

环境科学

(HUANJING KEXUE)

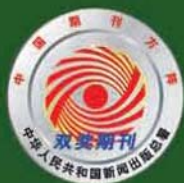
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

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

2015年北京市两次红色预警期间PM_{2.5}浓度特征 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM_{2.5}变化特征对气象因素的响应 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM_{2.5}中芳香酸的测定及来源解析 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO₂交换通量变化过程及其环境影响 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co₃O₄活化过一硫酸盐降解金橙G 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX₂的筛选及脱氮特性 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N₂O排放及其影响因素 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N₂O排放研究 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe₂O₃及其NH₃-SCR活性探究 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与 N₂O 排放研究

高雪梅¹, 余冬立^{1,2*}, 颜晓元², 夏永秋^{2*}

(1. 河海大学水利水电学院, 南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 果园是太湖地区重要的经济作物, 但是氮肥投入量大, 氮素损失严重, 使得排水沟道的活化氮浓度高, 碳氮比下降, 碳源可能是影响沟道底泥硝化与反硝化作用的限制因子. 因此, 采集了果园排水沟道沉积物, 在实验室条件下, 设计了 C₀、C₁、C₂、C₃、C₄ 这 5 种有机碳源 (葡萄糖) 浓度水平, 分别为 0、5、25、50 和 100 mg·L⁻¹, 同时分别输入了 5 mg·L⁻¹ 的硝酸钾溶液. 采用乙炔抑制法来研究果园排水沟道土壤的反硝化损失和不加乙炔研究 N₂O 的排放量. 结果表明, 加入碳源使土壤的反硝化速率 (D_N) 和 N₂O 排放速率均有一定的增加, 碳氮比对 N₂O 排放速率和 D_N 的影响均极为显著 (P < 0.05); 碳氮比为 10:1 时, 累积反硝化损失总量和 N₂O 累积排放总量均较大 (分别为 319.26 μg·kg⁻¹ 和 6.20 μg·kg⁻¹), 占净氮的输入量比例均较高 (分别为 1.28% 和 0.02%), 说明该处理情况下虽然对于沟道反硝化非常有利, 利于去除土壤底泥中富集的氮素, 但同时也增加了温室气体 N₂O 的排放.

关键词: 碳输入; 碳氮比; 反硝化; N₂O 排放; 累积排放量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2731-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.041

Denitrification Loss and N₂O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments

GAO Xue-mei¹, SHE Dong-li^{1,2*}, YAN Xiao-yuan², XIA Yong-qiu^{2*}

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The orchard is an important economic crop in Taihu Lake region. Heavy nitrogen application in orchard results in great nitrogen loss to drainage ditch, and unbalanced carbon nitrogen ratio. Therefore, carbon might be an important limiting factor for sediment nitrification and denitrification. A soil incubation experiment controlled by the acetylene inhibition method was conducted under laboratory conditions to study the denitrification loss and N₂O emissions of orchard drainage ditch soil. We designed five carbon input levels of 0, 5, 25, 50 and 100 mg·L⁻¹, which were noted as C₀, C₁, C₂, C₃ and C₄, respectively, meanwhile there was 5 mg·L⁻¹ net nitrogen input in the form of KNO₃ in each treatment. The results showed that carbon inputs could stimulate both denitrification rates (D_N) and N₂O emission rates. Carbon and nitrogen ratio had a significant effect on N₂O emission rates and denitrification loss rates (P < 0.05). When the carbon and nitrogen ratio was 10:1, total cumulative denitrification losses and N₂O emissions were both highest (319.26 μg·kg⁻¹ and 6.20 μg·kg⁻¹, respectively) among the treatments, which accounted for 1.28% and 0.02% of net nitrogen input, respectively. This result indicated that the carbon and nitrogen ratio of 10:1 was most favorable for N₂O emissions and denitrification process in sediments.

