

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)

北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘水桥, 赵清 (2501)

上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)

天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)

典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)

霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)

宁东能源化工基地大气 PM_{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 刘攀亮, 剧媛丽, 毛满萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)

北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)

江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)

亚热带稻区大气 NO₂、HNO₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)

长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)

基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)

青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)

鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)

三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)

水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容 (2657)

水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)

合流制面源污染传输过程与污染源解析 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)

强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果 段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)

水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)

巢湖十五里河沉积物磷吸附潜力及对外源碳的响应 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈志 (2730)

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 王慎, 张思思, 许允, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)

针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)

改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)

碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)

好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)

快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)

生物炭对潜流人工湿地污染物去除及NO_x排放影响 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田N₂O排放的影响及其微生物机制 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)

西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)

基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)

喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁 (2904)

秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)

生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)

稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氮氧化过程 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)

纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氮氧化速率的影响 伍玲丽, 张旭, 舒昆慧, 张丽, 司友斌 (2939)

农田沟道土壤中锰氨氧化(Mn-ANAMMOX)过程的探究 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮琛, 陈志浩 (2948)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)

《环境科学》征订启事(2929) 《环境科学》征稿简则(2947) 信息(2646, 2656, 2857)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响

吴颖, 黄魁*, 夏慧, 陈景阳

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要: 抗生素常积聚于脱水污泥中, 其含量可影响污泥蚯蚓粪的氮肥价值. 本研究通过向城市污泥中添加不同浓度四环素(0、100、500和1 000 mg·kg⁻¹), 比较四环素含量对污泥蚯蚓堆肥过程中的硝化速率、氨氧化菌群结构和丰度的影响, 揭示四环素对污泥蚯蚓堆肥中氨氧化作用的影响机制. 结果表明, 高含量四环素(1 000 mg·kg⁻¹)显著抑制污泥蚯蚓堆肥过程的硝化速率($P < 0.05$), 但低含量四环素对硝化速率的影响并不显著. 相比于氨氧化细菌(AOB), 污泥蚯蚓堆肥中氨氧化古菌(AOA)为氨氧化作用的主导者. 低含量四环素(100 mg·kg⁻¹)能显著提升氨氧化菌群 *amoA* 基因的丰度($P < 0.05$); 但随着四环素剂量增加, 其对 *amoA* 基因的丰度有显著的抑制作用($P < 0.05$). 高通量测序结果表明, 添加四环素改变了 AOA 和 AOB 的种群多样性及其结构, 且 AOA 的 α 多样性和四环素含量之间呈负相关关系.

关键词: 四环素; 蚯蚓堆肥; 污泥; 氨氧化细菌; 氨氧化古菌; 硝化作用

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2954-07 DOI: 10.13227/j.hjcx.201810023

Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting

WU Ying, HUANG Kui*, XIA Hui, CHENG Jing-yang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Dewatered sludge often contains abundant antibiotics, and such contaminants can potentially affect the nitrogen fertilizer value of sludge-derived vermicompost. For this purpose, the aims of this study were to investigate the effects of different tetracycline concentrations in sludge on the nitrification rate and abundance and community characteristics of ammonia oxidizers during vermicomposting. Four sludge treatments with different concentrations of tetracycline (0, 100, 500, and 1 000 mg·kg⁻¹) were used, and data were collected to reveal the mechanism regarding the ammonia oxidation of sludge in the vermicomposting system. The results showed that the high concentration of tetracycline (1 000 mg·kg⁻¹) significantly inhibited the nitrification rate of vermicomposting ($P < 0.05$), but no significant effect was observed in the low concentration treatments. Compared with ammonia-oxidizing bacteria (AOB), ammonia oxidizing archaea (AOA) were detected as the dominant microorganisms involved in the ammonia oxidation process during vermicomposting. In addition, the abundances of *amoA* genes were significantly elevated ($P < 0.05$) in the treatments with 100 mg·kg⁻¹ tetracycline, but values significantly decreased with the further increments of tetracycline concentrations ($P < 0.05$). The results obtained from high-throughput sequencing revealed that the community diversity and structure of AOA and AOB were strongly modified by tetracycline concentrations, and a negative correlation relationship was detected between the tetracycline concentrations and the α diversity of AOA.

Key words: tetracycline; vermicomposting; sludge; ammonia oxidizing bacteria (AOA); ammonia oxidizing archaea (AOB); nitrification

四环素(Tetracycline)作为一种广谱性抗生素被广泛用于临床医学和动物生长促进剂^[1]. 检测结果表明动物排泄物中仍含有60%~90%的四环素^[2], 致使环境中残留大量的四环素, 形成新的污染物; 特别是其还会导致耐药菌的产生, 危害人类的健康^[3]. 污泥作为污水处理的终端副产物, 污水中蓄积的四环素亦会富集在污泥中^[4], 影响其最终处置^[4~6].

