

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响 ..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)

利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态 ..... 黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)

南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究 ..... 朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)

北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 ..... 苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)

重庆市主城区 PM<sub>2.5</sub>时空分布特征 ..... 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)

大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比 ..... 庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)

深圳市大气中全氟化合物的残留特征 ..... 何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)

北京上甸子站大气 CO<sub>2</sub> 及 δ<sup>13</sup>C(CO<sub>2</sub>) 本底变化 ..... 夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)

梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布 ..... 刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)

城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险 ..... 刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)

北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估 ..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)

西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析 ..... 王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)

PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究 ..... 刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)

海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价 ..... 张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)

曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究 ..... 薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)

滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源 ..... 李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)

江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价 ..... 李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)

城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究 ..... 刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)

我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 ..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)

额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征 ..... 韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)

太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析 ..... 冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)

铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征 ..... 程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)

基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究 ..... 马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)

重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算 ..... 张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)

山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 ..... 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)

伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡湖河道脱氮机制的影响 ..... 韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)

环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征 ..... 高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)

藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律 ..... 陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)

扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响 ..... 郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)

锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响 ..... 章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)

电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究 ..... 王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)

水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用 ..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)

多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除 ..... 乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)

污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析 ..... 牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)

高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析 ..... 李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)

连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制 ..... 吴鹏, 张诗颖, 宋吟吟, 徐乐中, 沈耀良 (1472)

反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复 ..... 王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)

低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响 ..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)

低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究 ..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)

短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 ..... 谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)

不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子 ..... 崔海, 张亚红 (1507)

塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性 ..... 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)

小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响 ..... 刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)

鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析 ..... 王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)

水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素 ..... 罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)

高温纤维素降解菌群筛选及产酶特性 ..... 冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)

基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发 ..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)

养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价 ..... 金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)

4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响 ..... 王兰君, 王金凤, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)

新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应 ..... 林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)

水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究 ..... 李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)

《环境科学》征订启事(1218) 《环境科学》征稿简则(1370) 信息(1352, 1412, 1498)

# 反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复

王翻翻<sup>1</sup>, 钱飞跃<sup>1,2,3\*</sup>, 沈耀良<sup>1,2,3</sup>, 王建芳<sup>1,2,3</sup>, 张月茹<sup>1</sup>, 刘郭洵<sup>1</sup>

(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. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

**摘要:** 为探明纳米零价铁(nZVI)对反硝化颗粒污泥(DGS)潜在的胁迫效应,本研究通过连续多批次实验,考察了经历nZVI短期冲击后,DGS反硝化活性在不同C/N比条件下的恢复情况。结果表明,当nZVI投加量高于 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,DGS比反硝化速率( $\mu$ )会出现下降,对应的比反硝化抑制率(IR)与基质C/N比、nZVI投加量呈现正相关。当nZVI投加量达到 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,胞外蛋白与多糖含量均明显降低。此时,充足的外加碳源( $\text{C/N}\geq 4$ )将有助于促进DGS反硝化活性的恢复和减少去除单位硝态氮所消耗的COD值。由Freundlich和Langmuir吸附等温线的拟合结果可知,基质C/N比越高,DGS对nZVI的吸附能力就越强。在恢复期内,泥相中总铁含量( $Q_e$ )的持续削减为高C/N比条件下,DGS反硝化活性的提升创造了有利条件。当 $Q_e$ 降至 $0.4\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下时, $\mu$ 值可达到或接近对照组的水平。

**关键词:** 反硝化颗粒污泥; 纳米零价铁; C/N比; 活性恢复; 吸附

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1478-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.04.037

## Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron

WANG Fan-fan<sup>1</sup>, QIAN Fei-yue<sup>1,2,3\*</sup>, SHEN Yao-liang<sup>1,2,3</sup>, WANG Jian-fang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yue-ru<sup>1</sup>, LIU Guo-xun<sup>1</sup>

(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 Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** To explore the potential stressing effect of nanoscale zero-valent iron (nZVI) on denitrifying granular sludge (DGS), the evolution of DGS denitrifying performance under different C/N ratios was investigated in this study, by carrying out batch tests of eight successive periods with the nZVI shock-loading. The results showed that the specific denitrification rate of  $\mu$  value decreased when the nZVI dosage was higher than  $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Meanwhile, a positive correlation between the inhibition ratio (IR) of  $\mu$  value and substrate C/N ratios or nZVI dosage was observed. When the nZVI dosage reached  $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , both extracellular protein and polysaccharides concentrations decreased obviously. It would be beneficial to promote the recovery of DGS denitrifying activity and reduce the COD demanding to remove unit mass of nitrate, by increasing external carbon source with C/N ratios of higher than 4. On the basis of Freundlich and Langmuir adsorption isotherms, when higher C/N ratio was provided, stronger bioadsorption of nZVI would be achieved. During the recovery period, a significant improvement of DGS denitrifying performance under the high C/N ratio was expected, due to the continuous washout of total iron in sludge phase ( $Q_e$ ), while the  $\mu$  value would reach or approach the one of the control group when  $Q_e$  was lower than  $0.4\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .

