

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

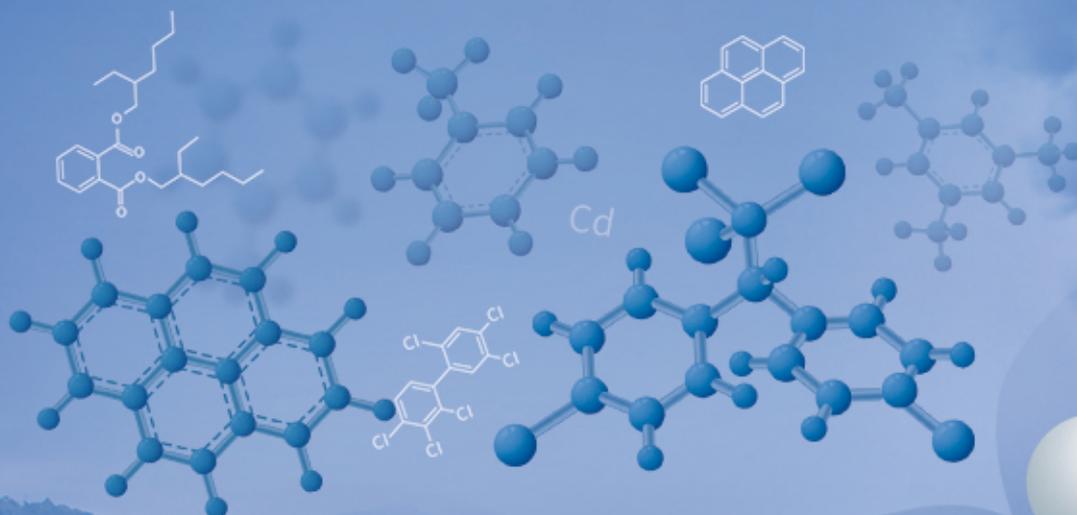
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

OCPs

PAEs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期

Vol.42 No.10

目次

PM_{2.5}化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)

汾渭平原 PM_{2.5}空间分布的地形效应 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)

华中地区冬季灰霾天气下 PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例
..... 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)

华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)

成都市春季 O₃ 污染特征及关键前体物识别 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)

基于边界观测的长三角某工业区 O₃ 来源特征 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)

廊坊开发区 8~9月 O₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)

广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响
..... 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)

厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 徐超, 吴水平, 刘怡婧, 钟雪芬 (4650)

北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖芳, 朱晓婉 (4660)

两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响
..... 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)

燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)

长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)

土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)

基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征
..... 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡暄, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)

三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价 任丙南, 耿静 (4717)

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)

天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)

华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)

快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)

盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)

基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度
..... 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)

硼酸和磷酸对 PMS/Co²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 李刚 (4789)

磁性生物炭负载 α-MnO₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)

紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制 张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)

铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)

低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)

我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝骁, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)

不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)

部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)

同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)

多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)

柴达木盆地土壤重金属污染与来源分析 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)

快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)

广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)

炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)

海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险
..... 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)

环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索 苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)

银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)

施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)

我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)

青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析
..... 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)

松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构
..... 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)

不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)

稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)

铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)

有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)

水稻产量、稻田 CH₄ 和 N₂O 排放对长期大气 CO₂ 浓度升高的响应 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)

原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)

中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素 李宇, 周德成, 闫章美 (5037)

室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 张万众, 张彭义 (5046)

《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)

有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响

周慧^{1,2}, 史海滨^{1,2*}, 张文聪^{1,2}, 王维刚^{1,2}, 苏永德^{1,2}, 闫妍^{1,2}

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学旱区农业节水与水土环境研究所, 呼和浩特 010018)