蚯蚓堆肥技术是一项绿色可持续的污泥资源化技术. 有研究表明蚯蚓的活动可显著提高污泥减量化的效果、加快污泥稳定化的过程^[7]; 且其堆肥产物(蚯蚓粪)富含植物可利用的氮磷钾以及多元化的农业益生菌, 被誉为是有机肥中的黄金^[8]. 硝化作用是污泥蚯蚓堆肥氮素转化的重要途径之一, 也

是评价堆肥稳定化的重要指标之一^[7,9]. 氨氧化古菌和细菌(AOA和AOB)是氨氧化过程的主导者, 决定了硝化作用的速率^[10,11]. 有研究表明, AOA和AOB的活力与其生长的环境条件(pH、温度、有机质、有毒有害物质等)密切相关^[10,12]. 相关学者研究证实抗生素如四环素^[13]、罗红霉素^[14]的含量显著影响活性污泥中AOA和AOB的丰度和种群结构, 进而影响硝化速率. 因此, 污泥中每日变化的四环素含量亦可能会对蚯蚓堆肥氨氧化微生物产生

收稿日期: 2018-10-08; 修订日期: 2018-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568035, 51868036); 甘肃省自然科学基金项目(17JR5RA104); 兰州交通大学百人计划项目

作者简介: 吴颖(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水生物处理技术, E-mail: a9654767@163.com

* 通信作者, E-mail: huangkui@mail.lzjtu.cn

一定的影响, 进而影响污泥蚯蚓粪肥的利用价值。然而, 国内外学者对此研究较少。

本研究通过在城市污泥中添加不同含量的四环素, 揭示其对蚯蚓堆肥过程的硝化速率、氨氧化微生物的丰度和群落结构的影响, 旨在为明确四环素对氨氧化过程的影响机制以及提升污泥蚯蚓粪的利用价值。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选用赤子爱胜蚓 (*Eisenia foetida*) 作为堆肥蚯蚓。实验前用新鲜污泥进行驯化, 而后随机挑选健康有活力的蚯蚓进行堆肥实验。选用底部开孔的长方形塑料箱 (长 46 cm × 宽 17 cm × 高 13 cm) 作为蚯蚓堆肥反应器。脱水污泥取自兰州市安宁七里河污水处理厂的污泥脱水车间。随后将新鲜污泥用铁丝网制成粒径为 5 mm 的污泥颗粒。供试污泥理化性质如下: pH 为 6.8, 含水率为 78.4%, 有机质为 66%, 硝氮为 0 mg·L⁻¹, 总氮为 60.97 g·kg⁻¹, 四环素含量为 3.68 mg·kg⁻¹。四环素采用分析纯 (99.9%, Ruibio, 德国)。

1.2 实验方法

有研究表明, 粪肥中四环素含量高达 327 mg·kg⁻¹[15], 同时蚯蚓也会对污泥中的四环素有一定的吸收作用, 因此本实验分别向 4 kg 新鲜颗粒污泥中投加 0、400、2 000 和 4 000 mg 的四环素粉末。分别均匀搅拌后, 再次造粒, 投入各反应器作为供试基质, 形成 0、100、500 和 1 000 mg·kg⁻¹ 这 4 个处理, 其分别用 A0、A1、A5 和 A10 表示。随后向各反应器内接种 100 条体重为 0.3 ~ 0.4 g 的赤子爱胜蚓进行蚯蚓堆肥。各处理均设置 3 组平行。反应器上覆盖保鲜膜, 每隔一周喷洒自来水以保持湿度。蚯蚓堆肥实验在室温下进行 60 d。实验结束后, 取出堆肥样品, 剔除蚯蚓及其卵。所取样品一式两份, 一份自然风干后研磨过 80 目筛, 置于 4℃ 冷藏保存; 另一份保存在 -20℃ 的冰箱中。

1.3 分析方法

1.3.1 理化性质分析

参考市政污水处理厂国标测定方法对样品进行理化性质分析 (CJ/T 221-2005)。将干样与去离子水 (干样/水 = 1 g/50 mL) 均匀混合后测定 pH 值 (雷磁 PHS-3C, 中国) 以及电导率 (雷磁 DJS-1, 中国)。上述混合液稀释 20 倍后, 过 0.45 μm 滤膜, 用离子色谱仪 (岛津, 日本) 测定硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐以及磷酸盐。总碳和总氮采用元素分析仪

测定 (Yanaco CHN CORDER MT-6, 日本)。四环素利用高效液相色谱仪 (岛津, 日本) 测定 [16]。

1.3.2 DNA 提取和荧光定量 PCR

将平行样品混合, 用 DNeasy® Power Soil® Kit (QIAGEN, 德国) 试剂盒提取总 DNA。采用高通量荧光定量 PCR 仪 (ABI, VIIA@7, 美国) 对 AOA 和 AOB 的 *amoA* 基因拷贝数进行测定。AOB 的正向引物 (5'-GGGGTTTCTACTGGTGGT-3'), 反向引物 (5'-CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC-3'); AOA 的正向引物 (5'-ATGCTCTGGCTWAGACG-3'), 反向引物 (5'-GCCATCCATCTGTATGTCCA-3')。10 μL 的荧光定量 PCR 体系为: 5 μL 的荧光染料 Roche FastStart Universal SYBR Green Master (ROX), 10 μmol 上下游引物各 0.75 μL, DNA 模板 0.5 μL, DNA-free 超纯水 3 μL。反应条件为: 95℃ 预变性 10 min; 95℃ 变性 15 s, 60℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 30 s, 均进行 40 个循环。采用合成的质粒作为标准曲线, 克隆载体: PUC57。用 DNA-free 超纯水作为阴性对照, 每个样品做 3 次重复。

