下端处,泥相中总铁含量随进水 nZVI 浓度的变化过程

Fig. 6 Variation of total iron contents in the sludge samples obtained from the top and bottom of the reactor at different influent nZVI concentrations

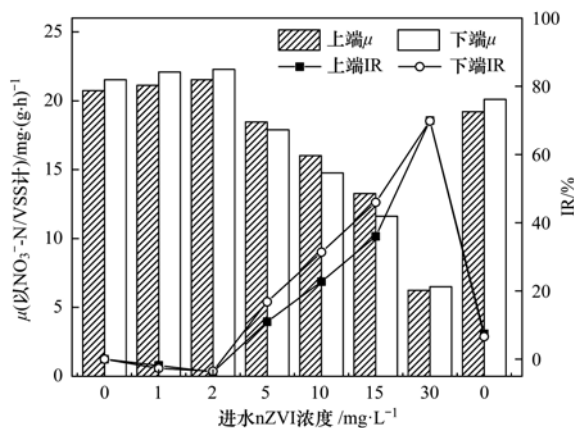


图 5 在反应器上、下端处,DGS 反硝化活性随进水 nZVI 浓度的变化过程

Fig. 5 Variation of denitrifying activities of the DGS obtained from the top and bottom of the reactor at different influent nZVI concentrations

3 结论

(1) 在对照期 ($\text{nZVI} = 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 内,USB 对 COD、 NO_3^- -N 去除率分别能达到约 84.5% 和 91.7%. DGS 呈乳白色的规则球形,表面有大量短杆菌和丝状菌聚集, μ 值可达 $20 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 以上.

(2) 尽管 DGS 对低浓度 nZVI ($< 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 生物抑制作用表现出一定的适应性,但随着进水 nZVI 浓度的提高,DGS 的 IR 值与泥相中 q_m 含量呈现出明显的正相关性. 当进水 nZVI 浓度增至 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,反应器内污泥浓度和颗粒尺寸显著减小,DGS 表面的微生物密度大幅降低,IR 值接近 70%.

(3) 停止投加 nZVI 后,反应器处理效能可在 20 d 内基本恢复至对照期水平. 异养菌在颗粒表面的快

速生长是降低泥相中 nZVI 生物抑制性和提高 DGS 反硝化活性的主要原因。

参考文献:

- [1] Fu F L, Dionysiou D D, Liu H. The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: a review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **267**: 194-205.
- [2] Crane R A, Scott T B. Nanoscale zero-valent iron: future prospects for an emerging water treatment technology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **211-212**: 112-125.
- [3] Brar S K, Verma M, Tyagi R D, *et al.* Engineered nanoparticles in wastewater and wastewater sludge—evidence and impacts[J]. *Waste Management*, 2010, **30**(3): 504-520.
- [4] Maurer-Jones M A, Gunsolus I L, Murphy C J, *et al.* Toxicity of engineered nanoparticles in the environment [J]. *Analytical Chemistry*, 2013, **85**(6): 3036-3049.
- [5] Wu D L, Shen Y H, Ding A Q, *et al.* Effects of nanoscale zero-valent iron particles on biological nitrogen and phosphorus removal and microorganisms in activated sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **262**: 649-655.
- [6] 刘小鹏, 钱飞跃, 王建芳, 等. nZVI 对亚硝化颗粒污泥性能的冲击性影响研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(5): 1622-1629.
Liu X P, Qian F Y, Wang J F, *et al.* The effect of nanoscale Zero-Valent Iron on the performance of nitrosation granular sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(5): 1622-1629.
- [7] 王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 等. 不同 C/N 条件下纳米零价铁对反硝化颗粒污泥性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(6): 2833-2839.
Wang F F, Qian F Y, Shen Y L, *et al.* Effects of nanoscale zero-valent iron on performance of denitrifying granular sludge at different C/N ratios [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(6): 2833-2839.
- [8] Hu Z Q, Chandran K, Grasso D, *et al.* Comparison of nitrification inhibition by metals in batch and continuous flow reactors[J]. *Water Research*, 2004, **38**(18): 3949-3959.
- [9] Franco A, Rocá E, Lema J M. Granulation in high-load denitrifying upflow sludge bed (USB) pulsed reactors[J]. *Water Research*, 2006, **40**(5): 871-880.
- [10] Pačúřová P, Galbová K, Drtil M, *et al.* Denitrification in USB reactor with granulated biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 150-156.
- [11] 厉巍, 郑平, 谢作甫, 等. 高效反硝化分段组合式反应器运行性能[J]. *化工学报*, 2013, **64**(4): 1276-1282.
Li W, Zheng P, Xie Z F, *et al.* Performance of high-rate denitrifying compartmentalized anoxic reactor [J]. *CIESC Journal*, 2013, **64**(4): 1276-1282.
- [12] Xu Y H, Zhao D Y. Reductive immobilization of chromate in water and soil using stabilized iron nanoparticles [J]. *Water Research*, 2007, **41**(10): 2101-2108.
- [13] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] Wu C Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal by granular sludge: from macro- to micro-scale[J]. *Water Research*, 2010, **44**(3): 807-814.
- [15] 马勇, 彭永臻. A/O 生物脱氮工艺的反硝化动力学试验[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(4): 464-468.
Ma Y, Peng Y Z. Denitrification dynamics for A/O biological nitrogen removal technology [J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(4): 464-468.
- [16] 王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 等. 反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1478-1484.
Wang F F, Qian F Y, Shen Y L, *et al.* Performance recoverability of denitrifying granular sludge under the stressing effect of nanoscale zero-valent iron [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1478-1484.
- [17] Lew B, Stief P, Beliaevski M, *et al.* Characterization of denitrifying granular sludge with and without the addition of external carbon source [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **124**: 413-420.
- [18] 张宏扬, 翟洪艳, 季民, 等. 铜离子的持续负荷对活性污泥生物硝化活性的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(3): 671-677.
Zhang H Y, Zhai H Y, Ji M, *et al.* Influence of Cu^{2+} sustained loads on bio-nitrification of activated sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 671-677.
- [19] 葛兴彬, 王振虹, 郭楚奇, 等. 纳米零价铁的生态毒性效应研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(3): 28-37.
Ge X B, Wang Z H, Guo C Q, *et al.* Review of the ecotoxicity of nanoscale zero-valent iron [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(3): 28-37.
- [20] Li W, Zheng P, Ji J Y, *et al.* Floatation of granular sludge and its mechanism: a key approach for high-rate denitrifying reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **152**: 414-419.
- [21] Gonzalez-Estrella J, Sierra-Alvarez R, Field J A. Toxicity assessment of inorganic nanoparticles to acetoclastic and hydrogenotrophic methanogenic activity in anaerobic granular sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **260**: 278-285.
- [22] 杨涛, 张静, 何帅, 等. 投加 FeSO_4 对序批式生物膜反应器中 DHA、EPS 和处理效果的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 2838-2843.
Yang T, Zhang J, He S, *et al.* Effects of ferrous sulfate (FeSO_4) on dehydrogenase activity (DHA), amount of extracellular polymeric substances (EPS) and the treatment efficiency in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 2838-2843.
- [23] Kiser M A, Ryu H, Jang H, *et al.* Biosorption of nanoparticles to heterotrophic wastewater biomass [J]. *Water Research*, 2010, **44**(14): 4105-4114.
- [24] Ma Y J, Metch J W, Vejerano E P, *et al.* Microbial community response of nitrifying sequencing batch reactors to silver, zero-valent iron, titanium dioxide and cerium dioxide nanomaterials [J]. *Water Research*, 2015, **68**: 87-97.
- [25] 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.
- [26] Ren L F, Ni S Q, Liu C, *et al.* Effect of zero-valent iron on the start-up performance of anaerobic ammonium oxidation (anammox) process [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(4): 2925-2934.
- [27] Liu Y J, Sun D D. Calcium augmentation for enhanced denitrifying granulation in sequencing batch reactors [J]. *Process Biochemistry*, 2011, **46**(4): 987-992.
- [28] Yue Z B, Li Q, Li C C, *et al.* Component analysis and heavy metal adsorption ability of extracellular polymeric substances (EPS) from sulfate reducing bacteria [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **194**: 399-402.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i>	(1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i>	(18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i>	(27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i>	(49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i>	(57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i>	(68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i>	(77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i>	(89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i>	(109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i>	(117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i>	(123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i>	(130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i>	(137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i>	(145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i>	(152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i>	(161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i>	(170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i>	(179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i>	(187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i>	(195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i>	(202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i>	(212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i>	(219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i>	(232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i>	(239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i>	(247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i>	(256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i>	(269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i>	(276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i>	(284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i>	(292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i>	(310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i>	(321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i>	(331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i>	(348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i>	(355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i>	(363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i>	(371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i>	(389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i>	(399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i>	(406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i>	(415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i>	(422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i>	(438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i>	(450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i>	(460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i>	(467)