

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

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

2010~2015年我国水泥工业 NO _x 排放清单及排放特征	蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)
兰州市煅烧污染物排放清单及其对 PM _{2.5} 浓度贡献	郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)
北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)
郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)
菏泽市冬季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的昼夜变化特征	孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)
我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征	温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)
嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单	郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)
上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险	盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)
SBR 工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征	杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)
太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应	石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)
巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析	胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)
蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响	彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)
三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响	陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)
纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响	白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)
澜沧江流域水体悬浮颗粒物 δ ¹⁵ N 空间差异及成因分析	唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)
潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律	耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)
蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素	张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)
典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算	熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)
农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响	李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)
城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征	刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)
不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响	葛德, 张守红 (5015)
四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用	王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)
厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用	卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)
光助-二茂铁/H ₂ O ₂ 非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶	张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)
基于同位素技术的短程硝化过程 N ₂ O 产生途径	杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)
基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响	安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)
厌氧/好氧 SPNDPR 系统实现低 C/N 城市污水同步脱氮除磷的优化运行	于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)
污水处理厂 SNAD 工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)
盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学	唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)
中试 ANAMMOX-ASBR 处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性	张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)
碳氮比对颗粒污泥 CANON 反应器脱氮性能和 N ₂ O 释放的冲击影响	付昆明, 姜娜, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)
污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析	房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)
重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析	伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)
韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布	刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)
有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源	杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)
纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α-HCH	姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)
株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征	申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)
生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响	王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)
生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响	俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)
颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响	郭毅轩, 赵秀兰 (5180)
施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响	曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)
不同水稻品种对重金属的积累特性	林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄欠如 (5198)
芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤	曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)
三峡库区典型河流水-气界面 CO ₂ 通量日变化观测及其影响因素分析	罗佳宸, 李思悦 (5217)
富营养化湖区 CH ₄ 排放特征及其影响因素	商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)
短期放牧对半干旱草地生态系统 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)
覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响	罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)
臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 影响的研究进展	冯兆忠, 袁相洋 (5257)
地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展	杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)
污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素	张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)
《环境科学》征订启事 (4848) 《环境科学》征稿简则 (4990) 信息 (5188, 5216, 5236)	

纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响

白洁^{1,2}, 田延昭¹, 孙鹏飞¹, 白晓岩³, 李岿然^{3*}, 赵阳国^{1,2}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100; 3. 中国海洋大学海洋生命学院, 青岛 266003)

摘要: 在胶州湾西北部海区和大连河河口区选择 S 站和 E 站 2 个研究站位, 现场采样带回实验室进行模拟培养, 研究纳米银对沉积物反硝化能力、反硝化酶活性及功能基因丰度的影响。将不同剂量(0、135、1 350 mg·L⁻¹)的纳米银添加至由表层沉积物和原位底层海水组成的培养体系中培养 6 d, 测定其不同时间内 NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 含量、NO₃⁻ 还原酶和 NO₂⁻ 还原酶活性、反硝化功能基因 *narG* 和 *nirS* 相对丰度的变化, 探讨纳米银对不同区域沉积物反硝化过程的影响和可能的作用途径。结果表明, 纳米银胁迫对 2 个站位沉积物 NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 的还原能力、NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 还原酶活性及 *narG* 和 *nirS* 的基因丰度均具有明显的抑制效应, 纳米银浓度越高, 抑制程度越强, 并会导致 NO₂⁻ 累积量的增加; 纳米银对 NO₂⁻ 还原酶的抑制程度明显大于 NO₃⁻ 还原酶, 对功能基因 *nirS* 的抑制程度明显大于 *narG*; 纳米银胁迫对 NO₃⁻ 还原过程的影响主要通过对功能基因的抑制作用, 而对 NO₂⁻ 还原过程的影响主要是通过对还原酶活性的抑制作用; 纳米银对胶州湾西北部海域反硝化能力、NO₃⁻ 还原酶和基因丰度的抑制程度大于大连河河口区。

关键词: 胶州湾; 纳米银; 反硝化作用; 酶活性; 基因丰度

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-4956-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803002

Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagou River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay

BAI Jie^{1,2}, TIAN Yan-zhao¹, SUN Peng-fei¹, BAI Xiao-yan³, LI Kui-ran^{3*}, ZHAO Yang-guo^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 3. College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: The influence of silver nanoparticles (AgNPs) on the denitrification performance, enzyme activity, and functional gene relative abundances of sediment was investigated based on the methods of laboratory simulation incubation in the Dagou River estuary and bay area in the northwest of Jiaozhou Bay. The different dosages of AgNPs (i.e., 0, 135, and 1 350 mg·L⁻¹ in final concentration) was added to the incubation system containing surface sediments and in-situ bottom water. During six days' incubation, the concentrations of NO₃⁻ and NO₂⁻, NO₃⁻ and NO₂⁻ reductases activity, and relative abundances of *narG* and *nirS* genes were measured to explore the effects of AgNPs on denitrification and its mechanism. The results showed that AgNPs significantly inhibited NO₃⁻ and NO₂⁻ reductive capacity, NO₃⁻ and NO₂⁻ reductase activity, and *narG* and *nirS* gene relative abundances, which led to aggravated accumulation of NO₂⁻. The inhibition of NO₂⁻ reductase was significantly greater than that of NO₃⁻ reductase, and the inhibition of the *nirS* gene was significantly higher than that of the *narG* gene. The inhibition of NO₃⁻ reduction was mainly ascribed to the inhibition of functional genes, but the inhibition of NO₂⁻ reduction was mainly due to the inhibition of reductase activity. The inhibition of NO₃⁻ and NO₂⁻ reductive capacity, NO₃⁻ reductase activity, and *narG* and *nirS* gene relative abundances in the northwest of Jiaozhou Bay was significantly higher than that in the Dagou River estuary.