1.3.3 PCR 和高通量测序

采用融合了 Illumina 测序平台的氨氧化细菌的引物 *amoA*-1F (5'-GGGGTTTCTACTGGTGGT-3') 和 *amoA*-2R (5'-CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC-3'), 以及氨氧化古菌的引物 Arch-*amoA*F (5'-STAATGGTCTGGCTTAGACG-3') 和 Arch-*amoA* (5'-RGCGGCCATCCATCTGTATGT-3'), 进行 PCR 扩增。高保真酶采用 Phusion High-Fidelity PCR Master Mix with HF Buffer (New England Biolabs, 美国)。50 μL PCR 反应体系为: 25 μL 的 Mix Buffer, 3 μL DMSO, 1 μmol 上下游引物共 3 μL, 5 ng·μL⁻¹ 的 DNA 模板 10 μL, DNA-free 超纯水 9 μL。PCR 反应条件: 98℃ 预变性 30 s; 98℃ 变性 15 s, 58℃ 退火 15 s, 72℃ 延伸 15 s, 均进行 30 个循环; 72℃ 终延伸 1 min。PCR 产物用 2% 琼脂糖凝胶电泳后, 利用 AXYGEN Gel Extraction Kit (250) (Axygen, 美国) 胶回收试剂盒对其回收。用 Qubit dsDNA HS Assay Kit (ThermoFisher, 美国) 对回收的文库进行定量并检测后, 用高通量测序仪 (X-10, Illumina) 测序。测序结果用 Cutadapt 软件对低质量部分剪切后, 序列通过 UCHIME Algorithm 和数据库 Gold database 进行比对, 检测嵌合体序列, 最终得到有效的测序数据。

1.3.4 数据处理

硝化速率用每日硝氮生成率表示。采用 STATISTICA 10.0 进行不同处理间显著性差异分析以及主成分分析, 显著性水平为 0.05。使用 MEGA

7.0 软件对氨氧化微生物 DNA 测序数据进行聚类,并用 HemI 1.0 软件进行物种丰度分析. AOA 和 AOB 的测序结果分别上传至 DDBJ 数据库,并分配序列号 LC379797 ~ LC379872 和 LC379974 ~ LC379989. 香农-威纳(Shannon-Wiener)多样性指数以及辛普森(Simpson)多样性指数计算方式见文献[17].

2 结果与讨论

2.1 四环素对污泥蚯蚓堆肥硝化速率的影响

如图 1 所示,随着四环素含量的增加,污泥蚯蚓堆肥系统的硝化速率呈现先增后减的变化趋势.与 A0 相比,A1、A5 的硝化速率均略有提升,但不显著($P > 0.05$);而 A10 的硝化速率显著降低了 20.23% ($P < 0.05$).这一结果表明,低含量四环素在一定程度上可提升污泥蚯蚓堆肥过程的硝化速率,而高含量四环素对硝化速率有显著抑制作用.实验发现,A1、A0、A5 和 A10 组中蚯蚓生物量增长率分别为 5.3、3.3、3.0 和 1.8 $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$,因此 A1 组最高的硝化速率可能与其较高的蚯蚓生物量有直接关系.本研究中低含量四环素刺激生长,可能与四环素作为动物生长剂有关[18].李娟英等[13]的研究表明四环素类和磺胺类抗生素对活性污泥的硝化速率均有抑制作用,含量越高抑制作用越强.Zhang 等[19]的研究表明低含量(5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)的四环素和磺胺甲噁唑对活性污泥氨氮的去除效率没有显著抑制作用,而高含量(10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的抗生素可显著降低($P < 0.05$)污泥氨氮的去除率.但本实验发现对硝化速率有显著抑制作用的抗生素含量要达到 1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其含量远高于其他学者的研究.这可能是由于蚯蚓的存在可在一定程度上降解四环素,分担了抗生素对微生物的抑制作用[20].同

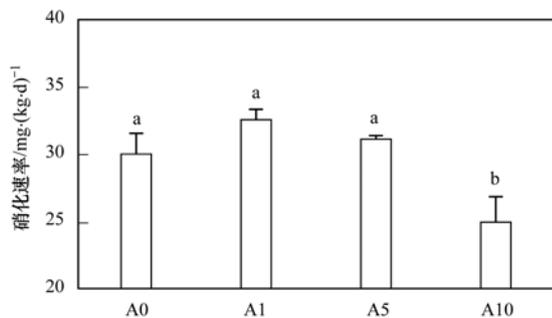


图 1 四环素含量对污泥蚯蚓堆肥硝化速率的影响
A0、A1、A5 和 A10 分别表示四环素添加含量为 0、100、500 和 1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,下同;相同的小写字母表示各组之间无显著性差异($P > 0.05$)

图 1 四环素含量对污泥蚯蚓堆肥硝化速率的影响

Fig. 1 Effects of tetracycline concentrations on the nitrification rate of sludge vermicomposting

时也跟污泥蚯蚓堆肥中的氨氧化菌群的耐药性有关.Huang 等[21]发现污泥蚯蚓堆肥系统中含有大量的四环素抗性基因.