**Key words:** denitrifying granular sludge; nanoscale zero-valent iron; C/N ratio; activity recovery; adsorption

作为提升污水处理厂生物脱氮效能的重要途径之一,培养反应活性高、沉降性能好的反硝化颗粒污泥(DGS)已成为国内外研究者关注的热点。研究表明,DGS能在有机负荷和氮负荷分别为 $67.5\sim 200.0\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $19.1\sim 50.0\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 的条件下稳定运行,并获得90%~95%的有机物与硝态氮去除率,其污泥浓度可达传统活性污泥法的8~15倍,即 $17\sim 30\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ [1~3]。因此,基于该技术可以实现简化工艺流程、缩小反应器体积和提高出水水质等多重目标。

借助自身的强还原性( $E_0 = -0.44\text{ V}$ )和高可迁移性,纳米零价铁(nZVI)能够在特定条件下有效

去除硝基苯、含氯化合物、重金属离子、偶氮染料等难降解污染物,但其对微生物功能活性的抑制和对细胞结构的破坏作用也不容忽视[4~6]。目前,国内有关nZVI在污水生化处理系统中“剂量-效应”关系的报道还较少,针对反硝化颗粒污泥的影响研究更是从未被提及。

收稿日期: 2015-10-09; 修订日期: 2015-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308367); 江苏省高校自然科学基金项目(15KJB610013); 江苏高校优势学科建设工程项目; 苏州科技学院研究生创新工程项目(SKCX14-019); 江苏省高校大学生实践创新训练计划项目(201513985006Y)

作者简介: 王翻翻(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向废水处理理论与技术, E-mail:15601542925@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: feiyuehandler@163.com

为探明 nZVI 对 DGS 可能存在的胁迫效应,本研究采用连续多个周期的批次实验,系统考察了经历 nZVI 短期冲击后, DGS 反硝化活性在不同 C/N 比条件下的恢复情况,通过分析比反硝化速率( $\mu$ )、去除单位硝态氮所消耗的 COD 值( $\Delta C/\Delta N$  值)、胞外聚合物(EPS)组分和泥相中总铁含量( $Q_e$ )等参数,初步建立了 nZVI 投加量与 DGS 性能变化之间的相互关系,有助于优化新型反硝化系统的调控策略,提升运行稳定性。

## 1 材料与方 法

### 1.1 污泥的来源

以厌氧颗粒污泥为接种污泥,启动带内循环的上流式污泥床(USB),反应器高径比约为 9,有效体积为 3.5 L,上升流速控制为  $3.8 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 。进水碳源、氮源分别采用乙酸钠和硝酸钾,控制 COD/ $\text{NO}_3^-$ -N 比(C/N 比)为 4,污泥氮负荷为  $1.2 \text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ,硝态氮和 COD 去除率分别达到 95%~98%、85%~90%。反应器稳定运行 8 周后,获得成熟的反硝化颗粒污泥,呈淡黄色,粒径介于 1.25~2.5 mm,MLVSS/MLSS 为 0.42~0.45,沉降速率约为  $127 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ ,最大比反硝化速率( $\mu$ )在  $23.0\sim 27.1 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

### 1.2 nZVI 的制备

采用液相还原法制备 nZVI,即在氮气保护下,使用硼氢化钠( $\text{NaBH}_4$ )还原溶液中的三氯化铁( $\text{FeCl}_3$ )<sup>[7]</sup>。产品平均粒径约为 70 nm,经超纯水反复清洗后,保存于无水乙醇中。使用前,借助超声波制成 nZVI 悬浊液。

### 1.3 批次实验方法

污泥样品经 0.9% NaCl 溶液反复清洗后,分装于 100 mL 的具塞三角瓶中,注入 80 mL 反硝化基质,控制污泥浓度(MLVSS)为  $3\ 800\sim 4\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。基质溶液以乙酸钠为碳源,硝酸钾为氮源( $\text{NO}_3^-$ -N 浓度为  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),依次控制 C/N 比为 6、4、2 和 0,调节溶液 pH 至 7.0。

反硝化批次实验共连续进行 8 个周期。在第 1 周期的初始阶段,向不同 C/N 比的基质溶液中分别投加 0(对照组)、5、10、25 和  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 nZVI,密闭后置于  $25^\circ\text{C}$  下振荡( $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ )。反应 1 h 后,排出所有上清液并进行水质分析,再加入不含 nZVI 的基质溶液,重复上述过程,直至恢复期(第 2~8 周期)结束。每组反应条件设 3 个平行组。

### 1.4 主要分析方法

MLSS 和 MLVSS 的测定采用重量法; $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的测定分别采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法和紫外分光光度法;COD 测定采用快速消解分光光度法;EPS 提取采用甲醛-NaOH 法<sup>[8]</sup>;多糖(PS)的测定采用苯酚-硫酸法,以葡萄糖作为标准物质<sup>[9]</sup>;蛋白质(PN)的测定采用 Lowry 法,以牛血清蛋白作为标准物质<sup>[10]</sup>;采用混合酸(含硝酸、高氯酸)湿式消解法预处理水样和泥样<sup>[11]</sup>,采用岛津 AA-6300C 型原子吸收光谱仪测定两相中的总铁浓度,并扣除对照组的结果。

### 1.5 主要计算指标

比反硝化速率( $\mu$ )是表征 DGS 功能活性的重要指标。在计算  $\mu$  值时,需扣除亚硝态氮浓度的影响<sup>[12]</sup>,即:

$$\mu(\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}) = (\Delta c_{\text{NO}_3^-} + 0.6\Delta c_{\text{NO}_2^-}) / (\Delta t \cdot \text{MLVSS}) \quad (1)$$