摘要: 以内蒙古河套灌区轻度盐渍土 S_1 ($EC = 0.62 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 及中度盐渍土 S_2 ($EC = 1.17 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 为对象, 研究硝化和反硝化进程对盐渍化程度和有机无机氮配施比例的响应及其影响因素. 本试验设置了 6 个处理, 包括不施氮 (CK)、单施无机氮 (U_1) 以及用有机氮 (U_3O_1 、 U_1O_1 、 U_1O_3 和 O_1) 替代 25%、50%、75% 和 100% 的无机氮. 结果表明, 盐度升高会降低土壤硝化势而提高土壤反硝化能力, 同一处理 S_1 土壤硝化潜势较 S_2 土壤高出 28.81%~69.67%, 而反硝化能力降低 17.16%~88.91%. 盐度升高会降低 AOB 丰度及硝化贡献率, 但会增加 AOA 丰度和硝化贡献率; 盐度增加会提高土壤 *nirK* 和 *nirS* 型菌丰度, 同时会增加 $N_2O/(N_2O + N_2)$ 产物比, 但会抑制 *nosZ* 丰度. S_1 土壤, 以 U_1O_1 处理硝化势和反硝化能力最大, 较单施化肥增幅分别达到 18.59% 和 15.87%; S_2 土壤, 各施肥处理之间土壤硝化势差异不显著, 反硝化能力以 O_1 处理最大, 较单施化肥提高 88.26%. S_1 和 S_2 盐渍土分别以 U_1O_1 及 O_1 处理获得较高的 AOB 基因丰度及硝化贡献率, 且增大了 *nirS* 和 *nosZ* 基因丰度, 并显著降低 $N_2O/(N_2O + N_2)$ 产物比. 综上, 相比单施无机氮, 轻度盐渍土以有机无机氮各半配施, 中度盐渍土以单施有机氮更有利于土壤硝化反硝化过程进行.

关键词: 盐渍化农田; 有机无机氮配施; 硝化势; 反硝化能力; 功能微生物

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-5010-11 DOI: 10.13227/j.hjxk.202103013

Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils

ZHOU Hui^{1,2}, SHI Hai-bin^{1,2*}, ZHANG Wen-cong^{1,2}, WANG Wei-gang^{1,2}, SU Yong-de^{1,2}, YAN Yan^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Institute of Water-saving Agricultural and Soil-water Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Focusing on typical mildly saline soil, S_1 ($EC, 0.62 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$), and moderately saline soil, S_2 ($EC, 1.17 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$), in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, the response of nitrification and denitrification process to salinization degree and the proportion of organic and inorganic nitrogen application were studied. The experimental treatments consisted of (1) no nitrogen (CK), (2) only inorganic nitrogen (U_1), and (3) organic nitrogen (U_3O_1 , U_1O_1 , U_1O_3 , and O_1) compared to 25%, 50%, 75%, and 100% inorganic nitrogen. The results showed that increasing salinity reduced the soil nitrification potential and increased the soil denitrification capacity. The soil nitrification potential of the S_1 soil was 28.81%-69.67% higher than that of the S_2 soil, while the denitrification capacity was reduced by 17.16%-88.91%. With an increase in salinity, the AOB abundance and nitrification contribution rate were reduced, but the AOA abundance and nitrification contribution rate were increased. Furthermore, an increase in salinity increased the abundance of *nirK* and *nirS* bacteria, and increased $N_2O/(N_2O + N_2)$ production, but reduced the abundance of *nosZ*. In the S_1 soil, the nitrification potential and denitrification capacity of U_1O_1 were highest, increasing by as much as 18.59% and 15.87%, respectively, compared to the U_1 treatment. In the S_2 soil, the difference in the soil nitrification potential between the various fertilization treatments was not significant, and the denitrification capacity of the O_1 treatment was highest. The S_1 and S_2 saline soils treated with U_1O_1 and O_1 , respectively, had higher AOB gene abundance and nitrification contribution rates, increased *nirS* and *nosZ* gene abundances, and significantly reduced $N_2O/(N_2O + N_2)$ product ratios. Our findings suggested that mildly saline soils ($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ urea + $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ organic fertilizer) and moderately saline soils ($240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ organic fertilizer) are more conducive to soil nitrification and denitrification processes compared to soils to which inorganic nitrogen is applied alone.