Key words: carbon input; carbon nitrogen ratio; denitrification; N₂O emission; accumulative emissions

近年来,随着经济的迅速发展,环境问题已变得越来越突出,特别是农业氮素的非点源污染带来的环境问题. 土壤反硝化作用已被视为是土壤氮素循环的重要环节,是水生环境中 NO₃⁻-N 以 N₂ 方式损失的主要途径^[1]. 土壤反硝化的过程包含化学反硝化和生物反硝化,其中生物反硝化过程占主导作用^[1-4]. 生物反硝化作用是指在厌氧状态下,特定微生物细菌利用呼吸机制将 NO₃⁻ 作为终端电子受体,将其逐步转化为 N₂ 的过程^[4,5],其过程可以表

示为 4 个步骤: NO₃⁻ → NO₂⁻ → NO → N₂O → N₂^[6]. 反硝化作用对于环境有正负双重影响,一方面可以改

收稿日期: 2015-12-02; 修订日期: 2016-03-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101-004); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目 (Y412201423); 中央高校基本科研业务费专项 (2015B14814); 江苏省水利科技项目 (2014075)

作者简介: 高雪梅 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田水土过程与侵蚀控制, E-mail: 1085424803@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: shedongli@hhu.edu.cn; yqxia@issas.ac.cn

善生态系统的土壤质地,维持氮素平衡,减少水体中 NO_3^- -N的浓度,进而减轻农业非点源污染;同时反硝化过程中产生的 N_2O 气体,也是大气的重要污染源之一^[7~9]. 已有研究表明,土壤微生物主导的硝化-反硝化作用所产生的 N_2O 约占全球大气中 N_2O 总量的90%,且每年保持着一定的比率继续增长^[10,11].

目前,国内外专家学者对土壤反硝化作用的研究大多局限在外加氮源对反硝化速率的影响. 有机碳作为一个反硝化微生物的重要能源物质,其对土壤脱氮效应的影响还不是很明确,有关碳源对土壤反硝化作用影响的研究尚不多见,研究结论也不相一致. Zimmerman等^[12]的研究表明有机碳对美国德克萨斯湾沉积物的反硝化作用有显著促进的影响;吕海霞等^[4]研究表明有机碳是土壤反硝化作用的限制性因子,土壤反硝化速率与有机碳有显著正相关关系;而Herrman等^[13]的研究结论恰与此相反,认为土壤反硝化作用与有机碳没有显著的相关关系. 造成这种研究差异的可能原因是碳氮比是控制反硝化脱氮速率的重要因素.

近些年来,由于水果作物经济效益高,太湖流域稻改果现象突出. 稻田改种为果林后,施肥量大量增加,尤其是氮投入量高达 $1\ 400\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,肥料利用率反而降低,氮素的流失潜力加大^[14]. 导致沟道氮素浓度增加,碳氮比下降. 然而,目前还不清楚该条件对果园地沟道反硝化及其 N_2O 排放的影响. 为

此,本研究基于实验室模拟试验,分析了不同外加碳源输入梯度(不同碳氮比)下果园排水沟道底泥反硝化作用和 N_2O 排放的差异. 由于碳源添加与土壤有机碳的矿化速率直接联系,土壤碳矿化又是反硝化速率和 N_2O 排放的重要影响过程^[15]. 因此本研究试图通过土壤碳矿化速率来解释碳源添加对反硝化速率和 N_2O 排放的影响,通过初步揭示外加碳源对底泥反硝化作用的影响,以期以太湖流域果园排水沟道氮素平衡与生态评价提供适量参考.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

野外试验于2014年10月25日在果园业较发达的江苏省宜兴市周铁镇生态试验场($31^\circ 22' \text{N}$ 、 $119^\circ 57' \text{E}$)进行. 试验区属亚热带湿润气候,冬冷夏热、四季分明,试验区内排水沟长约180 m,宽0.21 m,深0.1 m. 目前,由于果园的大量施肥,排水沟深受非点源污染,使得沟内底泥富集了大量的氮素. 沟内自上游向下依次设置6个取样点,在每个取样点上用奥地利Uwitec无扰动沉积物采样器(PVC,内径8 cm,高30 cm)采集0~15 cm的表层原状土壤样品. 将奥地利Uwitec无扰动沉积物采样器插入土壤15 cm深处,然后将有机玻璃柱状采样器小心取出,将土样放入聚乙烯袋内带回实验室培养, 4°C 下保存备用. 研究区域沟道上覆水的基本理化性质见表1,研究区内排水沟现状如图1所示.