式中, $c_{\text{NO}_3^-}$ 和  $c_{\text{NO}_2^-}$ 分别指反应时间  $\Delta t$  内,上清液中硝态氮、亚硝态氮的浓度变化, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;系数 0.6 表示还原 1 g  $\text{NO}_2^-$ -N 生成  $\text{N}_2$  与还原 0.6 g  $\text{NO}_3^-$ -N 生成  $\text{N}_2$  所需的电子供体量相同;MLVSS 为污泥浓度, $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $\Delta t$  为反应时间,取 1 h。

DGS 去除单位硝态氮消耗的 COD 值计为:

$$\Delta C/\Delta N = \Delta \text{COD} / (\Delta c_{\text{NO}_3^-} + 0.6\Delta c_{\text{NO}_2^-}) \quad (2)$$

nZVI 对 DGS 反硝化活性的抑制程度用比反硝化抑制率(IR)表示,如公式(3)所示:

$$\text{IR} = (\mu_0 - \mu_c) / \mu_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\mu_0$  为对照组的比反硝化速率, $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ;  $\mu_c$  是 nZVI 投加量  $c$  ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 对应的比反硝化速率, $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 DGS 反硝化活性的抑制与恢复

由图 1 可知,DGS 比反硝化速率( $\mu$ )随反应周期的变化与基质 C/N 比、nZVI 投加量均密切相关。

在第 1 周期内,C/N 比为 6、4、2 和 0 对应的  $\mu_0$  值分别达到 23.7、21.0、11.1 和  $4.3 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ,普遍高于 Lew 等<sup>[13]</sup>报道的  $17.9\sim 3.0 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ,这表明 DGS 具有优良的反硝化活性。以 C/N=6 为例,投加  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  nZVI 对应的  $\mu_5$  与  $\mu_0$  值差别很小,反应 1 h 后,硝态氮去除率接近 100%。而一次性投加 10、25 和  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 nZVI 时,DGS 比反硝化抑制率(IR)将分别达到 7.4%、

24.3% 和 56.7%。此外,IR 值与基质 C/N 比也呈现明显的正相关。当 C/N=4、2 和 0 时,投加 10~100 mg·L<sup>-1</sup> 的 nZVI 会使得 IR 值范围降至 5.2%~52.0%、4.5%~31.4% 和 3.5%~29.3%。

Lee 等<sup>[14]</sup>认为,在溶解氧充足的条件下,nZVI 表面会被迅速氧化或腐蚀,形成由铁氧化物包裹的大颗粒,释放出 Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>,导致反应活性的降低。Wu 等<sup>[15]</sup>的研究表明,当 nZVI 投加量达到 200

mg·L<sup>-1</sup>时,曝气池中活性污泥的种群丰度与 ATP 产量才会出现显著下降,脱氮、除碳性能受到严重影响。本研究中,nZVI 对 DGS 反硝化活性的抑制浓度要低得多。这是因为在缺氧或厌氧环境中,nZVI 的表面特性将得到有效保护,因而具有更强的生物毒性<sup>[14]</sup>。另外,DGS 是基于单一碳源培养形成的,其种群多样性势必低于普通活性污泥,这也使得前者对 nZVI 的耐受能力要更差<sup>[16]</sup>。