Key words: salinity soil; combined application of organic-inorganic nitrogen; nitrification potential; denitrification capacity; function microorganism

土壤盐度增加是限制干旱和半干旱地区农业发展的主要问题^[1]. 盐渍土这一特殊的生态系统是养分循环的热点, 盐分显著影响着土壤氮素转化及其有效性^[2]. 近年来, 土壤氮循环对环境变化的响应受到广泛关注^[3-5], 包括由于水位升高、强降雨以及不合理的农艺措施等引起的盐度增加对氮循环的影响^[6-8]. 目前, 许多研究都集中在硝化和反硝化过程对盐度升高的响应^[9-12], 结果表明盐分胁迫会改变土壤氮素的正常转化, 从而减少氮素有效性.

土壤微生物对于土壤肥力和可持续生产力的调控影响显著^[13]. 有研究表明, 盐度对微生物群落组成的影响较温度、pH 或其他理化参数更为强烈^[14]. 因此, 越来越多的研究聚焦于盐渍环境中影

收稿日期: 2021-03-02; 修订日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769024); 国家自然科学基金重点项目(51539005); 国家重点研发计划项目(2016YFC0400205)

作者简介: 周慧(1994~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤氮素循环及环境效应, E-mail: 792606382@qq.com

* 通信作者, E-mail: shb@imau.edu.cn

响氮素转化土壤微生物的变化规律^[15,16]. 硝化过程是将土壤铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)氧化为硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)的过程^[17]. 其中从 NH_3 氧化成 NO_2^- 由氨氧化细菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA)驱动完成^[18,19]. AOA和AOB对盐度的响应在不同环境下存在差异. Zhou等^[20]的研究发现,盐分增加会限制硝化细菌的适应度而抑制硝化作用. 也有研究表明, AOA丰度及土壤硝化速率与土壤盐分呈正相关,而AOB则随盐度的增加呈现不相关或负相关^[21,22].

盐度增加对硝化作用的影响会改变硝酸盐的有效性,从而对土壤反硝化过程也会有所影响^[23]. 反硝化作用是环境中的 NO_3^- 和 NO_2^- 通过微生物经多种酶催化逐步还原为含氮气体的过程^[24]. 其中经 *nirK* 和 *nirS* 基因编码的亚硝酸盐还原酶将 NO_2^- 还原为 NO 被认为是脱硝的限速步骤^[25,26], 是土壤氮素反硝化损失的主要过程. 由 *nosZ* 基因编码的氧化亚氮还原酶决定了能否将 N_2O 彻底还原为 N_2 , 这一反硝化基因也被广泛研究^[27]. 众多学者已对盐度对土壤反硝化基因影响展开研究,但仍未得出一致结论. Miao等^[28]的研究发现,*nirK*对盐分的耐受性要高于*nirS*,而Zhai等^[29]则通过研究得到与其相反的结果. 也有研究发现,盐分对*nosZ*有显著影响,盐度的增加会使*nosZ*丰度降低^[28,30]. 因此,盐分对于土壤硝化反硝化微生物基因的影响还有待进一步研究.

中国盐渍化土壤面积在 $3.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 左右^[31]. 其中内蒙古河套灌区土壤盐渍化较为严重,盐渍化土地已超过当地灌溉面积的 50% 以上^[32],开发潜力较大. 随着人口增长对生产的需求增加,当地氮肥在农业系统中的应用也在增加,单位面积化肥施用

量远高于世界平均水平^[33]. 有机肥替代化肥对于农业可持续发展具有重要意义^[34]. 施用有机肥可以改善盐渍土理化性质^[35,36],且较化肥释放养分更为持久,可以满足作物生育后期对养分的需求^[37]. 此外,有机肥可以提供微生物所需能量,改善土壤根际微环境^[38,39],这可能也会影响土壤硝化细菌和反硝化细菌的多样性,从而对土壤氮素转化过程产生影响. Shen等^[40]的研究表明,在施用有机肥 24 a 后土壤 AOA 基因丰度显著增加. 也有研究发现,施入有机肥增加了土壤硝化和反硝化菌数量,导致 N_2O 排放量增加^[41]. Cui等^[42]的研究也表明,有机肥利于 *nirS* 型反硝化菌增殖. 然而,针对不同程度盐渍化土壤,有机肥替代无机肥的比例对土壤硝化和反硝化微生物丰度及其功能的影响在很大程度上仍不清楚. 因此,本文以河套灌区 2 种盐分水平土壤为研究对象,探讨不同有机无机氮肥配施比例对土壤硝化反硝化过程及其功能微生物的影响.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验开展于解放闸灌域沙壕渠试验基地($40^\circ 54' 40'' \text{N}$, $107^\circ 09' 57'' \text{E}$),该地区多年平均气温为 7.7°C ,降雨量为 143 mm,蒸发量 2 100 mm. 大于 10°C 的年积温为 $3\ 551^\circ \text{C}$,全年太阳总辐射约为 $6\ 000 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,属于典型的干旱地区. 土壤类型为硫酸盐-氯化物型盐土,0~20 cm 及 40~60 cm 土层为粉壤土,20~40 cm 和 60~100 cm 土层分别为粉质黏壤土和砂壤土. 施肥处理前(2018年)耕层初始土壤性质详见表 1.