2.2 四环素对 *amoA* 基因数量的影响

由表 1 可知,污泥蚯蚓堆肥过程中 AOA 的 *amoA* 基因数量均显著高于 AOB 的 *amoA* 基因数量,且 AOA/AOB 的值为 $2.26 \times 10^3 \sim 7.56 \times 10^3$,说明污泥蚯蚓堆肥硝化过程中 AOA 占主导地位.Huang 等[9]的研究也发现 AOA 在果蔬蚯蚓堆肥体系氨氧化过程中占据主导地位.与 A0 相比,A1 中 AOA 和 AOB 数量分别显著增加了 50.17% 和 65.11% ($P < 0.05$),说明低含量的四环素可以增加蚯蚓污泥堆肥中的 *amoA* 基因数量.这可能是因为 AOA 和 AOB 可将低含量的四环素作为碳源和氮源吸收利用[22],从而提升 AOA 和 AOB 的数量.A1 中较高的蚯蚓生物量也是其丰度显著增加的原因;曹佳等[23]发现蚯蚓做穴、排粪等活动会改善微生物的生存环境,从而促进微生物生长;Huang 等[9]也发现蚯蚓可显著提升果蔬堆肥体中 AOA 和 AOB 的数量.

相比而言,A10 与 A0 的结果无显著性差异($P > 0.05$).然而,A5 组的 AOA 及 AOB 数量较 A0 相比分别显著下降了 50.67% 和 76.96% ($P < 0.05$).本研究发现,A0、A1、A5 和 A10 的磷酸盐含量分别为 107.98、124.85、151.21 和 118.57 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.相比而言,A5 组的较高的磷酸盐含量可能是导致 *amoA* 基因数量发生变化的原因.Herfort 等[24]的研究表明高含量的磷酸盐会降低北海中泉 AOA 的 *amoA* 基因数量;同时程林等[25]的研究也发现氮肥会增加 AOB 的多样性,而磷肥则会使 AOB 的多样性降低.本研究 A5 中较低的 *amoA* 基因数量而表现出较高的硝化速率可能与反应体系的环境因子以及 AOA 和 AOB 的种群多样性有关.

表 1 四环素含量对污泥蚯蚓堆肥中 AOA 和 AOB 基因数量的影响¹⁾

样品名称	AOA <i>amoA</i> 基因数量 $\times 10^6/\text{copies}\cdot\text{g}^{-1}$	AOB <i>amoA</i> 基因数量 $\times 10^3/\text{copies}\cdot\text{g}^{-1}$
IS	0.002 ± 0.001	ND
A0	12.40 ± 1.08 a	3.04 ± 0.78 a
A1	25.70 ± 1.35 b	10.00 ± 0.95 b
A5	6.50 ± 0.15 c	0.86 ± 0.02 c
A10	10.50 ± 0.41 a	4.27 ± 0.56 a

1) IS 表示初始污泥,下同;同一列相同的小写字母表示各组之间无显著性差异($P > 0.05$);ND 表示未检出

2.3 四环素对 AOA 和 AOB 群落多样性的影响

一般而言,Shannon 指数越大表示物种多样性

越高, Simpson 指数越大表示物种间均匀度越好。由表 2 可见, AOA 的 Shannon 指数和 Simpson 指数均随四环素含量的升高而降低, 说明高含量的四环素会降低 AOA 的多样性。相比于 A0 中的 AOB, A1 中的 Shannon 和 Simpson 指数均有所下降; 而 A5 和 A10 的 Shannon 和 Simpson 指数均升高。本研究结果和高景峰的相似^[14]。

表 2 四环素含量对污泥蚯蚓堆肥中 AOA 和 AOB 的 α 多样性的影响

Table 2 Effects of tetracycline concentrations on the α diversities of AOA and AOB during sludge vermicomposting

样品名称	Shannon 指数		Simpson 指数	
	AOA	AOB	AOA	AOB
IS	1.66	1.42	0.68	0.64
A0	1.92	1.51	0.75	0.63
A1	1.67	1.39	0.68	0.59
A5	1.50	1.82	0.64	0.79
A10	1.48	1.70	0.63	0.72

AOA 和 AOB 的 β 多样性见图 2。如图 2(a) 所示, A1 与 A0 在第一主成分轴上呈正相关关系, 且同处第四象限, 表明二者的 AOA 种群结构差异较