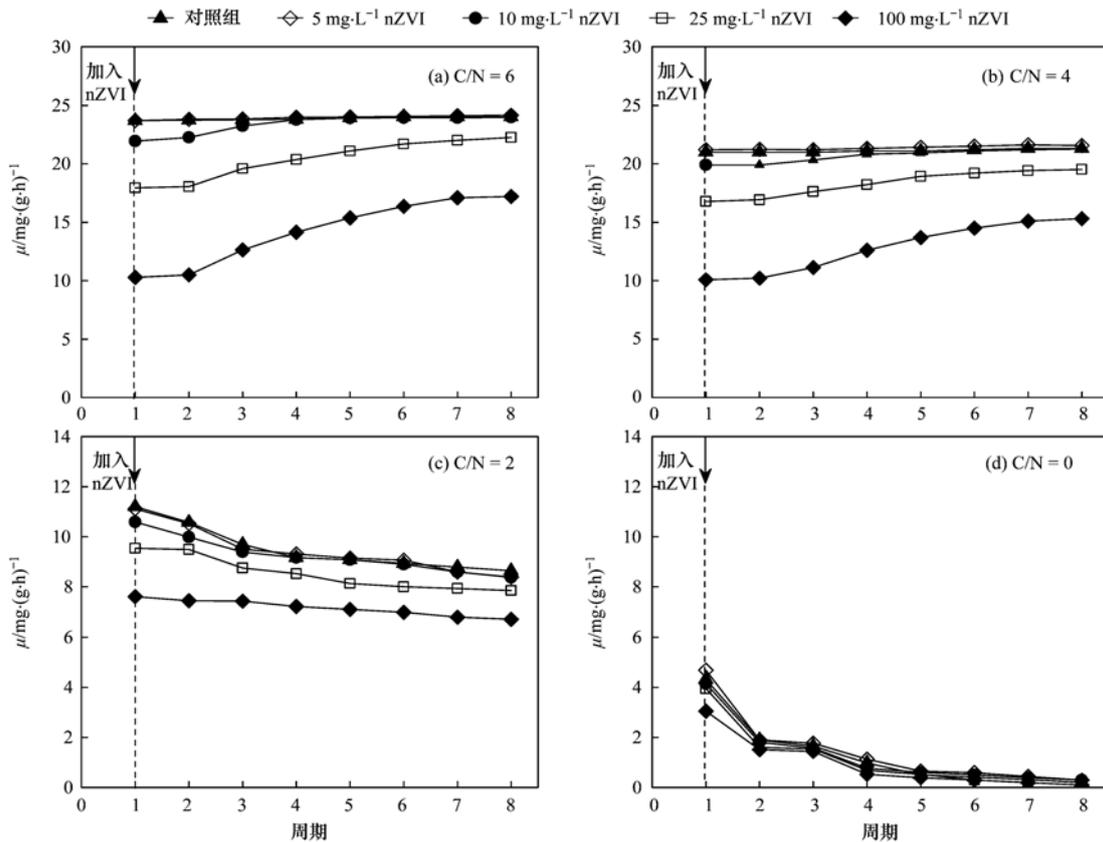


图 1 不同 C/N 比条件下,nZVI 投加量对 DGS 比反硝化速率变化的影响

Fig. 1 Effects of nZVI dosage on the special denitrifying rate of DGS under different C/N ratios

由  $\mu$  值在第 2~8 周期内的变化可知,更低的 nZVI 投加量和更高的基质 C/N 比均有利于 DGS 活性的恢复。当 C/N=6 时,经历 3 个周期的恢复,投加 10 mg·L<sup>-1</sup> nZVI 对应的  $\mu_{10}$  即可回升至  $\mu_0$  的水平。将 nZVI 投加量提高到 100 mg·L<sup>-1</sup>,经历 7 个周期的恢复,DGS 的反硝化活性仅相当于对照组的 73.4%。在贫营养条件下(C/N<4),DGS 的  $\mu$  值始终随反应周期呈现下降趋势。当 C/N=0 时,DGS 只能依靠内源物质或水解死亡细胞进行反硝化<sup>[13]</sup>。如图 1(d) 所示,投加不同浓度 nZVI 对  $\mu$  值的影响很小,过量的 nZVI 无法借助氧化还原反应增强系统对硝态氮的去除效能<sup>[17]</sup>。

理论上,以乙酸钠为碳源时,反硝化菌去除 1 g

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 需要消耗 4.85 g COD<sup>[18]</sup>。由图 2 可知,在第 1 周期内,随着基质 C/N 比的降低,DGS 去除单位硝态氮( $\Delta c_{\text{NO}_3^--\text{N}} + 0.6\Delta c_{\text{NO}_2^--\text{N}}$ )所消耗的有机物含量( $\Delta\text{COD}$ )逐渐减少,C/N=0 时,溶液中 COD 值低于检测限。由公式(2)计算得到,当 C/N 为 6、4 和 2 时,对照组的  $\Delta C/\Delta N$  值分别为 4.97、4.42 和 3.86。在不同 C/N 比条件下,当 nZVI 投加量超过 10 mg·L<sup>-1</sup> 时,DGS 反硝化过程的  $\Delta C/\Delta N$  值明显高于对照组。这是因为随着外界环境压力的增大,微生物生长代谢所需维持能 will 同步上升<sup>[19]</sup>。在恢复期内,借助基质溶液的稀释与洗脱作用,上清液逐渐澄清,nZVI 对反硝化菌的胁迫作用不断减弱。当 C/N  $\geq 4$ ,nZVI > 5 mg·L<sup>-1</sup> 时,随着 DGS 反硝化活性的恢

复,各周期  $\Delta C/\Delta N$  值呈缓慢下降的趋势. nZVI 的初始投加量越高, $\Delta C/\Delta N$  值的变化范围就越大. 反之,当外加碳源不足( $C/N=2$ )时,DGS 去除单位硝态氮消耗的 COD 值在第 2~8 周期内从 4.1~4.3 上升至 4.8~5.0.