表 1 试验区土壤基本性状

Table 1 Basic properties of the tested soils

盐渍化程度	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH
轻度	14.04	1.43	54.68	37.78	199.67	8.2
中度	13.04	1.07	46.54	23.58	176.33	8.4

1.2 试验设计

本试验始于 2018 年 4 月底,种植作物为玉米(内单 314),播种日期为每年的 4 月末或 5 月初,收获日期为 9 月中旬. 参考当地优化畦灌灌水定额 $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 作为灌水量,优化施氮量 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为施氮总量,在 S_1 [轻度盐渍土,土壤电导率(EC): $0.62 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$] 和 S_2 (中度盐渍土, EC: $1.17 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) 盐渍化农田上设置了 6 个处理,包括不施氮(CK)、单施无机氮(U_1)以及用有机氮(U_3O_1 、 U_1O_1 、 U_1O_3 和 O_1)替代 25%、50%、75% 和 100% 的无机氮,具体施肥设计见表 2. 小区规格为 $6 \text{ m} \times 5$

m ,重复 3 次. 无机氮采用当地常规施用的尿素氮(含氮 46%),有机氮采用商品有机肥(由玉米秸秆制成,含 N 10%, P_2O_5 1%, K_2O 1%,有机质 $\geq 45\%$,腐殖酸 $\geq 17\%$, $\text{S} \geq 8\%$). 有机氮和磷肥(过磷酸钙 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,各处理施入磷肥总量一致)于耕作前作为基肥一次性施用(均匀撒施后旋耕 20 cm),尿素按 1:1 的比例分基肥和拔节肥 2 次施,施肥方式以及相关农艺管理措施每年均保持一致.

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 土样采集

土壤取样在 2020 年 7 月 5 日,于玉米拔节期

(此时期土壤环境适宜,能较好表征土壤硝化反硝化相关过程)采样(0~20 cm),采用“S”形取样法采集土样,混匀并过2 mm筛后装入袋内(约1 kg).带回室内分2部分储存,一部分用于土壤微生物测定分析(-20℃冰箱储存);另一部分用于土壤理化性质测定及相关室内试验(-4℃冰箱储存).

表2 试验设计

处理	施氮量/kg·hm ⁻²		
	播种期(2020-05-04)		拔节期(2020-06-21)
	有机氮	无机氮	无机氮
CK	0	0	0
U ₁	0	120	120
U ₃ O ₁	60	90	90
U ₁ O ₁	120	60	60
U ₁ O ₃	180	30	30
O ₁	240	0	0

1.3.2 土壤理化性质测定

土壤孔隙充水率由公式(1)计算所得,土水比1:5浸提液测定土壤(0~20 cm)pH及EC值.采用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质.采用浓H₂SO₄消煮,半微量凯氏定氮仪测定土壤全氮;土壤NO₃⁻-N和NH₄⁺-N采用2 mol·L⁻¹ KCl浸提后,在连续流动分析仪上分析;土壤可溶性有机碳(DOC)利用0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄去离子水,在25℃下恒温振荡30 min,用可溶性有机碳分析仪(Aanalytik Jena, Germany)测定^[43].

土壤孔隙充水率(WFPS)计算公式为:

$$WFPS = W_s \times SBD / [1 - (SBD/2.65)] \times 100\% \quad (1)$$

式中,W_s为土壤重量含水量(由烘干法测得),SBD为土壤容重(g·cm⁻³),土壤密度假定为2.65 g·cm⁻³.