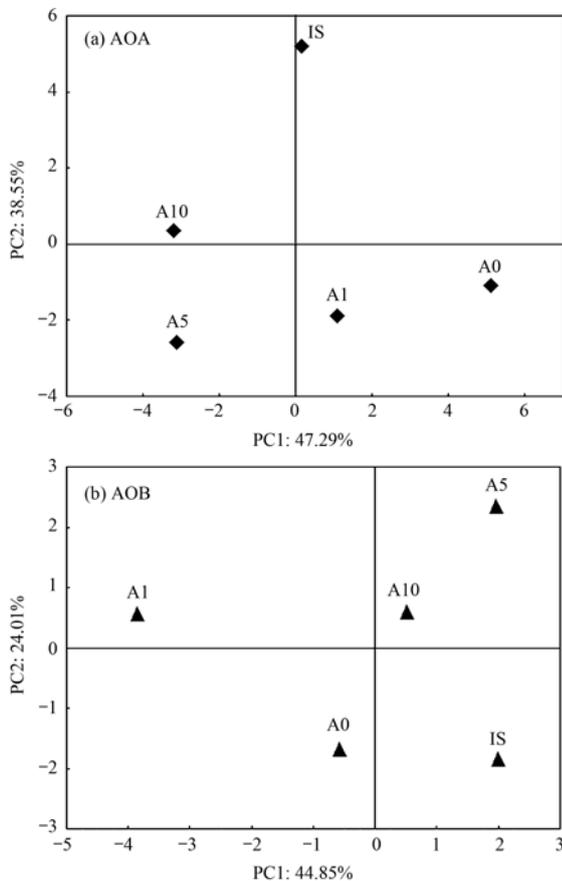


图 2 基于主成分分析的四环素含量对污泥蚯蚓堆肥中 AOA 和 AOB 的 β 多样性的影响

Fig. 2 Effects of tetracycline concentrations on the β diversity of AOA and AOB during sludge vermicomposting as assessed by principal component analysis

小。说明低含量四环素对 AOA 的种群结构影响较弱。但 A10 和 A5 则与 A0 在第一主成分上表现出负相关关系, 表明高含量四环素对 AOA 的群落结构影响较大。另外, 从 AOB 主成分分析结果看出 [图 2(b)], A10 和 A5 在第一、二主成分上均和 A0 呈负相关关系, 说明高含量四环素对二者的 AOB 群落结构影响较大。A1 在第二主成分轴上与 A0 呈负相关关系, 且距离较远, 表明低含量亦对 AOB 的群落结构有较强的影响。因此, 相比于 AOA, AOB 的群落结构可能对四环素的响应更为敏感, 这可能与蚯蚓堆肥体中 AOA 对抗生素的耐药性强于 AOB 有关^[26]。

2.4 四环素对 AOA 和 AOB 的群落组成的影响

由 AOB 聚类结果可知 [图 3(a)], 污泥蚯蚓堆肥中的 AOB 包含亚硝化螺菌属 (*Nitrosospira*) 以及亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*) 两大类。Huang 等^[9]在果蔬蚯蚓堆肥体系中也检测到相同的 AOB 类群。另外, 仅有 3 个 OTU (OTU2、OTU3 和 OTU4) 属于亚硝化单胞菌属, 其它 OTU 均属亚硝化螺菌属, 说明亚硝化螺菌属在 AOB 中占主导地位。由 OTU 热图可见 [图 3(b)], OTU2 的丰度最高, 表明其为污泥蚯蚓堆肥系统中最具有优势的 AOB 菌种。与 A0 相比, A1 中 OTU2、OTU4 及 OTU3 的丰度较 A0 分别提升了 5.45%、53.04% 和 41.98%, 说明低含量四环素可提升亚硝化单胞菌属的丰度。亚硝化单胞菌属为革兰氏阴性细菌, 可将 CO₂ 和有机物作为碳源, 混合营养生长^[27]。

对于亚硝化螺菌属而言, A5 和 A10 的丰度比 A0 的分别下降了 1.26% ~ 92.58% 和 1.40% ~ 77.36%, 可见高含量四环素能降低亚硝化螺菌属的丰度。同时, 与 A0 相比, OTU10 和 OTU13 在 A1 处理后丰度分别提升了 74.3% 和 22.94%, 说明低含量四环素可选择性提升亚硝化螺菌的丰度。但 Du 等^[6]的研究表明, 低含量四环素 (5 mg·L⁻¹) 的加入会使活性污泥中亚硝化螺菌的生长受到抑制。而本研究中的选择性提升可能是与引入了蚯蚓有利于硝化细菌的生长有关^[7]。同时 Huang 等^[9]发现蚯蚓的引入增加了亚硝化螺菌属的丰度。这与本研究的结果一致。

已有研究表明, AOA 可划分为海洋类群 group I. 1a 及 group I. 1a-associated、土壤类群 group I. 1b 和嗜热型 ThAOA 这 4 个类群^[28]。如 AOA 聚类树所示 [图 4(a)], 污泥蚯蚓堆肥中可将 AOA 分为两大类: group I. 1b 和 group I. 1a。在所有的 OTU 中, 有 18 个归类为 group I. 1b, 可见其为污泥蚯蚓堆肥中的 AOA 优势菌属。由物种丰度热图可知 [图 4