Key words: Jiaozhou Bay; silver nanoparticles; denitrification; reductase activity; gene abundances

纳米材料是指在三维空间上至少有一维处于纳米级范围或者由纳米级元件构成的材料。由于其具有尺寸小和比表面积大等特点, 使纳米材料表现出尺寸效应、表面效应^[1]等特殊性能。纳米银作为一种金属纳米材料, 由于具有非线性光学特性、导热导电性、催化特性以及抗菌性等被广泛应用于传统行业和新兴领域^[1~4]。随着纳米银的大量使用, 部

分纳米银通过不同方式进入河流, 经过河口区最终汇聚到海湾^[5]。纳米银会释放出银离子, 纳米银颗

收稿日期: 2018-03-01; 修订日期: 2018-04-19

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07202-007)

作者简介: 白洁(1962~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋微生物生态及滨海湿地水体污染控制与生态修复, E-mail: baijie@ouc.edu.cn

* 通信作者, E-mail: likr@ouc.edu.cn

粒和银离子因静电吸引在细胞膜周围聚集并吸附其上^[6, 7]，与细胞膜发生作用，影响细胞膜的完整性和流动性^[8]；同时纳米银进入细菌体内还会通过阻断菌体内的电子传输系统增强细菌 DNA 的稳定性，使 DNA 失去复制能力^[9]；此外纳米银和银离子会与酶中的硫、氧和氮等电子供体结合、替换酶中金属离子甚至改变酶的三维构象，致使酶活性钝化甚至失活^[9]。因此，纳米银进入河口区后，会在一定程度上改变河口和海湾微生物丰度和群落结构，对生态系统的结构和功能产生影响^[9, 10]。

反硝化作用是指在厌氧条件下反硝化菌将 NO_3^- 还原成 N_2 的过程，是氮循环过程中不可缺少的关键环节，其中 NO_3^- 还原成 NO_2^- 和 NO_2^- 还原成气态氮的过程分别由 NO_3^- 和 NO_2^- 还原酶催化，功能基因 *narG* 和 *nirS* 分别编码 NO_3^- 和 NO_2^- 还原酶的催化中心^[11]。VandeVoort 等^[12]对土壤 NO_3^- 还原过程的研究发现，纳米银颗粒 (AgNPs) 会显著抑制 NO_3^- 还原的速率，抑制程度与加入的 AgNPs 浓度有关。Bao 等^[11]对河流沉积物酶活性的研究发现，加入 AgNPs 后，脲酶活性受到了显著抑制。Xiong 等^[13]对河口沉积物反硝化作用的研究发现，纳米氧化铜颗粒 (CuONPs) 对 NO_3^- 还原和 NO_2^- 还原都具有明显的抑制效应，CuONPs 的加入导致了 NO_2^- 的累积，还会明显抑制 NO_3^- 还原酶和 NO_2^- 还原酶的活性。Hou 等^[14]研究了 CuONPs 对 NO_3^- 还原的影响，发现 CuONPs 显著降低了 *nirS* 的丰度，表明 CuONPs 会降低 NO_3^- 还原菌的数量。

由于表层沉积物往往同时伴随低氧、高碳氮含量，并存在明显的有氧-厌氧界面，所以表层沉积物是反硝化发生的重要源区^[15]。纳米银会对沉积物反硝化过程产生影响，进而改变生态系统的生命活动和氮的生物地球化学循环。目前关于纳米银对反硝化作用影响的研究大多局限于单菌株和污水处理系统^[16, 17]，而纳米银对实际环境中沉积物反硝化作用影响的相关研究较少。胶州湾是半封闭浅海湾，沿岸经济发达，是一个受人类活动影响较大的典型海湾，因此探讨纳米银对胶州湾河口区和湾内沉积物反硝化作用的影响具有重要意义。本研究通过现场采样带回实验室模拟培养，分析不同浓度纳米银对胶州湾西北部海区 S 站和大沽河河口区 E 站沉积物 NO_3^- 和 NO_2^- 还原能力、反硝化酶活性及功能基因 *narG* 和 *nirS* 丰度的影响，以期为深入探讨纳米银对近海沉积环境的生态影响机制及环境效

应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验用纳米银及预处理

纳米银购自 SIGMA-ALDRICH®，粒径 < 100 nm，银纯度 > 99.5%。纳米银溶液现用现配，为了防止聚集，使用前在冰浴条件下，超声波 (230 V，50 kHz) 超声 30 min。

1.2 现场样品采样与预处理

本研究所用沉积物样品于 2017 年 7 月采自胶州湾西北部海区的 E 站 (36.168 8°N, 120.136 5°E) 和大沽河河口区的 S 站 (36.126 9°N, 120.183 8°E)，采样站位见图 1。采用彼得森采泥器采集 0~5 cm 表层沉积物样品于无菌塑料袋中密封，用无菌聚乙烯塑料瓶采集底层海水；采用 YSI6600 多参数水质仪现场测定 pH、盐度等环境参数，并采集部分沉积物样和水样用于测定其它环境指标。所有样品低温保存立即带回实验室。采集的沉积物样品充分混匀后过 1 mm 标准筛，水样用 0.22 μm 无菌醋酸纤维膜过滤，用于实验室模拟培养。2 个站位水体和沉积物的主要环境参数见表 1。

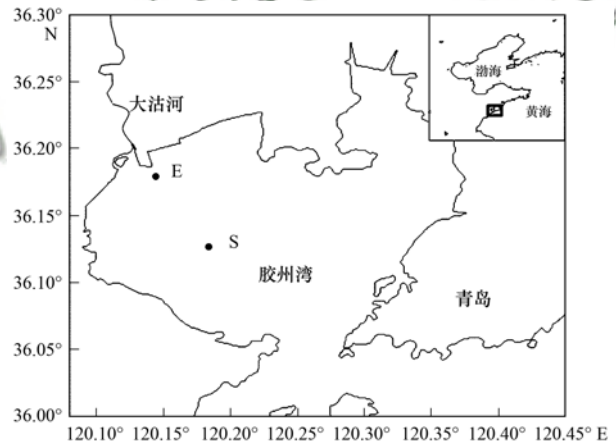


图 1 采样站位示意

Fig. 1 Sampling stations

表 1 各采样点水体和沉积物的主要环境参数

Table 1 Initial environmental factors at the stations

项目	E 站	S 站
pH	7.51	8.07
盐度	22.1	31.7
$\text{NO}_3^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.466	0.431
$\text{NO}_2^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.031	0.029
$\text{NH}_4^+/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.263	0.211
沉积物类型	粉砂质砂	砂质粉砂
沉积物含水率/%	33.10	34.70