1.3.3 硝化潜势和恢复硝化强度测定

硝化潜势(nitrification potential, NP)和恢复硝化强度(recovered nitrification potential, RNP)参考Taylor等^[44]的方法.其中硝化潜势测定方法为称取5 g土壤鲜样,将其加入50 mL液体培养基(1.5 mmol·L⁻¹ NH₄⁺),180 r·min⁻¹,在30℃下恒温振荡48 h,期间共5次采样(分别于振荡6、12、24、36和48 h采样),每次吸取4 mL,后将所取悬浮液离心10 min,测定上清液NO₃⁻-N和NO₂⁻-N浓度,用单位时间内产生的NO₃⁻-N和NO₂⁻-N总量来表征土壤硝化势.

RNP具体测定方法为:称取两组5 g土壤鲜样分别加入两组120 mL培养瓶中,将50 mL 1.5 mmol·L⁻¹ NH₄⁺液体注入培养基,然后将体积分数为0.025%的乙炔注入其中,在30℃下,恒温振荡6

h后抽去乙炔.其中一组添加浓度为800 μg·mL⁻¹的卡那霉素(Kanamycin)和浓度为200 μg·mL⁻¹大观霉素(Spectinomycin)来抑制AOB中AMO的合成.每间隔12 h测一次硝化势,共测4次.其中添加抑制剂测的是AOA的硝化势(RNP_{AOA}),另一组则为总的硝化势(RNP_{Total}),AOB的硝化势(RNP_{AOB})为RNP_{Total} - RNP_{AOA}.

1.3.4 反硝化能力和土壤呼吸测定

反硝化能力测定参考Šimek等^[45]的方法,具体为:取两份10 g鲜土,分别放入两组培养瓶(120 mL)中,随后加入浓度为10 mmol·L⁻¹的KNO₃溶液4 mL,加盖密封后用氦气反复冲洗4次.并在其中一组培养瓶中注入10 mL乙炔(另一组则不注入)进行培养,用装有少量水、没有活塞的注射器插入瓶塞,来平衡注乙炔的培养瓶内气压.在培养24 h和48 h后,分别取5 mL气体用气相色谱仪(美国,GC-7890A)测定N₂O和CO₂浓度.反硝化能力由添加乙炔的培养瓶N₂O气体变化率来表征,代表反硝化总量(N₂O + N₂)产生率;反硝化过程N₂O排放率则由另一组培养瓶N₂O气体变化量表征.

1.3.5 DNA提取及定量PCR检测

土壤DNA根据制造商的要求使用分离试剂盒(MoBio, Carlsbad, 美国)提取.选择A26F(5'-GACTACATMTTCTAYACWGAYTGGGC-3')/A416R(5'-GGKGTCA TRTATGGWGGYAA YGTTGG-3')^[46], amoA-1F(5'-GGGTTTCTACTGTTGGT-3')/amoA-2R(5'-CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC-3')^[47], F_{1a}Cu(5'-ATCATGGTCTGCCGCG-3')/R₃Cu(5'-GCCTCGATCAGRTTGTGGTT-3')^[48], cd3af(5'-GTSAAAGTSAAGGARACSGG-3')/R3cd(5'-GASTTCGGRTGSGTCTTGA-3')^[49], nosZ-F(5'-CGYTGTTCMTCCACAGCCAG-3')/nosZ-R(5'-CGSACCTTSTTGCCSTYCGC-3')^[50]为引物分别扩增Arch-amoA、Bac-amoA、nirK、nirS和nosZ. PCR反应体系包括10 μL 2×SYBR Premixture、10 μmol·L⁻¹前后引物各0.4 μL以及稀释后的DNA模板2 μL,最终用ddH₂O补齐至20 μL.硝化反硝化基因标准曲线的R²值均达到0.99以上,扩增效率在92%~99%.

1.4 数据分析方法

数据用IBM SPSS 20.0软件进行分析,图表由Origin 2018绘制.