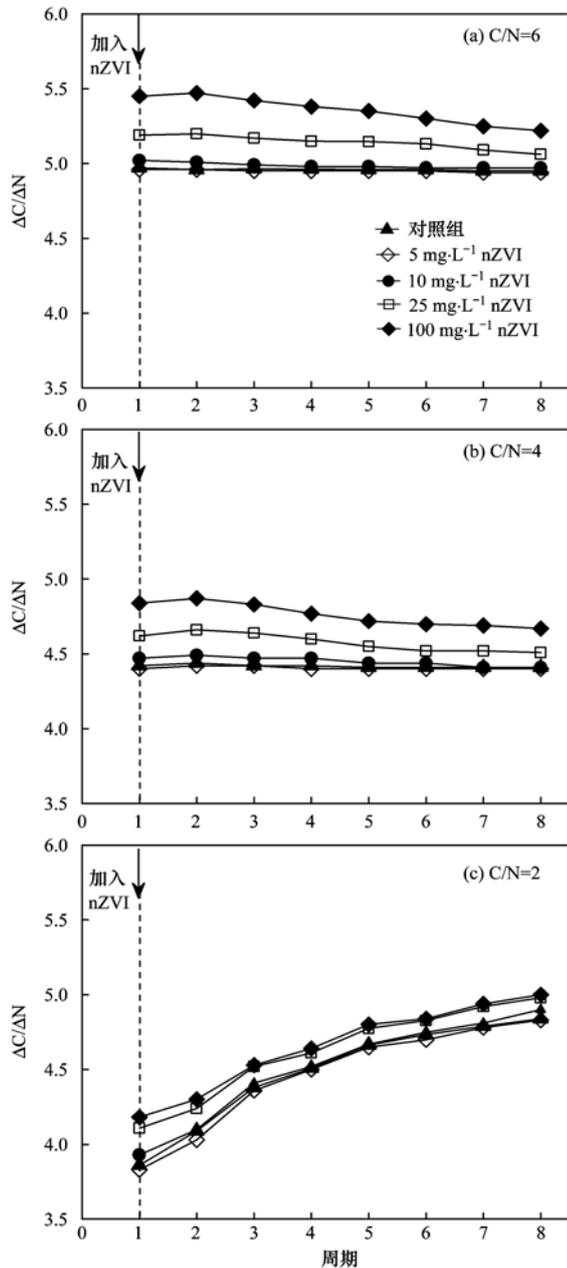


图2 不同 C/N 比条件下,nZVI 投加量对反硝化过程中  $\Delta C/\Delta N$  值的影响

Fig. 2 Effect of nZVI dosage on the  $\Delta C/\Delta N$  value during denitrification under different C/N ratios

## 2.2 恢复前后 EPS 的组成变化

胞外聚合物是由 *Flavobacteria*、*Zoogloea* 和 *Pseudomonas* 等特定菌属在特定环境压力下过量分泌的复杂高分子聚合物,其在维持颗粒结构稳定、

截留功能微生物和削弱毒物影响等方面发挥着重要作用<sup>[20]</sup>. 从化学组成上看,蛋白质(PN)和多糖(PS)通常可占到 EPS 总有机碳的 70% 以上<sup>[21]</sup>.

由图 3 可知,当  $C/N \geq 4$  时,DGS 在第 8 周期的 EPS 总量为  $51.3 \sim 66.8 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,明显高于第 1 周期的  $46.8 \sim 58.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,但 PN/PS 值始终保持在 1.4~1.6. EPS 中蛋白质与多糖含量的增多是微生物活性恢复与外源物质储存的有力证据<sup>[22,23]</sup>. 反之,当外加碳源不足( $C/N < 4$ )时,微生物将可利用 EPS 中的多糖组分,进行内源反硝化,使得 PN/PS 值上升至 2.1~2.3.

在不同 C/N 比条件下,EPS 中蛋白质与多糖含量随 nZVI 投加量的变化过程均非常类似. 由于毒物兴奋效应,少量 nZVI 可能会触发微生物的应激机制,增强酶系统活性,EPS 总量略微上升. 然而,高浓度 nZVI ( $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 会使得 PN 与 PS 组分明显减少,在一定程度上削弱了颗粒结构的稳定性,减缓了反硝化活性的恢复进程. 这主要是因为大量 nZVI 颗粒吸附于细胞膜表面能够显著增强后者的通透性,影响胞内氧化还原循环,导致活性氧簇(ROS)累积,并对 DNA 结构和酶系统造成氧化性损伤<sup>[15,24]</sup>.

## 2.3 nZVI 的生物吸附与洗脱

有研究表明,活性污泥可以通过表面沉积/聚集、胞外吸附等途径,快速去除水中的各类纳米颗粒<sup>[25]</sup>. 通过考察泥、水两相中总铁的分布变化,探究 nZVI 在 DGS 中的吸附与洗脱过程,将有助于更客观地阐述纳米材料的“剂量-效应”关系.

在本研究中,DGS 对 nZVI 的吸附速率很快. 接触 20 min 后,水相中总铁浓度的变化小于 5%,反应 1 h 后,可近似认为已达到吸附平衡. 采用 Freundlich 和 Langmuir 等温方程均能很好地拟合该生物吸附过程( $R^2 > 0.941$ ),如图 4 所示.

Freundlich 等温方程线性式:

$$\lg Q_e = \lg K_f + 1/n \times \lg C_e \quad (4)$$

Langmuir 等温方程线性式:

$$C_e/Q_e = 1/(Q_{\max} \cdot b) + C_e/Q_{\max} \quad (5)$$

式中, $Q_e$  为泥相中总铁含量,即单位质量污泥的吸附量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $K_f$  为 Freundlich 容量系数,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $1/n$  为 Freundlich 强度系数;  $C_e$  为(近似)吸附平衡时,水相中的总铁浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $Q_{\max}$  为污泥最大吸附量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $b$  为 Langmuir 常数,  $\text{mg}^{-1}$ <sup>[26]</sup>. 各参数取值见表 1.