1.3 实验室模拟培养与样品采集

各站位实验室模拟培养分别设置 1 个对照组和 2 个不同浓度的纳米银处理组, C 组为对照组(0 mg·L⁻¹)、L 组为低纳米银组(135 mg·L⁻¹)、H 组为高纳米银组(1 350 mg·L⁻¹), 各组均设 3 个重复实验组。

在经 0.22 μm 滤膜过滤的原位海水中加入 C₆H₁₂O₆ 和 KNO₃, 使终质量分数和浓度分别为 1% 和 50 mmol·L⁻¹; 将纳米银溶解在上述原位海水中, 搅拌均匀并 4℃ 超声 30 min, 配制成纳米银质量浓度为 0、135、1 350 mg·L⁻¹ 的培养液, 各取 60 mL 分别置于 250 mL 培养瓶中, 分别取 60 g 过筛处理后的沉积物于各培养瓶, 混匀。所有培养瓶均通氮气 20 min, 使培养环境处于厌氧状态下密封。培养瓶置于 80 r·min⁻¹ 的恒温振荡器中 25℃ 避光培养 6 d, 分别在培养第 0、2、4、6 d 于各组培养体系取样, 用于测定 NO₃⁻、NO₂⁻ 浓度及酶活性和功能基因丰度。

1.4 样品测定

硝酸盐(NO₃⁻)和亚硝酸盐(NO₂⁻): 采用 QuAAtro 营养盐自动分析仪测定; 沉积物类型: 采用激光粒度仪^[18]测定; 含水率: 采用重量法测定。

NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 还原酶活性: 于培养瓶中均匀取泥水混合物样品 5 mL, 8 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 弃去上清液, 用 100 mmol·L⁻¹ 的磷酸盐缓冲液(pH = 7.4)冲洗, 超声破碎细胞结构, 12 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 以去除细胞碎片, 取上清液加入至含有 100 mmol·L⁻¹ 磷酸盐缓冲溶液、1 mmol·L⁻¹ NaNO₂、1 mmol·L⁻¹ 甲基紫精和 5 mmol·L⁻¹ Na₂S₂O₄ 的厌氧气相瓶中, 在 30℃ 下培养 30 min,

根据 NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 的减少量计算 NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 还原酶的酶活性^[11]。

1.5 功能基因 *narG* 和 *nirS* 的测定

1.5.1 DNA 的提取

所取样品 4℃ 8 000 r·min⁻¹ 离心 15 min, 沉淀样品采用(Sangon Biotech)土壤基因组 DNA 快速抽提试剂盒提取基因组 DNA, 于 -80℃ 保存, 用于后续荧光定量 PCR 仪测定基因相对丰度。

1.5.2 Real-time PCR

将所提取的 DNA 样品利用荧光定量 PCR 仪(Roche LightCycler480), 采用 SYBR Green I 法测定 *narG* 和 *nirS* 相对丰度。实验中采用 20 μL 反应体系, 由 10 μL SYBR Green qPCR Master Mix、0.4 μL 正向引物、0.4 μL 反向引物、2 μL DNA 模板、7.2 μL ddH₂O 构成。*narG* 和 *nirS* 的所用引物(Sangon Biotech)如表 2 所示。反应体系在 96 孔反应板中进行, 每个样品重复 3 次, 以无菌水作为阴性对照。

Real-time PCR 扩增条件: 16S rDNA 为 95℃ 预变性 3 min, 45 个循环(95℃ 变性 7 s, 57℃ 退火 10 s, 72℃ 延伸 15 s); *narG*: 95℃ 预变性 3 min, 45 个循环(95℃ 变性 15 s, 63℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 30 s); *nirS*: 95℃ 预变性 3 min, 15 个循环(95℃ 变性 15 s, 66℃ 退火 20 s, 72℃ 延伸 20 s), 30 个循环(95℃ 变性 15 s, 60℃ 退火 20 s, 72℃ 延伸 20 s)。各基因最后以 0.1℃·s⁻¹ 速率从 60℃ 升至 95℃, 获得扩增 DNA 片段的熔解曲线。基因的相对丰度采用 2^{-ΔΔCT} 法^[19] 计算, 以 16S rDNA 为管家基因, 各浓度纳米银组与对照组中 *narG* 和 *nirS* 的相对丰度进行比较。

表 2 Real-time PCR 实验引物列表

Table 2 Primers used in real-time PCR

基因	正向序列	反向序列	文献
16S rDNA	ATGGCTGTCGTCAGCT	ACGGGCGGTGTGTAC	[20]
<i>narG</i>	TAYGTSGGGCAGGARAAACTG	CGTAGAAGAAGCTGGTGCTGT	[21]
<i>nirS</i>	TACCACCCSGARCCGCGCGT	GCCGCCGTCRTGVAGGAA	[22]