表1 排水沟道上覆水与底泥土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of overlying water and sediment soil of drainage ditch

区域	溶解氧/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	全氮/%	有机碳/%	NH_4^+ -N	NO_3^- -N
上覆水	4.47	2.34	17.10	$0.26\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.88\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
底泥土壤	—	0.20	1.61	$14.15\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$3.39\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

1.2 研究方法 与设备

培养试验选在河海大学农业水土实验室进行,土壤样品为2014年10月25日从江苏省宜兴市周铁镇生态试验场取回. 本研究在淹水厌氧条件下应用乙炔抑制培养法研究不同有机碳输入梯度对果园土壤反硝化作用的影响. 称取相当于40 g烘干土重的新鲜土,置于250 mL广口瓶中,按照水土比5:1的比例加入一定量的有机碳溶液(对照组加入等量蒸馏水). 试验设 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 这5个有机碳输入梯度,净碳的输入量分别是0、5、25、50和 $100\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,每个设计水平在输入碳的同时,分别输入了 $5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝酸钾溶液,即外源碳氮比分别为0:1、1:1、5:1、10:1和20:1,每个处理3次重复.

有机碳以葡萄糖溶液为例,分别定量加入到各培养瓶中. 处理完毕后,用带有2根钢管的橡胶塞塞住瓶口,接口用704胶密封,两根钢管分别接一段硅胶管,用三通阀连接. 试验分为两组,其中一组不充乙炔,用于测定土壤的 N_2O 排放速率;另一组在培养前充入10%的乙炔处理,即用抽气针筒从培养瓶中抽取10%(体积分数)的气体弃去,然后抽取同体积净化后的乙炔气体(纯度 $>99.9\%$ ^[16])通入培养瓶中,由于通入10%(体积分数)的乙炔可抑制硝化作用过程中 N_2O 的产生以及反硝化过程中 N_2O 还原为 N_2 ,所测定的 N_2O 质量浓度代表反硝化速率(D_N). 用30 mL注射器来回抽、充三角瓶内气体3~4次,使瓶内气体混合均匀,用10 mL注射器从每



图1 研究区内排水沟的现状

Fig. 1 Current status of the drainage ditch in the study site

个三角瓶内抽取 8 ~ 10 mL 的气体作为初始时刻的气样. 处理完后将所有培养瓶放入恒温培养箱内, 温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$. 通过预试验可知, 试验进行到 26 h 时, 土壤中硝氮浓度已经很低, 土壤的硝化与反硝化作用基本进行完全, 因此, 培养时间定为 2 d, 分别在 0、4、14 和 26 h 等时刻抽取气体, 每次抽完气体保持瓶子与大气畅通 30 min, 然后重新充气, 重复之前操作.

N₂O 质量浓度均用 Agilent7820A 气相色谱仪分析测定, 色谱柱为填充 80/110 目 Porapak-Q 的填充柱. ECD 检测器和色谱柱的温度分别为 330°C、55°C. 亚甲烷为载气 (95% 氩气 + 5% 甲烷), 流速为 35 mL·min⁻¹, 高纯氮气作为反吹气. N₂O 标准气体由日本国家农业环境研究所提供. CO₂ 质量浓度也由 Agilent7820A 气相色谱仪同步分析测定; 土壤中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 采用 KCl 浸提-比色法测定.

N₂O 排放速率、D_N 和有机碳矿化速率计算公式如下所示:

$$Q = (W_2 - W_1) / [(T_2 - T_1) \times M] \quad (1)$$

$$W = c (V_g + V_l \alpha) \times 1000 \quad (2)$$

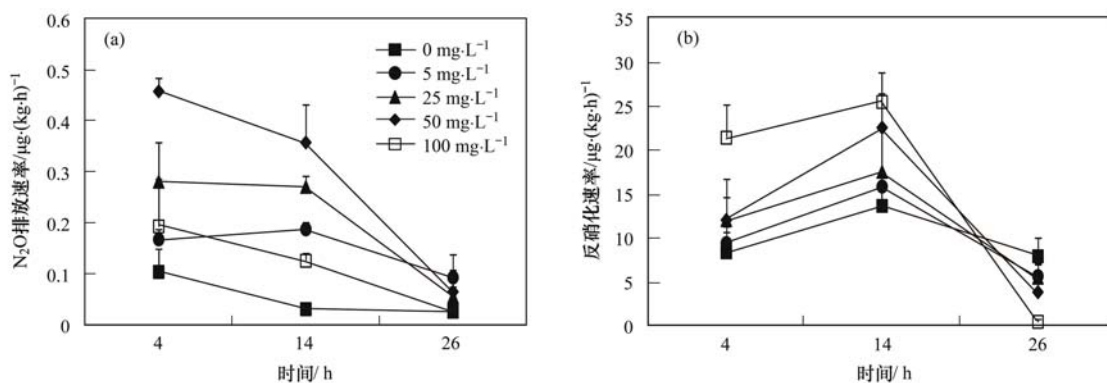
式中, Q 表示培养 T_2 后产生的 N₂O 排放速率或 D_N 或有机碳矿化速率, $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$; W_2 表示培养 T_2 后产生的 N₂O-N 或 CO₂-C 总量, μg ; W_1 表示开始培养第一次采样时 (T_1) 所产生的 N₂O-N 或 CO₂-C 总量, μg ; M 表示烘干土的质量, kg; c 表示测定采集气样中 N₂O-N 或 CO₂-C 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V_g 表示培养瓶气体总体积, L; V_l 表示培养桶内溶液体积, L; α 表示 Bunsen 系数, 25°C 时为 0.55.

数据分析采用 Excel, 显著性分析通过 SPSS 13.0 实现, 绘图通过 Sigmaplot 10.0 等软件完成.

2 结果与分析

2.1 N₂O 排放速率和反硝化损失速率

土壤 N₂O 的排放是硝化和反硝化共同作用的结果, 其排放速率即为硝化和反硝化作用中 N₂O 排放速率之和^[1, 17]. 由图 2 (a) 中可以看出, 不同碳输入梯度下 N₂O 排放速率的变化规律基本一致, 各梯度在培养期内, 基本均呈现下降趋势; 且不同碳输入

图2 不同碳梯度下土壤N₂O的排放速率和反硝化速率Fig. 2 N₂O emission rates and denitrification rates under different carbon input in soil

梯度下的 N_2O 排放速率明显高于对照 C_0 。培养前14 h内,各梯度下 N_2O 排放速率均达到了最大值,分别为0.10、0.19、0.28、0.46和0.20 $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 梯度下 N_2O 排放速率分别为 C_0 梯度下的1.90、2.80、4.60和2.00倍。 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 梯度在培养期内 N_2O 排放速率的平均值分别为0.05、0.15、0.20、0.29和0.12 $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$,各梯度下 N_2O 排放速率变化范围均控制在0.03~0.46 $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ 区间内,不同处理间差异均达到显著水平($P < 0.05$)。

运用乙炔处理的培养组中的 N_2O 总量代表土壤的反硝化损失速率(D_N)。由图2(b)可以看出,不同碳输入梯度下的 D_N 变化趋势基本一致,均呈现出先增大后减小的变化趋势,但 C_0 曲线变化趋势比其它碳梯度下的曲线趋势较小;培养14 h时 D_N 出现激增状态,即在培养时间为4~14 h的时间段内 D_N 出现了最大值,分别为13.63、15.83、17.52、22.54和25.46 $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ 。 D_N 随着碳浓度的增大而逐渐升高, C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 梯度下的 D_N 平均值分别为9.96、10.29、11.66、12.79和15.77 $\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$,各处理下差异均达到显著水平($P < 0.05$)。

2.2 土壤 N_2O 排放总量和反硝化损失总量

培养期内 N_2O 排放总量和反硝化损失总量估算(以每千克土壤的排放量计算)。从表2可知,随着碳浓度的增大, N_2O 累积排放总量逐渐增大,最大值出现在 C_3 梯度(碳氮比为10:1),最小值出现在对照组 C_0 中,当碳氮比超过10:1时, N_2O 累积排放总量开始减小。 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 梯度下的 N_2O 累积排放总量分别为1.08、3.67、4.50、6.20和2.35 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占净氮输入量的0.01%、0.01%、0.02%、0.02%和0.01%; C_2 、 C_3 梯度下的 N_2O 转