2 结果与分析

2.1 有机无机氮配施对土壤理化性状的影响

由表3可知,同一盐渍化程度土壤,各处理表层土壤WFPS、EC和pH差异并不显著.土壤全氮和

硝态氮含量随着有机氮比例增加呈先升后降的趋势,其中以 U_1O_1 最大,而土壤铵态氮则呈现出相反的趋势. 土壤有机质、全氮以及可溶性有机碳含量基本呈现出随着有机氮比例增加而增加的趋势; S_2

土壤,土壤基础肥力基本表现出随着有机氮施入比例增加而增加的趋势. 可以看出, S_1 和 S_2 盐渍土配施有机氮均可以提高土壤基础肥力,但在不同盐分条件下会产生不同供氮特征.

表 3 不同处理对土壤理化性状的影响¹⁾

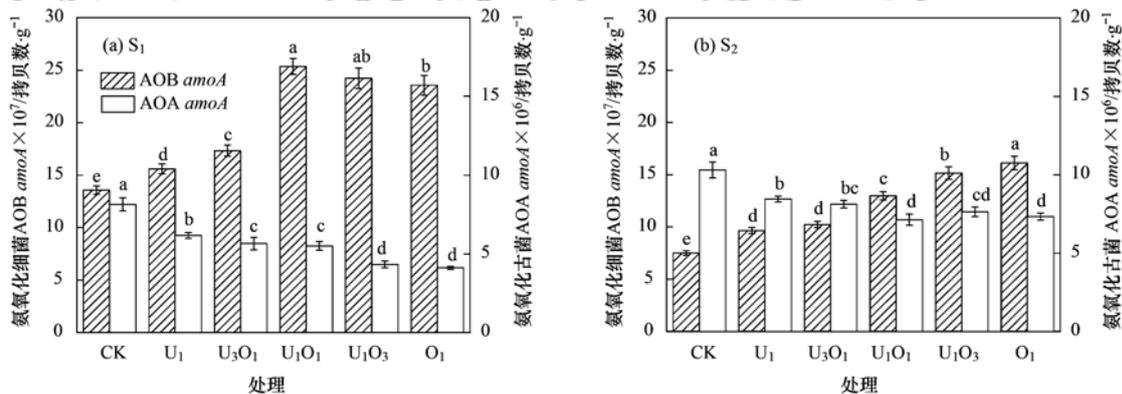
盐渍化程度	处理	全氮 /g·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹	WFPS /%	NH ₄ ⁺ -N /mg·kg ⁻¹	EC /dS·m ⁻¹	pH	DOC /mg·kg ⁻¹
S_1	CK	1.23c	10.88d	16.03d	48.30a	3.14e	0.586ab	8.2a	28.6b
	U_1	1.7b	11.92cd	56.49c	51.56a	8.79c	0.604ab	8.2a	26.5b
	U_3O_1	1.74b	13.25c	57.12c	49.39a	7.65b	0.572ab	8.2a	27.2b
	U_1O_1	1.93a	15.26b	69.53a	50.20a	4.58d	0.625a	8.3a	31.6a
	U_1O_3	1.81ab	15.96ab	64.21b	47.76a	8.65b	0.583ab	8.3a	32.5a
	O_1	1.82ab	17.21a	58.15c	52.37a	10.75a	0.55b	8.3a	33.4a
S_2	CK	0.91e	8.55d	13.12c	53.73b	1.55e	1.208ab	8.4a	23.4c
	U_1	1.08d	9.82c	45.00b	59.38a	11.02c	1.234ab	8.4a	22.8c
	U_3O_1	1.12cd	10.13c	46.23b	57.05ab	8.33d	1.286a	8.4a	24.1bc
	U_1O_1	1.22bc	12.5b	48.09b	52.50b	11.35c	1.203ab	8.4a	25.8ab
	U_1O_3	1.31ab	13.66ab	47.21b	54.17b	13.52b	1.176ab	8.5a	27.2a
	O_1	1.45a	14.59a	53.33a	53.90b	15.24a	1.161b	8.5a	28.1a