1.6 数据分析

不同处理组间差异的显著性水平采用单因素方差分析法($P < 0.05$ 为差异显著, $P > 0.05$ 为差异不显著), 统计分析采用 Spss19 完成。

2 结果与分析

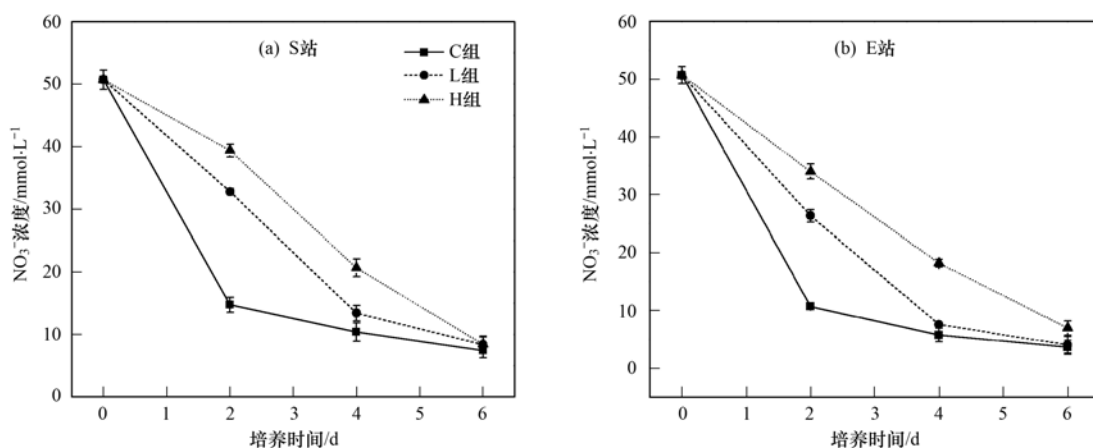
2.1 纳米银对不同区域反硝化能力和 NO₂⁻ 累积效应的影响

不同浓度纳米银胁迫下胶州湾西北部海区 S 站

和河口区 E 站沉积物 NO₃⁻ 浓度的变化如图 2 所示。S 站, L 组培养第 2 d NO₃⁻ 还原量为 C 组的 49.8%, 第 6 d 还原量与 C 组基本相同; H 组在培养第 2 d NO₃⁻ 还原量为 C 组的 31.6%, H 组对 NO₃⁻ 还原能力的抑制强度明显高于 L 组。E 站各实验组对 NO₃⁻ 还原能力的抑制情况与 S 站相似, L、H 组在培养第 2 d NO₃⁻ 还原量分别为 C 组的 60.8% 和 41.7%。两个站位在培养期间 H 组对 NO₃⁻ 还原能力的抑制强度明显高于 L 组($P <$

0.05), L 组明显高于 C 组 ($P < 0.05$); 纳米银对位于湾内的 S 站 NO_3^- 还原能力的抑制程度明显高于河口区的 E 站 ($P < 0.05$). 因此, 纳米银对胶州湾

沉积物 NO_3^- 还原能力具有明显的抑制作用, 浓度越高、抑制效应越强, 且对胶州湾西北部海区站位的抑制效应大于对河口区的站点.



C 组为对照组, L 组为低浓度组, H 组为高浓度组, 下同

图2 不同浓度纳米银胁迫下胶州湾沉积物 NO_3^- 浓度的变化

Fig. 2 Variation of NO_3^- concentration among different AgNPs concentrations

不同浓度纳米银胁迫下 S 站和 E 站沉积物 NO_2^- 浓度的变化如图 3 所示. S 站 L、H 组 NO_2^- 浓度从培养第 2 d 开始即明显高于 C 组, NO_2^- 的还原能力受到明显抑制, NO_2^- 还原量分别为 C 组的 21.2% 和 4.2%, 纳米银浓度越高, NO_2^- 的累积效应越强; 到培养第 6 d, L、H 组 NO_2^- 浓度分别为 C 组的 2.69 倍和 3.20 倍, NO_2^- 还原量有所恢复, 分别为 C 组的 61.6% 和 50.7%, 这可能与亚硝酸盐还原菌对纳米银的影响产生一定的适应机制有关^[11]. E 站 L 组 NO_2^- 浓度在培养第 2 d 达峰值, 为 C 组的 1.33 倍; H 组 NO_2^- 浓度表现为持续增长的趋势; L、H 组 NO_2^- 还原量在培养第 2 d 分别为 C 组的 32.6% 和

5.6%, 第 6 d 有明显恢复, 分别为 C 组的 83.0% 和 64.6%, 恢复幅度明显高于 S 站 ($P < 0.05$).

由上述结果可见, 纳米银胁迫对两个站位 NO_2^- 还原能力均具有明显的抑制效应, 并会造成 NO_2^- 积累量的增加, 且纳米银浓度越高, 抑制效应越强 ($P < 0.05$)、累积效应越强 ($P < 0.05$). 纳米银对胶州湾西北部海区 S 站 NO_2^- 还原能力的抑制程度明显高于对河口区的 E 站 ($P < 0.05$), 对 S 站 NO_2^- 累积的增强效应也比 E 站更显著 ($P < 0.05$), 且 E 站 NO_2^- 还原能力对纳米银胁迫有更强的适应性, 表明纳米银胁迫可能更易造成海湾区 NO_2^- 的累积, 其生态影响也大于河口区.

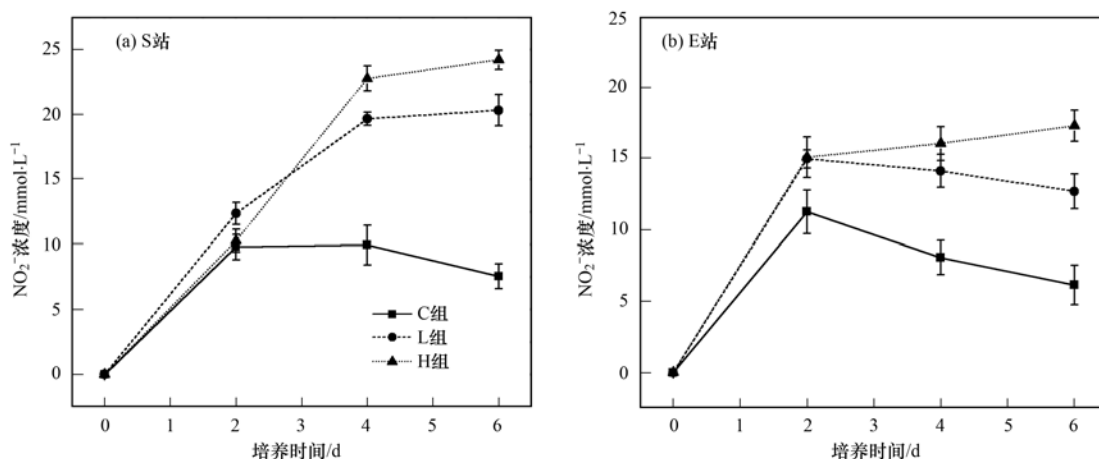


图3 不同浓度纳米银胁迫下胶州湾沉积物 NO_2^- 浓度的变化

Fig. 3 Variation of NO_2^- concentration among different AgNPs concentrations

2.2 纳米银对 NO_3^- 和 NO_2^- 还原酶活性的影响

不同浓度纳米银胁迫下 S 站和 E 站沉积物 NO_3^- 还原酶活性的变化如图 4 所示. S 站 L、H 组 NO_3^- 还原酶活性表现出先降低后升高的趋势, 最低值出现在培养的第 2 d, 分别为 C 组的 56.1% 和 32.6%; NO_3^- 还原酶活性在培养第 6 d 有所恢复, 分别为 C 组的 66.9% 和 46.1%. E 站 NO_3^- 还原酶活性的变化趋势与 S 站相同, L、H 组在培养第 2 d