化效率较 C_0 、 C_1 和 C_4 略大。随着碳浓度的增大,累积反硝化损失总量逐渐增大, C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 梯度下的累积反硝化损失总量分别为263.66、264.53、288.56、319.26和345.45 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占净氮输入量的1.05%、1.06%、1.15%、1.28%和1.38%。

在整个培养期内,不同碳浓度处理下 N_2O/D_N 的平均值分别为0.55%、1.46%、1.74%、2.30%和0.73%,可以看出不同浓度有机碳的加入明显影响了 N_2O/D_N 。培养结束时,各处理下的 N_2O 累积排放量/反硝化累积排放量差异较大,介于0.41%~1.94%(表2),且其它4个碳处理下的 N_2O 累积排放量/反硝化累积排放量比值均高于对照组,其中 C_3 处理最大。

表2 培养结束时淹水条件下添加不同浓度碳源处的土壤氮素气体累积排放量¹⁾

处理	N_2O / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	反硝化量 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	N_2O /反硝化量 /%
C_0	1.08a	263.66a	0.41a
C_1	3.67b	264.53b	1.39ab
C_2	4.50b	288.56b	1.56b
C_3	6.20b	319.26b	1.94b
C_4	2.35a	345.45b	0.68ab

1)字母相同表示差异不明显,字母不同表示差异显著

2.3 土壤有机碳(CO_2 -C)矿化速率与反硝化速率和 N_2O 排放速率的关系

图3所示培养期间不同碳梯度等级下经乙炔(未加乙炔)处理的土壤矿化速率随时间的变化曲线。不同碳浓度的培养条件下,两种处理的土壤(经过乙炔处理和未经乙炔处理)在培养阶段有机碳矿化速率随时间的动态趋势基本一致。培养期内, CO_2 -C的释放速率变化相当明显。不同碳浓度

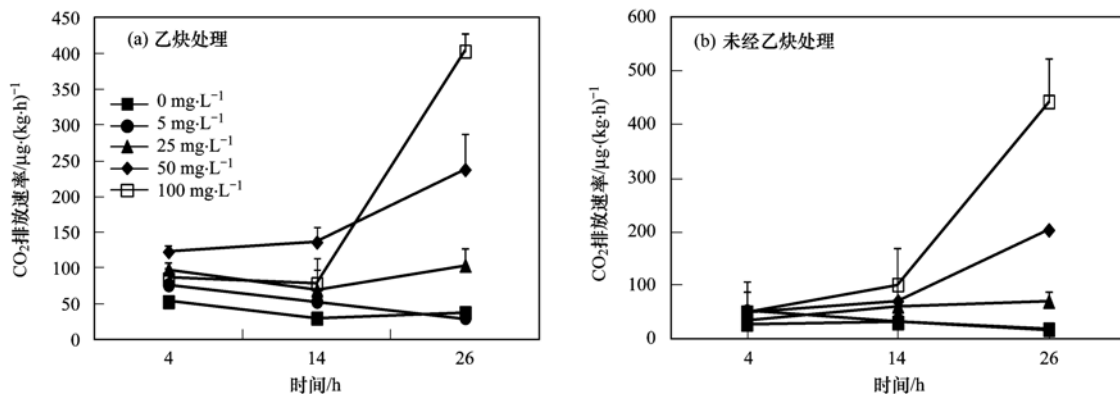


图3 不同碳梯度下经乙炔处理(未加乙炔)土壤有机碳矿化速率随时间变化曲线

Fig. 3 Dynamics of the mineralization rate of soil (acetylene and no acetylene) under different carbon input

处理下,有机碳矿化速率差异相当显著($P < 0.01$). 在培养期内,乙炔处理中的 C_4 浓度(碳氮比为 20:1)下,有机碳矿化速率最大 [$188.69 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$],分别为其它处理的 1.14~4.71 倍. 为更明确地分析不同碳浓度对土壤有机碳矿化速率的影响,特进行方差分析,结果表明,无论土壤是否经过乙炔处理,碳浓度对土壤有机碳矿化速率均具有极显著的影响(表 3).