有研究者认为,活性污泥等生物聚集体对纳米颗粒的吸附机制非常复杂,包含范德华力、表面静

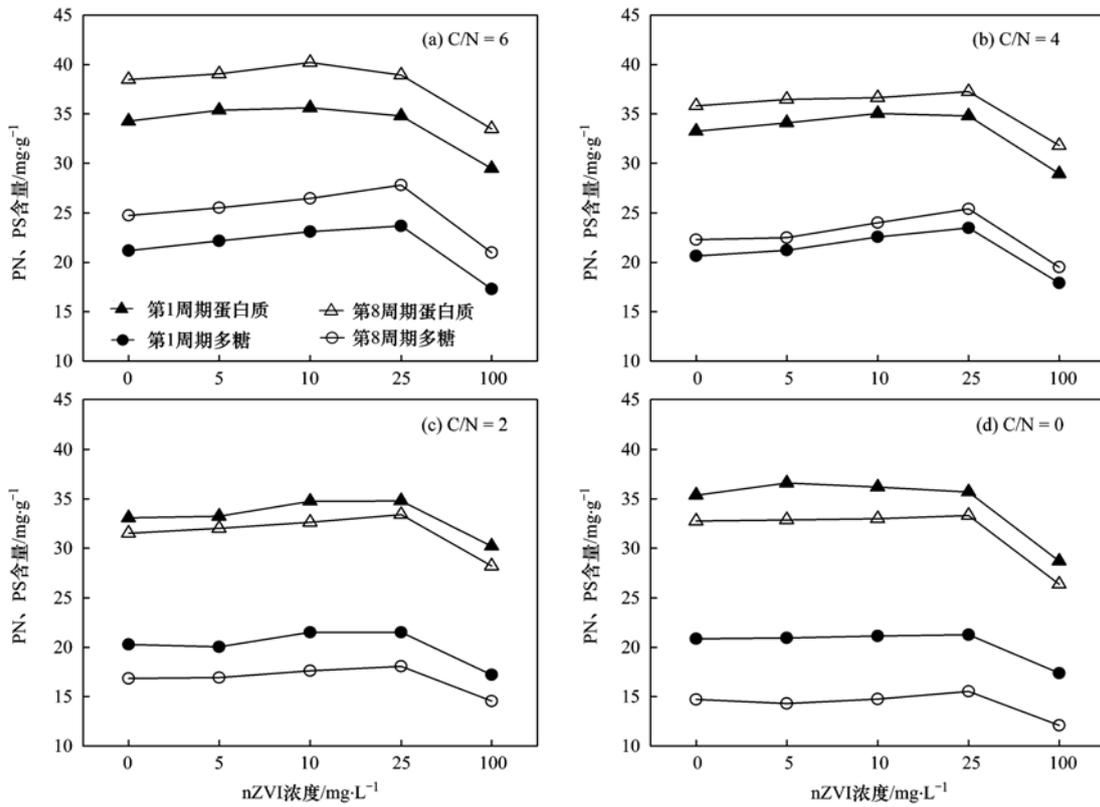


图3 不同 C/N 比条件下, EPS 中蛋白质与多糖含量随 nZVI 投加量的变化

Fig. 3 Variation of protein and polysaccharides concentrations of EPS with nZVI dosage under different C/N ratios

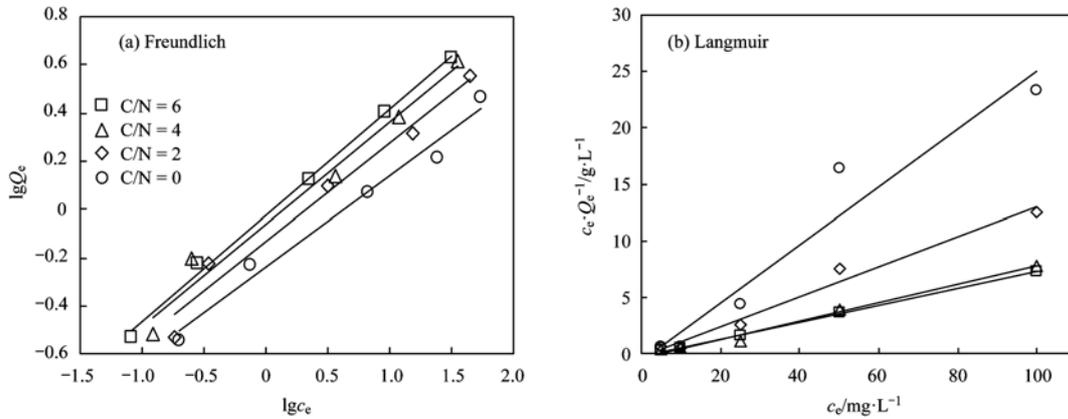


图4 不同 C/N 比条件下, DGS 对 nZVI 的吸附等温线

Fig. 4 Biosorption isotherms of nZVI by DGS under different C/N ratios

表1 不同 C/N 条件下, DGS 等温吸附方程中的参数值

Table 1 Biosorption parameters of nZVI by DGS under different C/N ratios

C/N	Freundlich 模型			Langmuir 模型		
	$K_f$	$n$	$R^2$	$Q_{max}$	$b$	$R^2$
6	0.958	2.280	0.997	13.21	-0.367	0.994
4	0.879	2.370	0.977	12.35	-0.244	0.989
2	0.739	2.446	0.971	7.56	-0.471	0.981
0	0.575	2.645	0.979	3.90	-0.386	0.941

电和官能团作用等<sup>[27]</sup>. 在本研究中, nZVI 的投加量越高, 泥相中总铁含量 ( $Q_e$ ) 就越大. 随着基质 C/N

比的降低, Freundlich 等温线的斜率 ( $1/n$ ) 与容量系数 ( $K_f$ ) 逐渐减小. 这意味着在外加碳源充足的条件

下, nZVI 更容易被 DGS 吸附, 进而导致更强的生物胁迫效应. 由 Langmuir 等温方程的拟合结果可知,  $C/N = 6$  对应的污泥最大吸附量 ( $Q_{\max}$ ) 约为  $C/N = 0$  时的 3.4 倍.