达最低值, 分别为 C 组的 64.9% 和 47.6%, 第 6d 恢复至 C 组的 71.7% 和 65.4%. 纳米银对两个站位 NO_3^- 还原酶活性均具有明显的抑制作用 ($P < 0.05$), 且浓度越高抑制效应越强 ($P < 0.05$). 各组纳米银对胶州湾西北部海区 S 站 NO_3^- 还原酶活性的抑制程度明显大于河口区的 E 站 ($P < 0.05$), 表明纳米银对海湾区 NO_3^- 还原酶活性的影响可能比河口区更大.

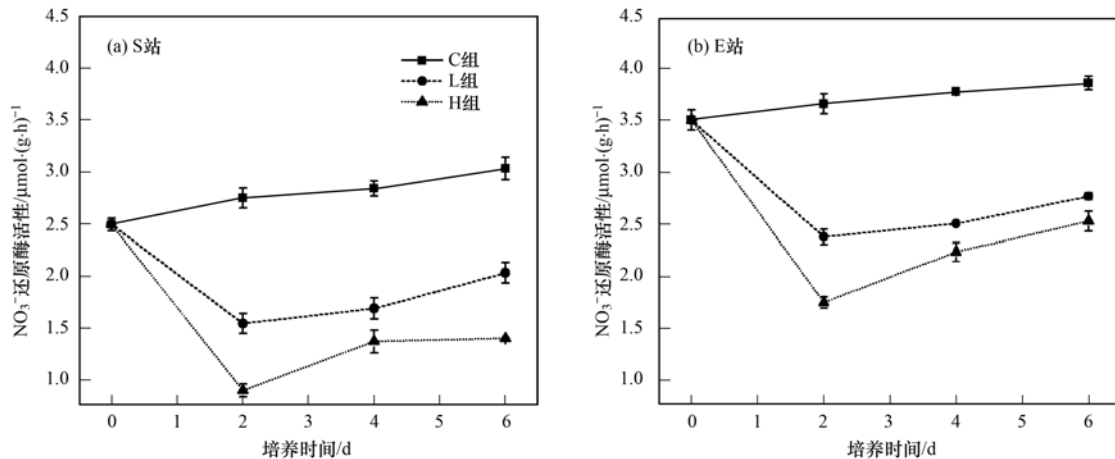


图 4 不同浓度纳米银胁迫下胶州湾沉积物 NO_3^- 还原酶活性的变化

Fig. 4 Variation of NO_3^- reductase among different AgNPs concentrations

不同浓度纳米银胁迫下位于胶州湾西北部海区的 S 站和河口区的 E 站沉积物 NO_2^- 还原酶活性的变化如图 5 所示. S 站 L、H 组 NO_2^- 还原酶活性在培养第 2 d 即受到明显抑制, 酶活性分别仅为 C 组的 35.1% 和 14.1%; 到培养第 6 d, L、H 组酶活性均有小幅度恢复, 分别为 C 组的 37.4% 和 17.5%. E 站 L、H 组 NO_2^- 还原酶活性也表现出先降低后升高的趋势, 第 2d 分别为 C 组的 35.9% 和 14.2%; 第 6 d 恢复幅度明显, L、H 组分别为 C 组的

43.5% 和 23.8%. 纳米银对 2 个站位 NO_2^- 还原酶的影响与对 NO_3^- 还原酶的影响类似, 有明显的抑制作用, 且浓度越高抑制效应越强 ($P < 0.05$); 纳米银对 S 站 NO_2^- 还原酶活性的抑制作用与 E 站无显著性差异 ($P > 0.05$), 但 E 站 NO_2^- 还原酶活性在培养后期的恢复幅度明显高于 S 站 ($P < 0.05$), 与纳米银胁迫下 NO_2^- 还原能力的恢复情况相一致, 表明河口区反硝化细菌对纳米银胁迫的适应能力可能强于海湾区.