1) 同列数据后不同小写字母表示同一盐渍化土壤各处理土壤理化性质在 $P < 0.05$ 水平差异显著

2.2 有机无机氮配施对 AOB 和 AOA *amoA* 基因丰度的影响

由图 1 可知,土壤盐渍化程度增加会抑制氨氧化菌活性,同一处理 S_2 土壤 AOB *amoA* 基因丰度较 S_1 土壤降低 1.46 ~ 1.80 倍,而 AOA *amoA* 基因丰度

高出 1.19 ~ 2.05 倍. 在不同程度盐渍化土壤中,各处理 AOB *amoA* 基因丰度均高于 AOA *amoA*,各施肥处理 AOB/AOA *amoA* 值为 7.29 ~ 46.03 倍. 与不施氮相比,施入氮肥会增加 AOB *amoA* 基因拷贝数而大量减少 AOA *amoA* 基因拷贝数.



不同小写字母表示同一盐渍化土壤各处理 AOB 和 AOA 在 $P < 0.05$ 水平下差异显著

图 1 不同处理 AOB 和 AOA 丰度变化

Fig. 1 Abundances of AOB and AOA with the different treatments

有机无机氮配施比例对不同程度盐渍化土壤氨氧化菌基因丰度影响存在差异. 在 S_1 土壤,随着有机氮施入比例增加, AOB *amoA* 基因拷贝数呈先升后降的趋势,以 U_1O_1 处理最大,较其余施肥处理显著高出 4.71% ~ 62.67% (与 U_1O_3 处理不显著, $P < 0.05$). 配施有机氮会降低土壤 AOA *amoA* 基因丰度, U_1 处理显著高于其它配施有机氮处理 ($P < 0.05$). S_2 土壤则表现出随着有机氮施入比例增加 AOB *amoA* 基因基拷贝数逐渐增加的趋势, O_1 处理 AOB *amoA* 基因基拷贝数较其余施肥处理高出

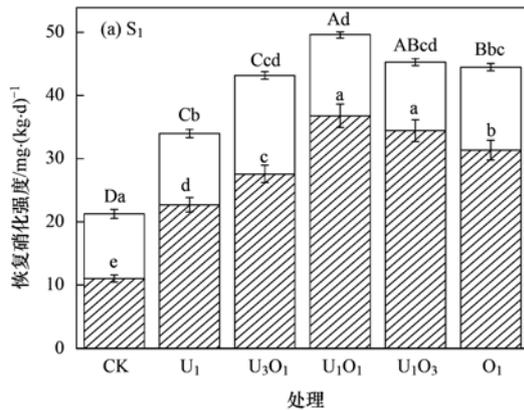
6.40% ~ 66.98% ($P < 0.05$),而有机无机氮配施对 AOA *amoA* 基因丰度影响不显著.

2.3 有机无机氮配施对 AOB 及 AOA 硝化贡献率的影响

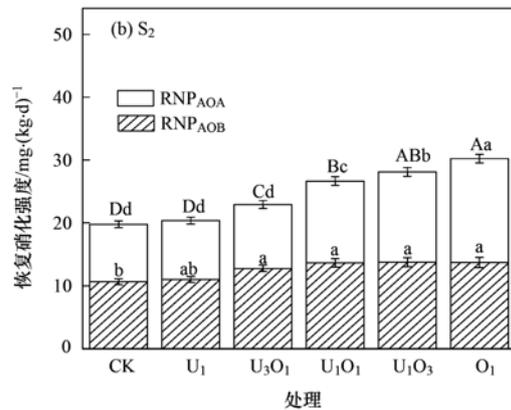
由图 2 可知,高盐度对土壤恢复硝化强度也有明显的抑制作用,相同处理下 S_1 土壤恢复硝化强度较 S_2 土壤高出 27.72% ~ 74.89%. 施氮对 S_1 土壤恢复硝化强度提高较大,而对 S_2 土壤恢复硝化强度提升作用相对较小, S_1 和 S_2 土壤各施肥处理土壤恢复硝化强度较 CK 处理分别高出 40.95% ~ 87.53%

和 2.93%~52.86%。在 S_1 土壤,各施氮处理 AOB 硝化潜势贡献率为 63.81%~77.70%, S_2 土壤 AOB 硝化潜势贡献率相对较小,但仍然达到 55.67%~59.59%。可见硝化细菌在盐渍化土壤氮素转化过程占十分重要的地位,但随着土壤盐分增大而有所减弱。