在恢复期内, 借助溶液的稀释与洗脱作用, 泥相中总铁含量 ( $Q_e$ ) 随反应周期逐渐降低, 基质  $C/N$  比对洗脱过程的影响较小. 由图 5 可知, 当 nZVI 投加量由  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  提高到  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 反应 7 个周期后,  $Q_e$  的降幅从  $0.13 \sim 0.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  升至  $1.13 \sim 1.47 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 洗脱率从  $46.3 \sim 47.5\%$  降至  $32.8 \sim 38.9\%$ .

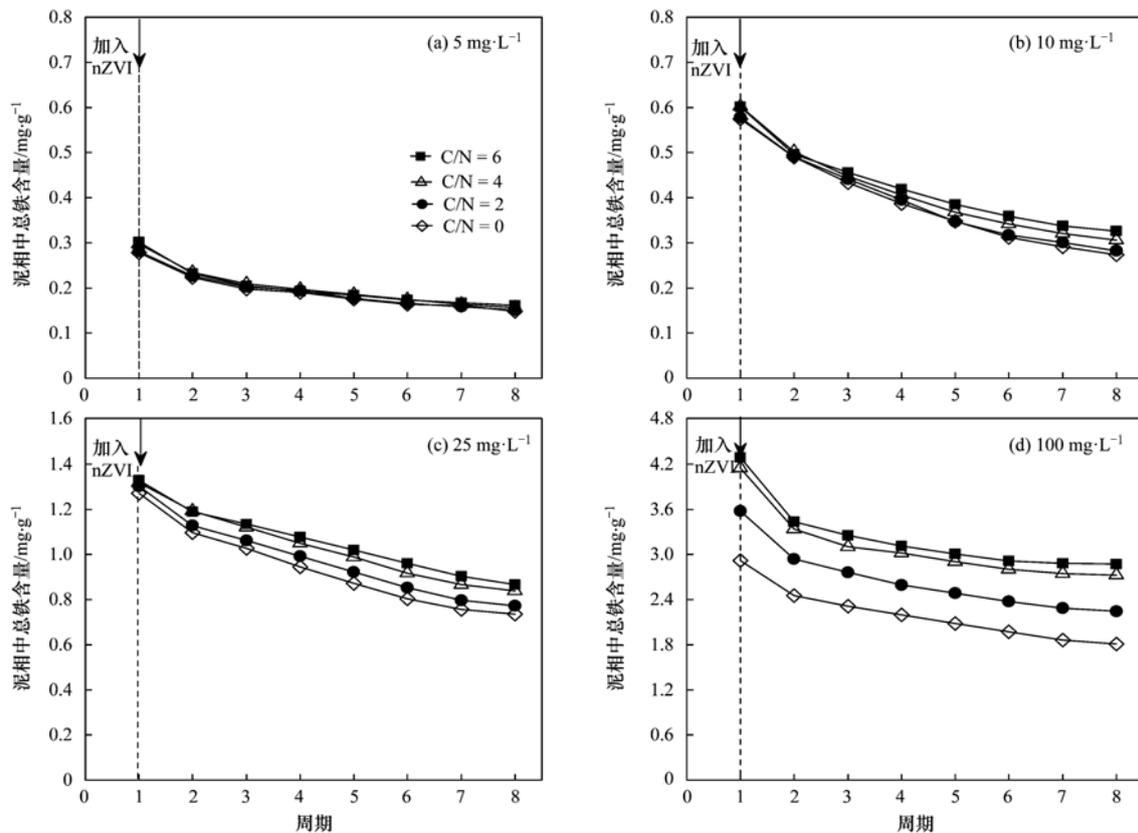


图 5 不同 nZVI 投加量条件下, 泥相中总铁含量随反应周期的变化曲线

Fig. 5 Variation of total iron concentration in DGS with reaction period under different nZVI dosages

### 3 结论

(1) 在反硝化体系中, 当 nZVI 投加量大于  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, DGS 活性将受到明显抑制, 比反硝化抑制率 (IR) 与基质  $C/N$  比、nZVI 投加量呈现正相关. 但即使投加  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 nZVI, IR 值超过 50%, 充足的外加碳源 ( $C/N \geq 4$ ) 仍可有效促进 DGS 反硝化活性的恢复.

(2) 当  $C/N \geq 4$  时, 随着 DGS 反硝化活性的逐步恢复,  $\Delta C/\Delta N$  值缓慢下降, EPS 中蛋白质与多糖

结合图 1 和图 5 可知, 当泥相中总铁含量降至  $0.4 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  以下时, DGS 的反硝化活性可以达到或接近对照组的水平. 例如, 在  $C/N \geq 4$  的条件下, nZVI 投加量为  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  对应的第 1 ~ 8 周期和 nZVI 投加量为  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  对应的第 4 ~ 8 周期. 对于更高的 nZVI 投加量 ( $\geq 25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 而言, 泥相中总铁含量的持续削减也为高  $C/N$  比条件下, DGS 反硝化活性的恢复创造了有利条件. 例如, 当  $C/N = 6$ 、nZVI =  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,  $Q_e$  在第 2 周期内下降了约  $0.86 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 占到整个恢复期降幅的 57%, 随后 DGS 的  $\mu$  值进入快速上升阶段.

含量均有所提高. 反之, 当碳源不足时, DGS 的  $\mu$  值持续下降, EPS 中多糖组分被大量消耗, PN/PS 值从  $1.4 \sim 1.6$  升至  $2.1 \sim 2.3$ . 在所有  $C/N$  比条件下, 投加  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 nZVI 都会导致 EPS 总量的明显减少. 这在一定程度上削弱了颗粒结构的稳定性, 减缓了反硝化活性的恢复进程.