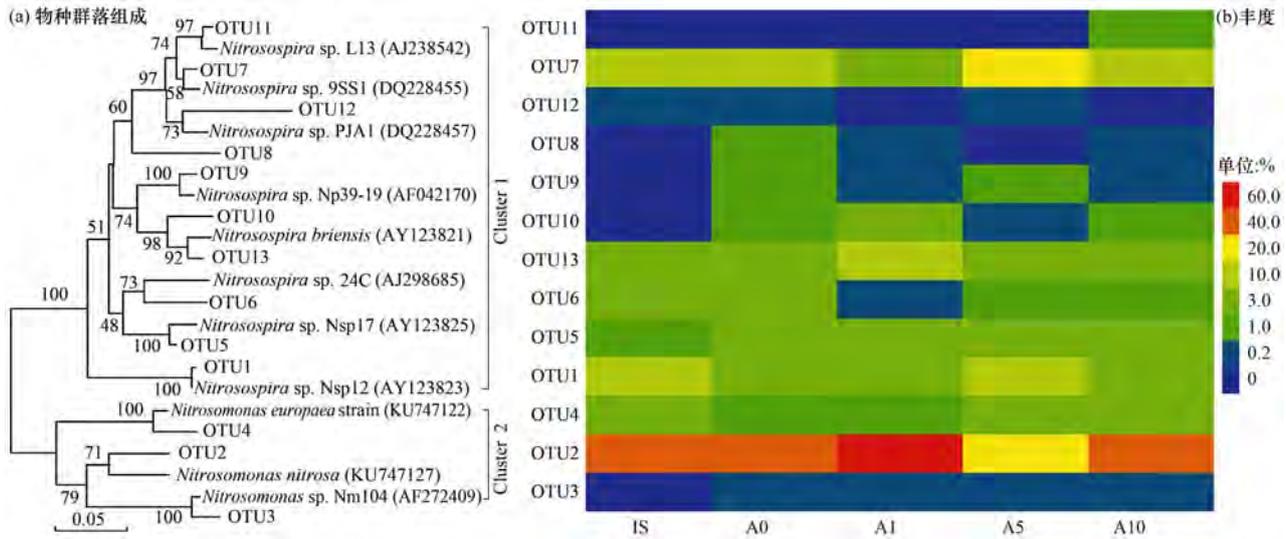


图 3 四环素含量对污泥蚯蚓堆肥中 AOB 物种群落组成及丰度的影响

Fig. 3 Effects of tetracycline concentrations on the community composition and abundance of AOB during sludge vermicomposting

(b)], OTU8 为极优势菌种, 属 *Nitrososphaera*; 且随着四环素含量的升高, OTU8 的丰度逐渐增加. 相比之下, 同属的 OTU22、OTU4、OTU25、OTU2、OTU6 和 OTU17 均有类似的现象, 表明高含量的四环素可以增加 *Nitrososphaera* 的丰度. *Nitrososphaera* 存在于土壤及低盐环境中^[29], 是酸性土壤中 AOA 在氨氧化过程中的主要参与者.

Nitrososphaera 与 *Candidatus Nitrososphaera gargensis* 是同一属下的不同种菌类, 均归类为古菌

土壤类群 group I. 1b. 与其不同的是, 同属 *Candidatus Nitrososphaera gargensis* 的 OTU13 和 OTU11 为化能自养型 AOA^[30], 随着四环素含量的增加, 其丰度均呈下降趋势. 另外, OTU21、OTU7、OTU16、OTU23 及 OTU3 均属奇古菌门 Thaumarchaeota, 自养生长^[31]; 随着四环素含量的增加, 其丰度均呈下降趋势, 说明高含量四环素可降低 Thaumarchaeota 的丰度. 因此, 可推测四环素对自养型 AOA 有一定的抑制作用. 抗生素的加入