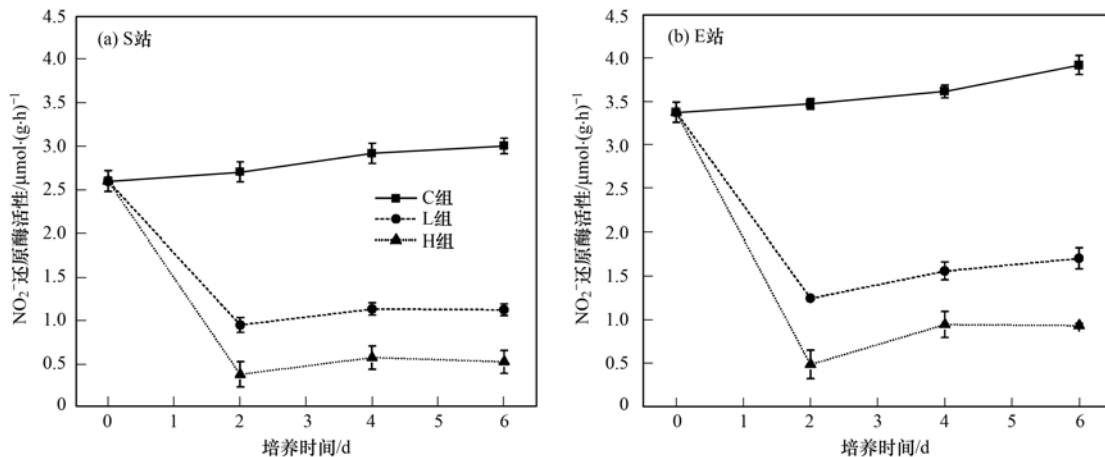


图 5 不同浓度纳米银胁迫下胶州湾沉积物 NO_2^- 还原酶活性的变化

Fig. 5 Variation of NO_2^- reductase among different AgNPs concentrations

2.3 纳米银对功能基因 *narG* 和 *nirS* 丰度的影响

不同浓度纳米银胁迫下 S 站和 E 站沉积物 *narG* 相对丰度的变化如图 6 所示. S 站 L、H 组 *narG* 相对丰度表现出先降低后升高的趋势, 培养第 2 d 分别为 C 组的 38.9% 和 23.0%; 培养第 6 d 略有恢复, 分别为 C 组的 40.3% 和 25.7%. E 站 L、H 组 *narG* 相对丰度同样表现出先降低后升高的趋

势, 培养第 2 d 分别为 C 组的 49.9% 和 32.9%; 第 6 d 有所恢复, 分别为 C 组的 53.9% 和 40.0%. 两个站位纳米银对 *narG* 相对丰度都表现为抑制作用 ($P < 0.05$), 浓度越高, 抑制作用越大 ($P < 0.05$). 纳米银对胶州湾西北部海区 S 站 *narG* 的抑制程度明显大于对河口区的 E 站 ($P < 0.05$), 表明纳米银对海湾区 *narG* 的抑制效应可能大于河口区.

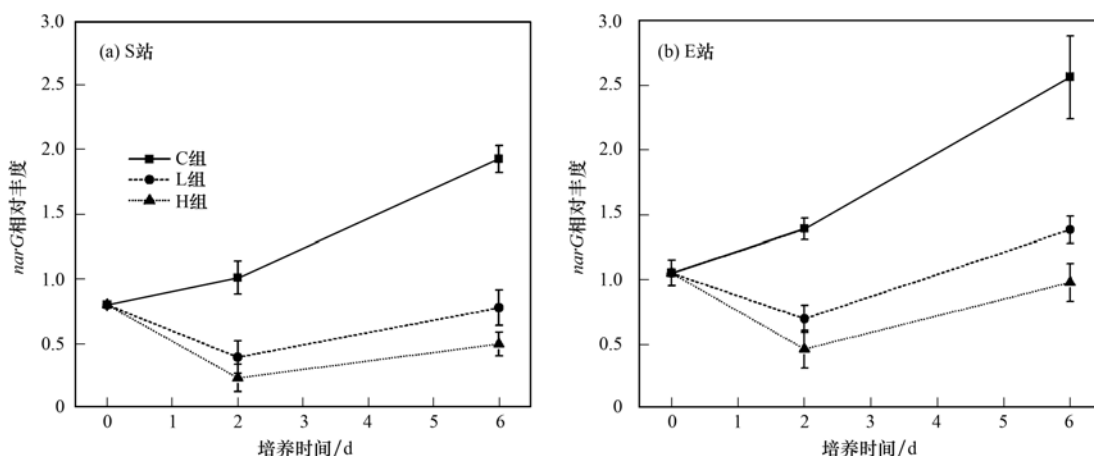


图 6 不同浓度纳米银胁迫下胶州湾沉积物 *narG* 相对丰度的变化

Fig. 6 Variation of *narG* relative abundance among different AgNPs concentrations

不同浓度纳米银胁迫下 S 站和 E 站沉积物 *nirS* 相对丰度的变化如图 7 所示. S 站 L、H 组 *nirS* 相对丰度在培养第 2 d 同样受到明显抑制, 分别为 C 组的 31.2% 和 21.7%; 到培养第 6 d 有所恢复, 为 C 组的 38.4% 和 24.2%. E 站 *nirS* 相对丰度与 S 站类似, 第 2 d 分别为 C 组的 46.7% 和 23.5%; 到培养第 6 d 有所恢复, 为 C 组的 52.1% 和 30.3%. 纳

米银对两个站位 *nirS* 相对丰度均表现为明显的抑制作用 ($P < 0.05$), 且浓度越高抑制作用越明显 ($P < 0.05$). 纳米银对海湾区 S 站 *nirS* 的抑制程度明显大于河口区的 E 站, 且培养后期 H 组 E 站 *nirS* 的恢复幅度明显大于 S 站 ($P < 0.05$), 表明纳米银对海湾区 *nirS* 的抑制效应可能大于河口区, 且河口区反硝化细菌对纳米银胁迫的适应性可能更强.

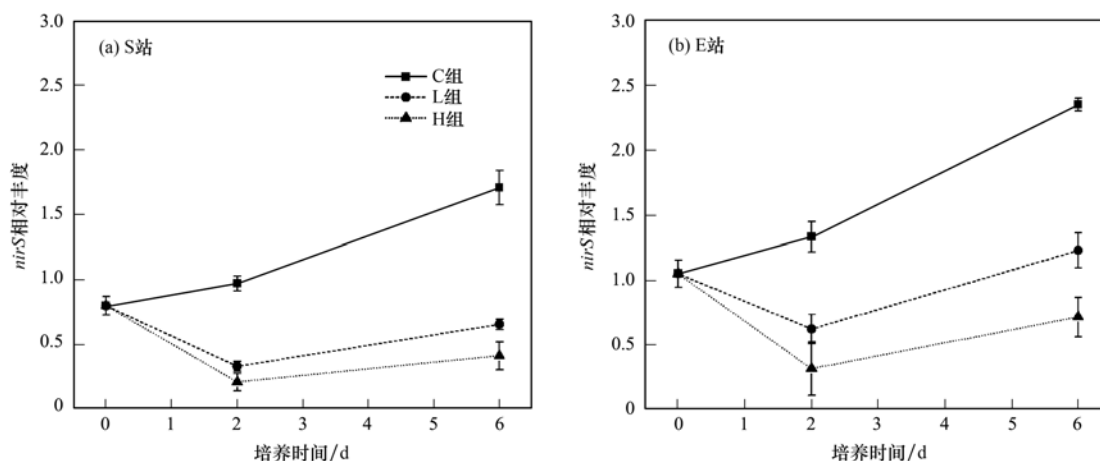


图 7 不同浓度纳米银胁迫下胶州湾沉积物 *nirS* 相对丰度的变化

Fig. 7 Variation of *nirS* relative abundance among different AgNPs concentrations