(3) 采用 Freundlich 和 Langmuir 等温方程均能很好地拟合 DGS 对 nZVI 的吸附过程 ( $R^2 > 0.941$ ). 基质  $C/N$  比越高, 污泥最大吸附量 ( $Q_{\max}$ ) 就越大. 在恢复期内, 泥相中总铁含量的持续削减为高  $C/N$

比条件下, DGS 反硝化活性的提升创造了有利条件。当  $Q_e$  降至  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  以下时,  $\mu$  值可达到或接近对照组的水平。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Pagáčová P, Galbová K, Drtil M, *et al.* Denitrification in USB reactor with granulated biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 150-156.
- [ 2 ] Bhuvanesh S, Maneesh N, Sreekrishnan T R. Start-up and performance of a hybrid anoxic reactor for biological denitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **129**: 78-84.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] Yang Y, Guo J L, Hu Z Q. Impact of nano zero valent iron (NZVI) on methanogenic activity and population dynamics in anaerobic digestion[J]. *Water Research*, 2013, **47**(17): 6790-6800.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Adav S S, Lee D J. Characterization of extracellular polymeric substances (EPS) from phenol degrading aerobic granules[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2011, **42**(4): 645-651.
- [ 9 ] Luo J H, Hao T W, Wei L, *et al.* Impact of influent COD/N ratio on disintegration of aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2014, **62**: 127-135.
- [ 10 ] Adav S S, Lee D J. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 1120-1126.
- [ 11 ] 郭小春. 纳米氧化物在污水中的特性及其对 SBR 系统影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Lew B, Stief P, Beliafski M, *et al.* Characterization of denitrifying granular sludge with and without the addition of external carbon source[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **124**: 413-420.
- [ 14 ] Lee C H, Kim J Y, Lee W I, *et al.* Bactericidal effect of zero-valent iron nanoparticles on *Escherichia coli*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(13): 4927-4933.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] Barnes R J, van der Gast C J, Riba O, *et al.* The impact of zero-valent iron nanoparticles on a river water bacterial community [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **184**(1-3): 73-80.
- [ 17 ] 王梦月, 马鲁铭. 催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2633-2638.
- [ 18 ] Elefsiniotis P, Wareham D G. Utilization patterns of volatile fatty acids in the denitrification reaction [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, **41**(1-2): 92-97.
- [ 19 ] Bernat K, Wojnowska-Baryla I. Carbon source in aerobic denitrification[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, **36**(2): 116-122.
- [ 20 ] Li A J, Yang S F, Li X Y, *et al.* Microbial population dynamics during aerobic sludge granulation at different organic loading rates [J]. *Water Research*, 2008, **42**(13): 3552-3560.
- [ 21 ] 钱飞跃, 王琰, 王建芳, 等. 好氧颗粒污泥中凝胶型聚多糖的特性研究进展[J]. *化学通报*, 2015, **78**(4): 320-324.
- [ 22 ] Li A J, Li X Y, Yu H Q. Effect of the food-to-microorganism (F/M) ratio on the formation and size of aerobic sludge granules [J]. *Process Biochemistry*, 2011, **46**(12): 2269-2276.
- [ 23 ] Ye F X, Ye Y F, Li Y. Effect of C/N ratio on extracellular polymeric substances (EPS) and physicochemical properties of activated sludge flocs [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **188**(1-3): 37-43.
- [ 24 ] Ševců A, El-Temsah Y S, Joner E J, *et al.* Oxidative stress induced in microorganisms by zero-valent iron nanoparticles [J]. *Microbes and Environments*, 2011, **26**(4): 271-281.
- [ 25 ] Kiser M A, Ryu H, Jang H, *et al.* Biosorption of nanoparticles to heterotrophic wastewater biomass [J]. *Water Research*, 2010, **44**(14): 4105-4114.
- [ 26 ] Wu Y H, Zhou J X, Wen Y J, *et al.* Biosorption of heavy metal ions ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , and  $\text{Fe}^{3+}$ ) from aqueous solutions using activated sludge: comparison of aerobic activated sludge with anaerobic activated sludge [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology. Part A: Enzyme Engineering and Biotechnology*, 2012, **168**(8): 2079-2093.
- [ 27 ] Gómez-Rivera F, Field J A, Brown D, *et al.* Fate of cerium dioxide ( $\text{CeO}_2$ ) nanoparticles in municipal wastewater during activated sludge treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **108**: 300-304.

## CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013 .....	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer .....	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing .....	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing .....	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Chongqing Urban Areas .....	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles .....	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen .....	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO <sub>2</sub> and δ <sup>13</sup> C(CO <sub>2</sub> ) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China .....	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period .....	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water .....	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing .....	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-yang, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China .....	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS .....	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island .....	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility .....	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan .....	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province .....	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City .....	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China .....	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang .....	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan .....	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City .....	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments .....	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing .....	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China .....	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea natallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay .....	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu .....	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae .....	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus .....	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water .....	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process .....	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide .....	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing .....	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants .....	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor .....	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron .....	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter .....	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source .....	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System .....	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppe .....	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin .....	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution .....	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots .....	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors .....	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains .....	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis .....	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock .....	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic .....	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles .....	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration .....	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行