表 3 沟道土壤矿化速率的单因素方差分析¹⁾

Table 3 ANOVA results of carbon mineralization rates of ditch soil in orchard

因变量	碳梯度处理	矿化率 $\text{CO}_2\text{-C}$ $/\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$	统计量 F	P 值
乙炔	C_0	40.01	77.02	1.79E-07
	C_1	53.65		
	C_2	90.49		
	C_3	165.60		
	C_4	188.69		
非乙炔	C_0	26.61	46.80	1.93E-06
	C_1	36.16		
	C_2	56.88		
	C_3	106.89		
	C_4	198.95		

1) $P < 0.01$ 表示差异极显著

3 讨论

3.1 碳源添加对 N_2O 排放速率和反硝化损失速率的影响

在整个培养过程中,反硝化速率(D_N)随着有机碳输入量增大而增大,表明沟道中有机碳是影响 D_N 的限制因子. 而 NO_3^- -N 浓度已不是反硝化作用的限制因子,可能与果园定期施肥使排水沟道土壤中氮素大量富集有关. 这一结论与其他学者的研究结果相一致,例如,Seitzinger 等^[18]指出,反硝化潜势是由有机碳和 NO_3^- -N 浓度的可利用性来决定的,当 NO_3^- -N 浓度过高时,有机碳是反硝化作用的主要控

制因素^[19]; Dong 等^[20]研究认为,土壤的反硝化作用在 NO_3^- -N 浓度不受限制的情况下由有机碳控制; 杨新萍等^[21]研究认为碳源是影响好氧反硝化细菌脱氮性能的最重要因素.

在高氮负荷的果园沟道里,碳源添加会促进 N_2O 排放速率. 这一结论与前人研究结果相似,例如,Velthof 等^[22]的研究表明草地土壤 N_2O 通量与土壤含碳量有较弱的正相关关系; 耿远波等^[23]认为土壤有机碳对 N_2O 排放有促进作用. N_2O 是硝化反硝化作用的中间产物,碳源在促进硝化反硝化速率的同时,促进了 N_2O 的排放. 本试验中不同浓度有机碳对果园排水沟道底泥的 N_2O 排放速率有显著影响, C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 处理下的 N_2O 排放速率均高于对照组 C_0 ,说明在土壤中添加有机碳可以加速土壤的硝化反硝化作用^[24,25]; 随着有机碳浓度的增大 N_2O 排放速率先增大后减小,这主要由于碳源进一步添加后,微生物有了充足的碳源,使得硝化和反硝化过程进行得更加彻底,产生更多的 N_2 ,导致 N_2O 排放速率下降. 该结果与 Senbayram 等^[26]和陈诺等^[27]的研究结论相一致.

由图 4 可以看出有机碳矿化速率与 D_N 、 N_2O 排放速率成正相关关系,说明了果园排水沟道土壤微生物发生硝化反硝作用的同时也促进了有机碳的矿化作用. 这一结果与李英臣等^[28]的研究结论相一致.

3.2 碳源添加对 N_2O/D_N 的影响

本研究中不同浓度有机碳的加入明显影响了 N_2O/D_N ,随着碳浓度的增大 N_2O/D_N 比值也逐渐增大,这与前人学者观测的结果相反. 例如,有研究表明,有机物可以刺激土壤微生物的活性,降低了土壤中 O_2 的浓度,同时提供了更多的电子供体,可以降低反硝化产物中 N_2O/D_N 比值^[29-32]; 张斌等^[33]指

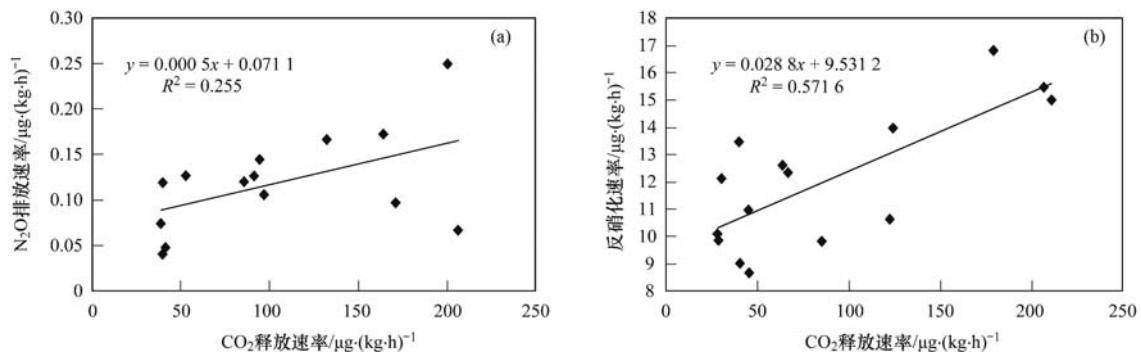


图 4 果园土壤 N_2O 及 D_N 与 CO_2 排放间的关系

Fig. 4 Relationship between N_2O , denitrification rates and CO_2 emission in orchard drainage ditch soil