3 讨论

3.1 纳米银对 NO_3^- 和 NO_2^- 还原能力的影响

反硝化作用是将氮素重新以 N_2 释放进入大气的重要途径,是实现氮循环的关键环节^[11]. NO_3^- 还原成 NO_2^- 和 NO_2^- 还原成 NO 的过程是反硝化作用的重要步骤,被认为是水环境中氮的永久去除过程之一,其中由 NO_2^- 转化为 NO 的过程,更是反硝化作用有别于其他 NO_3^- 代谢的标志性反应,是反硝化过程中重要的限速步骤^[23]. 本研究中,纳米银对 NO_2^- 还原能力的抑制强度都明显大于对 NO_3^- 还原能力的抑制,表明纳米银对 NO_2^- 还原过程的影响大于 NO_3^- 还原过程. 因此,纳米银在抑制沉积环境中氮去除能力的同时,会导致沉积物中 NO_2^- 累积量的增加,并对海洋生物产生毒性效应,从而进一步影响海洋生态系统的物质循环与能量流动^[24, 25].

3.2 纳米银对沉积物反硝化功能影响的关键过程

narG 和 *nirS* 是反硝化作用中两个重要步骤的关键基因,其转录翻译的产物 NO_3^- 还原酶和 NO_2^- 还原酶分别在细胞的特定位置发挥催化作用,保证 NO_3^- 还原过程和 NO_2^- 还原过程的正常进行^[23]. 本研究 NO_3^- 还原过程中,纳米银对 *narG* 的抑制程度明显大于对 NO_3^- 还原酶活性的抑制,而在 NO_2^- 还原过程中,纳米银对 NO_2^- 还原酶活性的抑制程度明显大于对 *nirS* 的抑制,表明纳米银对 NO_3^- 还原成 NO_2^- 过程的影响主要是通过对功能基因丰度的抑制,而对 NO_2^- 还原成 NO 过程的影响主要是通过对还原酶活性的抑制,这可能与 NO_3^- 还原过程和 NO_2^- 还原过程在菌体内的作用部位不同有关. *narG* 编码的 NO_3^- 还原酶是一种膜结合酶,而 *nirS* 编码的 NO_2^- 还原酶是一种膜外周质酶^[23];纳米银进入环境中后会部分溶解生成银离子,在静电吸引作用下,逐渐与细菌接近并聚集在细菌周围,纳米银颗粒和银离子会通过引起 NO_2^- 还原酶的三维构象改变等方式导致 NO_2^- 还原酶失活而无法发挥作用^[26],因此 NO_2^- 还原酶作为细胞膜外周质酶对纳米银胁迫更为敏感.

3.3 纳米银对胶州湾不同区域生态影响的比较

胶州湾是位于中国黄海中部、山东半岛南部的一个典型半封闭海湾,受工业废水、生活污水等陆源污染物影响较大. 而大沽河是胶州湾最大的入湾

河流,每年向胶州湾输送大量的陆源污染物^[24],作为连接胶州湾和大沽河的纽带,大沽河河口区和胶州湾西北部海区承载着巨大的营养盐等陆源污染负荷. 本研究结果表明,在纳米银胁迫下,位于大沽河河口区的 E 站和胶州湾西北部海区的 S 站 NO_3^- 和 NO_2^- 还原能力、 NO_3^- 和 NO_2^- 还原酶活性、*narG* 和 *nirS* 相对丰度均受到明显的抑制. NO_3^- 和 NO_2^- 还原能力的抑制将导致沉积物中反硝化作用严重受阻,阻断 N 的正常循环途径,进一步加重水体的富营养化程度.

河口区是纳米银迁移过程中的重要途径,而海湾区由于盐度更高,更容易导致纳米颗粒团聚、沉降,最终聚集在沉积物中,从而对沉积物环境产生直接和潜在的影响^[24]. 本研究结果表明,纳米银对 S 站 NO_3^- 和 NO_2^- 还原能力、 NO_3^- 还原酶活性及 *narG* 和 *nirS* 相对丰度的抑制效应明显高于 E 站,表明胶州湾西北部海区 NO_3^- 和 NO_2^- 还原菌可能对纳米银的胁迫更加敏感,因此,纳米银对胶州湾西北部海湾区沉积环境的生态影响可能也大于河口区.

4 结论

(1) 纳米银对胶州湾西北部海区和河口区 2 个站沉积物 NO_3^- 和 NO_2^- 还原能力、 NO_3^- 和 NO_2^- 还原酶活性及 *narG* 和 *nirS* 丰度具有抑制效应,纳米银浓度越高,抑制效应越明显,且对 *nirS* 的抑制程度大于对 *narG* 的抑制程度,会导致 NO_2^- 累积量的增加.

(2) 纳米银对 *narG* 相对丰度的抑制程度明显大于对 NO_3^- 还原酶的抑制,对 NO_2^- 还原酶的抑制程度明显大于对 *nirS* 相对丰度的抑制,表明纳米银对 NO_3^- 还原过程的影响主要是通过对功能基因的抑制,而对 NO_2^- 还原过程的影响主要是通过对还原酶活性的抑制.

(3) 纳米银对胶州湾西北部海区 S 站反硝化能力和 *narG*、*nirS* 相对丰度的抑制程度明显高于对河口区的 E 站,表明湾内的反硝化细菌对纳米银胁迫的敏感性高于河口区,纳米银对胶州湾西北部海区的生态影响也大于大沽河河口区.

参考文献:

- [1] Konował E, Sybis M, Modrzejewska-Sikorska A, et al. Synthesis of dextrin-stabilized colloidal silver nanoparticles and their application as modifiers of cement mortar [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, **104**: 165-172.
- [2] Li M M, Gong Y M, Wang W H, et al. In-situ reduced silver nanoparticles on populus fiber and the catalytic application [J].