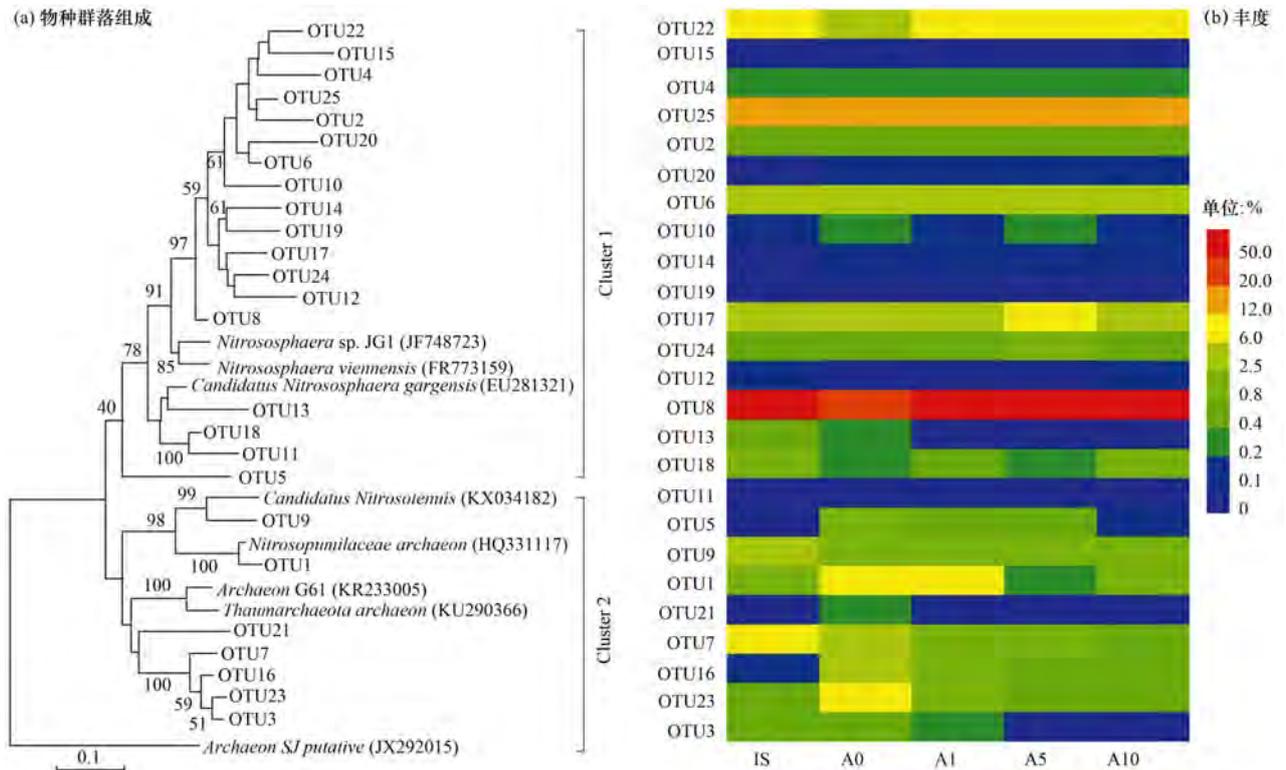


图 4 四环素含量对污泥蚯蚓堆肥中 AOA 物种群落组成及丰度的影响

Fig. 4 Effects of tetracycline concentrations on the community structure and abundance of AOA during sludge vermicomposting

致使微生物所处的环境体系以及生长所需碳源和氮源发生变化,降低微生物对碳源和氮源的利用能力^[32]。但对于四环素如何改变堆肥环境,抑制自养 AOA, 仍需进一步研究。

3 结论

(1) 四环素含量对污泥蚯蚓堆肥体中的 AOA 和 AOB 的归趋呈现出不同的影响模式。

(2) 高含量四环素降低氨氧化主导者 AOA 的种群多样性和改变其种群结构,抑制污泥蚯蚓堆肥体中的硝化速率。

(3) 低含量四环素显著增加污泥蚯蚓堆肥中 AOA 和 AOB 的数量,提升污泥蚯蚓堆肥过程的硝化速率。

参考文献:

- [1] 王薇佳, 杜云峰, 张华, 等. 四环素对水体硝化作用的影响[J]. 环境与健康杂志, 2012, **29**(10): 926-928.
Wang W J, Du Y F, Zhang H, *et al.* Effect of tetracycline on nitrification of water body [J]. Journal of Environment and Health, 2012, **29**(10): 926-928.
- [2] Halling-Sørensen B, Nielsen S N, Lanzky P F, *et al.* Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment-A review[J]. Chemosphere, 1998, **36**(2): 357-393.
- [3] 杨晓芳, 杨涛, 王莹, 等. 四环素类抗生素污染现状及其环境行为研究进展[J]. 环境工程, 2014, **32**(2): 123-127.
Yang X F, Yang T, Wang Y, *et al.* Research progress in pollution status and environmental behavior of tetracycline antibiotics[J]. Environmental Engineering, 2014, **32**(2): 123-127.
- [4] 韦蓓, 黄福义, 苏建强. 堆肥对污泥中四环素类抗生素及抗性基因的影响[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(12): 5431-5438.
Wei B, Huang F Y, Su J Q. Effect of composting on tetracyclines and tetracycline resistance genes in sewage sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(12): 5431-5438.
- [5] 张滢樾, 耿金菊, 任洪强, 等. 环境浓度抗生素选择性压力改变活性污泥微生物群落结构[J]. 生态毒理学报, 2015, **10**(5): 66-74.
Zhang Y Y, Geng J J, Ren H Q, *et al.* Environmental concentration antibiotic selection pressure changed microbial community composition of activated sludge[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, **10**(5): 66-74.
- [6] Du B B, Wang R F, Yang Q X, *et al.* Impact of tetracycline on the performance and abundance of functional bacteria of a lab-scale anaerobic-aerobic wastewater treatment system [J]. Biochemical Engineering Journal, 2018, **138**: 98-105.
- [7] 孙文, 邢美燕, 杨健, 等. 污泥蚯蚓堆肥研究进展[J]. 环境工程, 2015, **33**(10): 90-94.
Sun W, Xing M Y, Yang J, *et al.* Research progress on vermicomposting of sludge [J]. Environmental Engineering, 2015, **33**(10): 90-94.
- [8] Adhikary S. Vermicompost, the story of organic gold: A review [J]. Agricultural Sciences, 2012, **3**(7): 24396.
- [9] Huang K, Xia H, Cui G Y, *et al.* Effects of earthworms on