出,在施加氮肥的情况下,生物质炭显著地降低了 N_2O 的排放; Senbayram 等^[26]研究认为,土壤有机碳充足时,反硝化过程进行彻底,最终产物以 N_2 为主, N_2O/D_N 比值较低. 本研究结论与其不同(表 2),这可能与厌氧氨氧化有关. 厌氧氨氧化细菌在碳源不足时会与反硝化细菌竞争碳源,特别 C/N 比值低于 2 的环境更有利于厌氧氨氧化细菌的生存^[27,34]. 当碳氮比超过 10:1 时, N_2O/D_N 反而降低. 这主要是由于果园长期的高氮投入使得微生物适应低碳氮比环境,添加的有机碳能促进高氮环境下的硝化与反硝化作用,但过高的碳浓度反而会降低 N_2O 的排放. 由此可见,淹水条件下添加适量有机碳在消纳土壤中硝态氮的同时,也排放了大量的 N_2O .

3.3 碳源添加对反硝化和 N_2O 速率影响的机制

土壤中硝化和反硝化过程主要是微生物过程,而土壤微生物硝化与反硝化需要从有机质中获得基质和能量. 有机碳矿化能为微生物活动提供这些基质和能量. 如图 4,分别为果园排水沟道土壤 N_2O 排放速率与 CO_2 释放速率、土壤 D_N 与 CO_2 释放速率间的关系. 从中可知, N_2O 排放速率、 D_N 与 CO_2 排放均呈正相关关系($n = 15$).

4 结论

(1) 碳源的输入激发了土壤的硝化与反硝化作用,明显地促进了 N_2O 排放速率和 D_N ,各碳梯度处理下的 N_2O 排放速率和 D_N 均比对照组要高;且在不同碳梯度处理下, N_2O 排放速率和 D_N 均差异显著;有机碳矿化速率与 D_N 、 N_2O 排放速率成正相关关系.

(2) 不同浓度碳源的加入明显影响了 N_2O/D_N . 培养结束时,各处理下的 N_2O 累积排放量/反硝化累积排放量差异较大,介于 0.41% ~ 1.94%;碳氮比为 10:1 时,累积反硝化损失总量和 N_2O 累积排放总量均较大,占净氮的输入量比例均较高,说明该处理情况下虽然对于沟道反硝化非常有利,利于去除土壤底泥中富集的氮素,但同时也增加了温室气体 N_2O 的排放.

参考文献:

- [1] 李英臣, 宋长春, 刘德燕, 等. 不同氮输入梯度下草甸沼泽土反硝化损失和 N_2O 排放[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(9): 1103-1107.
- [2] Firestone M K. Biological denitrification[A]. In: Stevenson FJ (Eds.). Nitrogen in Agricultural Soils [M]. Agronomy Monograph No. 22. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, 1982. 289-326.
- [3] 刘阳, 张金波, 蔡祖聪. 硝态氮浓度对亚热带土壤反硝化潜力和产物组成的影响[J]. 土壤, 2013, **45**(5): 815-820.
- [4] 吕海霞, 周鑫斌, 张金波, 等. 长白山 4 种森林土壤反硝化潜力及产物组成[J]. 土壤学报, 2011, **48**(1): 39-46.
- [5] Payne W J. Denitrification[M]. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [6] Knowles R. Denitrification[J]. Microbiological Reviews, 1982, **46**(1): 43-70.
- [7] Sala O E, Chapin III F S, Armesto J J, et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100 [J]. Science, 2000, **287** (5459): 1770-1774.
- [8] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands [J]. Science, 2004, **303**(5665): 1876-1879.
- [9] Richter Jr D D, Markewitz D. Understanding soil change: soil sustainability over millennia, centuries, and decades [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 182-205.
- [10] Bouwman A F. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere[A]. In: Bouwman A F (Eds.). Proceedings of the International Conference on Soils and the Greenhouse Effect[C]. Chichester: John Wiley, 1990. 61-127.
- [11] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: the scientific basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 251-253.
- [12] Zimmerman A R, Benner R. Denitrification, Nutrient regeneration and carbon mineralization in sediments of Galveston Bay, Texas, USA [J]. Marine Ecology Progress Series, 1994, **114**: 275-288.
- [13] Herman K S, Bouchard V, Moore R H. Factors affecting denitrification in agricultural headwater streams in Northeast Ohio, USA [J]. Hydrobiologia, 2008, **598**(1): 305-314.
- [14] 谢文明, 于飞, 冯晓宇, 等. 太湖流域农村地区典型村镇土壤养分和水体污染现状调查[J]. 土壤, 2014, **46**(4): 613-617.
- [15] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(1): 38-42.
- [16] Walter H M, Keeney D R, Fillery I R. Inhibition of nitrification by acetylene [J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, **43**(1): 195-196.
- [17] 孙志高, 刘景双, 杨继松, 等. 三江平原典型小叶章湿地土壤硝化-反硝化作用与氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(1): 185-192.
- [18] Seitzinger S P. Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: ecological and geochemical significance [J]. Limnology and Oceanography, 1988, **33**(4 Part 2): 702-724.
- [19] 刘晶晶, 汪苹, 王欢. 一株异养硝化-好氧反硝化菌的脱氮性能研究[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(3): 121-125.
- [20] Dong L F, Thornton D C O, Nedwell D B, et al. Denitrification in sediments of the River Colne Estuary, England [J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, **203**: 109-122.

- [21] 杨新萍, 钟磊, 周立祥. 有机碳源及 DO 对好氧反硝化细菌 AD6 脱氮性能的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1633-1639.
- [22] Velthof G L, Jarvis S C, Stein A, *et al.* Spatial variability of nitrous oxide fluxes in mown and grazed grasslands on a poorly drained clay soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, **28**(9): 1215-1225.
- [23] 耿远波, 章申, 董云社, 等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性[J]. 地理学报, 2001, **56**(1): 44-53.
- [24] Baggs E M, Rees R M, Smith K A, *et al.* Nitrous oxide emission from soils after incorporating crop residues [J]. Soil Use and Management, 2000, **16**(2): 82-87.
- [25] Kaewpradit W, Toomsan B, Vityakon P, *et al.* Regulating mineral N release and greenhouse gas emissions by mixing groundnut residues and rice straw under field conditions [J]. European Journal of Soil Science, 2008, **59**(4): 640-652.
- [26] Senbayram M, Chen R, Budai A, *et al.* N_2O emission and the $N_2O/(N_2O + N_2)$ product ratio of denitrification as controlled by available carbon substrates and nitrate concentrations [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, **147**: 4-12.
- [27] 陈诺, 廖婷婷, 王睿, 等. 碳底物含量对厌氧条件下水稻土 N_2 、 N_2O 、 NO 、 CO_2 和 CH_4 排放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3595-3604.
- [28] 李英臣, 宋长春, 刘德燕, 等. 草甸沼泽土壤硝化—反硝化作用和有机碳矿化对氮输入响应[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(3): 135-138, 157.
- [29] Bauhus J, Meyer A C, Brumme R. Effect of the inhibitors nitrapyrin and sodium chlorate on nitrification and N_2O formation in an acid forest soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, **22**(4): 318-325.
- [30] Wolf I, Russow R. Different pathways of formation of N_2O , N_2 and NO in black earth soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(2): 229-239.
- [31] Beauchamp E G, Trevors J T, Paul J W. Carbon sources for bacterial denitrification [J]. Advances in Soil Science, 1989, **10**: 113-142.
- [32] Miller M N, Zebarth B J, Dandie C E, *et al.* Crop residue influence on denitrification, N_2O emissions and denitrifier community abundance in soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(10): 2553-2562.
- [33] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(23): 4844-4853.
- [34] Hu Z Y, Lotti T, van Loosdrecht M, *et al.* Nitrogen removal with the anaerobic ammonium oxidation process [J]. Biotechnology Letters, 2013, **35**(8): 1145-1154.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyip, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	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	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行