- Applied Surface Science, 2017, **394**: 351-357.
- [3] McGillicuddy E, Murray I, Kavanagh S, *et al.* Silver nanoparticles in the environment: sources, detection and ecotoxicology[J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 231-246.
- [4] Rasheed T, Bilal M, Iqbal H M N, *et al.* Green biosynthesis of silver nanoparticles using leaves extract of *Artemisia vulgaris* and their potential biomedical applications[J]. Colloids and surfaces B: Biointerfaces, 2017, **158**: 408-415.
- [5] Griffitt R J, Hyndman K, Denslow N D, *et al.* Comparison of molecular and histological changes in zebrafish gills exposed to metallic nanoparticles[J]. Toxicological Sciences, 2009, **107** (2): 404-415.
- [6] Durán N, Marcato P D, de Conti R, *et al.* Potential use of silver nanoparticles on pathogenic bacteria, their toxicity and possible mechanisms of action [J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2010, **21**(6): 949-959.
- [7] Venkatesham M, Ayodhya D, Madhusudhan A, *et al.* A novel green one-step synthesis of silver nanoparticles using chitosan: catalytic activity and antimicrobial studies [J]. Applied Nanoscience, 2014, **4**(1): 113-119.
- [8] Barbasz A, Oćwieja M, Roman M. Toxicity of silver nanoparticles towards tumoral human cell lines U-937 and HL-60 [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2017, **156**: 397-404.
- [9] Samarajeewa A D, Velicogna J R, Princz J I, *et al.* Effect of silver nano-particles on soil microbial growth, activity and community diversity in a sandy loam soil [J]. Environmental Pollution, 2017, **220**: 504-513.
- [10] Fan W H, Liu T, Li X M, *et al.* Nano-TiO₂ affects Cu speciation, extracellular enzyme activity, and bacterial communities in sediments[J]. Environmental Pollution, 2016, **218**: 77-85.
- [11] Bao S P, Wang H, Zhang W C, *et al.* An investigation into the effects of silver nanoparticles on natural microbial communities in two freshwater sediments[J]. Environmental Pollution, 2016, **219**: 696-704.
- [12] VandeVoort A R, Skipper H, Arai Y. Macroscopic assessment of nanosilver toxicity to soil denitrification kinetics[J]. Journal of Environmental Quality, 2014, **43**(4): 1424-1430.
- [13] Xiong Z, Su Y, Chen Y, *et al.* Carbon nanotubes affect the toxicity of CuO nanoparticles to denitrification in marine sediments by altering cellular internalization of nanoparticle[J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 1-9.
- [14] Hou J, You G X, Xu Y, *et al.* Impacts of CuO nanoparticles on nitrogen removal in sequencing batch biofilm reactors after short-term and long-term exposure and the functions of natural organic matter [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(21): 22116-22125.
- [15] 杨丽标, 雷坤, 孟伟, 等. 上覆水中碳氮浓度对黄河沉积物反硝化速率的影响[J]. 海洋环境科学, 2016, **35**(6): 868-875, 881.
- Yang L B, Lei K, Meng W, *et al.* Impact of C and N concentrations on sediments denitrification rate of the Yellow River[J]. Marine Environmental Science, 2016, **35**(6): 868-875, 881.
- [16] Michels C, Perazzoli S, Soares H M. Inhibition of an enriched culture of ammonia oxidizing bacteria by two different nanoparticles: Silver and magnetite [J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 995-1002.
- [17] Zhang Z H, Gao P, Li M Q, *et al.* Influence of Silver nanoparticles on nutrient removal and microbial communities in SBR process after long-term exposure[J]. Science of the Total Environment, 2016, **569-570**: 234-243.
- [18] Wang L P, Zheng B H, Nan B X, *et al.* Diversity of bacterial community and detection of *nirS*-and *nirK*-encoding denitrifying bacteria in sandy intertidal sediments along Laizhou Bay of Bohai Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **88**(1-2): 215-223.
- [19] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the Method [J]. Methods, 2001, **25**(4): 402-408.
- [20] Harms G, Layton A C, Dionisi H M, *et al.* Real-time PCR quantification of nitrifying bacteria in a municipal wastewater treatment plant[J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(2): 343-351.
- [21] López-Gutiérrez J C, Henry S, Hallet S, *et al.* Quantification of a novel group of nitrate-reducing bacteria in the environment by real-time PCR[J]. Journal of Microbiological Methods, 2004, **57**(3): 399-407.
- [22] Braker G, Fesefeldt A, Witzel K P. Development of PCR primer systems for amplification of nitrite reductase genes (*nirK* and *nirS*) to detect denitrifying bacteria in environmental samples [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(10): 3769-3775.
- [23] 郭丽芸, 时飞, 杨柳燕. 反硝化菌功能基因及其分子生态学研究进展[J]. 微生物学通报, 2011, **38**(4): 583-590.
- Guo L Y, Shi F, Yang L Y. Advances in functional genes and molecular ecology in denitrifiers[J]. Microbiology China, 2011, **38**(4): 583-590.
- [24] Alinsafi A, Adouani N, Béline F, *et al.* Nitrite effect on nitrous oxide emission from denitrifying activated sludge [J]. Process Biochemistry, 2008, **43**(6): 683-689.
- [25] 薛静怡, 宗雅丽, 侯玉, 等. 水产养殖中亚硝酸盐毒性影响及处理的研究进展[J]. 渔业研究, 2017, **39**(4): 320-324.
- Xue J Y, Zong Y L, Hou Y, *et al.* Research progress on toxicity and treatment of nitrite in aquaculture[J]. Journal of Fisheries Research, 2017, **39**(4): 320-324.
- [26] 邹秋艳. 纳米银与苯酚对反硝化菌活性的复合毒性效应与机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Zou Q Y. Composite toxic effects and mechanisms of agnps and phenol on pure denitrifying bacteria [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the $\delta^{15}\text{N}$ of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α -HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)