- nitrification and ammonia oxidizers in vermicomposting systems for recycling of fruit and vegetable wastes [J]. Science of the Total Environment, 2017, **578**: 337-345.
- [10] 贺纪正, 张丽梅. 氨氧化微生物生态学与氮循环研究进展[J]. 生态学报, 2009, **29**(1): 406-415.
He J Z, Zhang L M. Advances in ammonia-oxidizing microorganisms and global nitrogen cycle [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, **29**(1): 406-415.
- [11] 王亚男, 曾希柏, 王玉忠, 等. 施肥模式对设施菜地根际土壤微生物群落结构和丰度的影响[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(3): 826-834.
Wang Y N, Zeng X B, Wang Y Z, *et al.* Effects of different fertilization regimes on community structure and abundance of soil microorganisms in greenhouse vegetable rhizosphere soils [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(3): 826-834.
- [12] 于少兰, 乔延路, 韩彦琼, 等. 好氧氨氧化微生物系统发育及生理生态学差异[J]. 微生物学通报, 2015, **42**(12): 2457-2465.
Yu S L, Qiao Y L, Han Y Q, *et al.* Differences between ammonia-oxidizing microorganisms in phylogeny and physiological ecology [J]. Microbiology China, 2015, **42**(12): 2457-2465.
- [13] 李娟英, 胡谦, 陈美娜, 等. 抗生素类污染物对硝化污泥的生物抑制[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(7): 3325-3331.
Li J Y, Hu Q, Chen M N, *et al.* Inhibition of selected antibiotics on nitrifying sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(7): 3325-3331.
- [14] 高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 等. 罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2961-2971.
Gao J F, Sun L X, Fan X Y, *et al.* Short-term effect of roxithromycin on abundance and diversity of ammonia-oxidizing microorganisms in activated sludge [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2961-2971.
- [15] 曾巧云, 丁丹, 檀笑. 中国农业土壤中四环素类抗生素污染现状及来源研究进展[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(9): 1774-1782.
Zeng Q Y, Ding D, Tan X. Pollution status and sources of tetracycline antibiotics in agricultural soil in China; a review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(9): 1774-1782.
- [16] 冀秀玲, 刘芳, 沈群辉, 等. 养殖场废水中磺胺类和四环素抗生素及其抗性基因的定量检测[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(5): 927-933.
Ji X L, Liu F, Shen Q H, *et al.* Quantitative detection of sulfonamides and tetracycline antibiotics and resistance genes in sewage farms [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(5): 927-933.
- [17] 杨莉琳, 毛任钊, 刘俊杰, 等. 土地利用变化对土壤硝化及氨氧化细菌区系的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3455-3460.
Yang L L, Mao R Z, Liu J J, *et al.* Impact of land-use type changes on soil nitrification and ammonia-oxidizing bacterial community composition [J]. Environmental Science, 2011, **32**(11): 3455-3460.
- [18] 池振兴. 四环素类污染物毒性的微观机制研究[D]. 济南: 山东大学, 2012. 1-3.
- [19] Zhang Y Y, Geng J J, Ma H J, *et al.* Characterization of microbial community and antibiotic resistance genes in activated sludge under tetracycline and sulfamethoxazole selection pressure [J]. Science of the Total Environment, 2016, **571**: 479-486.
- [20] Ravindran B, Mneni P N S. Identification and fate of antibiotic

- residue degradation during composting and vermicomposting of chicken manure [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017, **14**(2): 263-270.
- [21] Huang K, Xia H, Wu Y, *et al.* Effects of earthworms on the fate of tetracycline and fluoroquinolone resistance genes of sewage sludge during vermicomposting [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **259**: 32-39.
- [22] Men Y J, Han P, Helbling D E, *et al.* Biotransformation of two pharmaceuticals by the ammonia-oxidizing archaeon *Nitrososphaera gargensis* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(9): 4682-4692.
- [23] 曹佳, 王冲, 皇彦, 等. 蚯蚓对土壤微生物及生物肥力的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(5): 1579-1586.
Cao J, Wang C, Huang Y, *et al.* Effects of earthworm on soil microbes and biological fertility: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(5): 1579-1586.
- [24] Herfort L, Schouten S, Abbas B, *et al.* Variations in spatial and temporal distribution of archaea in the North Sea in relation to environmental variables[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, **62**(3): 242-257.
- [25] 程林, 刘桂婷, 王保莉, 等. 渭北旱塬长期施肥试验中氨氧化细菌的多样性及群落结构分析[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(7): 1333-1340.
Cheng L, Liu G T, Wang B L, *et al.* Effects of long-term fertilization on diversity and composition of ammonia-oxidizing bacterium communities in Weibei Dry-land[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(7): 1333-1340.
- [26] Xia H, Wu Y, Chen X M, *et al.* Effects of antibiotic residuals in dewatered sludge on the behavior of ammonia oxidizers during vermicomposting maturation process [J]. *Chemosphere*, 2019, **218**: 810-817.
- [27] 郑平, 徐向阳, 胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 16-18, 36-38.
- [28] Stahl D A, de la Torre J R. Physiology and diversity of ammonia-oxidizing archaea [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2012, **66**: 83-101.
- [29] Pester M, Rattei T, Flechl S, *et al.* *amoA*-based consensus phylogeny of ammonia-oxidizing archaea and deep sequencing of *amoA* genes from soils of four different geographic regions [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, **14**(2): 525-539.
- [30] Hatzenpichler R, Lebedeva E V, Spieck E, *et al.* A moderately thermophilic ammonia-oxidizing crenarchaeote from a hot spring [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(6): 2134-2139.
- [31] Könneke M, Bernhard A E, de la Torre J R, *et al.* Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon [J]. *Nature*, 2005, **437**(7058): 543-546.
- [32] 王桂珍, 李兆君, 张树清, 等. 土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 795-803.
Wang G Z, Li Z J, Zhang S Q, *et al.* Degradation of oxytetracycline in chicken feces aerobic-composting and its effects on their related parameters [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 795-803.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHOU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jimpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹⁵ N-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonification	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)