与单施化肥相比, S_1 土壤配施有机氮会降低



AOA 的硝化贡献率, U_1 处理较其余施氮处理高出 8.69%~21.97%,但施入有机氮会显著增加 AOB 的硝化贡献率,其中以 U_1O_1 处理最大,较 U_1 处理高出 62.00% ($P < 0.05$)。 S_2 土壤表现出随着有机氮施入比例增加 AOB 硝化贡献率增大的趋势, O_1 处理 AOB 硝化贡献率较单施化肥高出 60.64%,而各处理之间 AOA 硝化贡献率无显著差异。



不同小写字母表示同一盐渍化土壤 AOB 和 AOA 在恢复硝化强度中的贡献差异显著 ($P < 0.05$),不同大写字母表示同一盐渍化土壤恢复硝化强度差异显著 ($P < 0.05$); 堆叠柱形中斜线柱子 (RNP_{AOB}) 和白色柱子 (RNP_{AOA}) 分别表示同一盐渍化土壤 AOB 和 AOA 在恢复硝化强度 (RNP) 中的贡献,其和即为恢复硝化强度 (RNP)

图 2 不同处理氨氧化细菌和古菌硝化贡献率变化

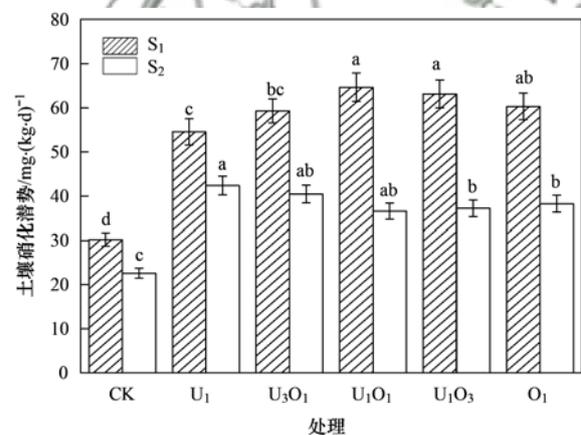
Fig. 2 Relative contributions of AOB and AOA abundances with the different treatments

2.4 有机无机氮配施对硝化势的影响

由图 3 可知,高盐度会抑制土壤硝化潜势,相同处理下 S_1 土壤硝化潜势较 S_2 土壤高出 28.81%~69.67%。与不施氮相比,各有机无机氮配施处理均可以提高土壤硝化潜势,在 S_1 土壤,土壤硝化潜势较低,随有机氮施入比例的增加呈先升后降的趋势,其中以 U_1O_1 处理最大,较单施化肥显著高出 18.59% ($P < 0.05$),但与 U_1O_1 和 O_1 处理之间差异并不显著。在 S_2 土壤,土壤硝化潜势呈现出随有机氮施入比例增加而降低的趋势,但各处理之间差异并不显著(除 U_1 外)。

2.5 有机无机氮配施对土壤反硝化能力、 $N_2O/(N_2O + N_2)$ 和土壤呼吸的影响

由图 4 可知,高盐度对土壤反硝化能力有促进作用,但会抑制土壤呼吸,相同处理下 S_2 土壤反硝化能力较 S_1 土壤提高 17.16%~88.91%,而土壤呼吸降低了 17.67%~75.29%。在 S_1 土壤,随着有机氮投入比例增加,土壤反硝化能力和土壤呼吸均呈先升后降的趋势,其中 U_1O_1 处理土壤反硝化能力和土壤呼吸最大,较其余施氮处理分别高出 15.28%~44.07% 和 15.87%~55.21% ($P < 0.05$)。在 S_2 土壤,随着有机氮投入量增加,土壤反硝化能力和土壤呼吸都呈增加的趋势,其中以 O_1 处理土壤反硝化能力和土壤呼吸最高,较其余施氮处理分别



不同小写字母表示同一盐渍化土壤各处理硝化潜势在 $P < 0.05$ 水平下差异显著

图 3 不同处理土壤硝化势变化

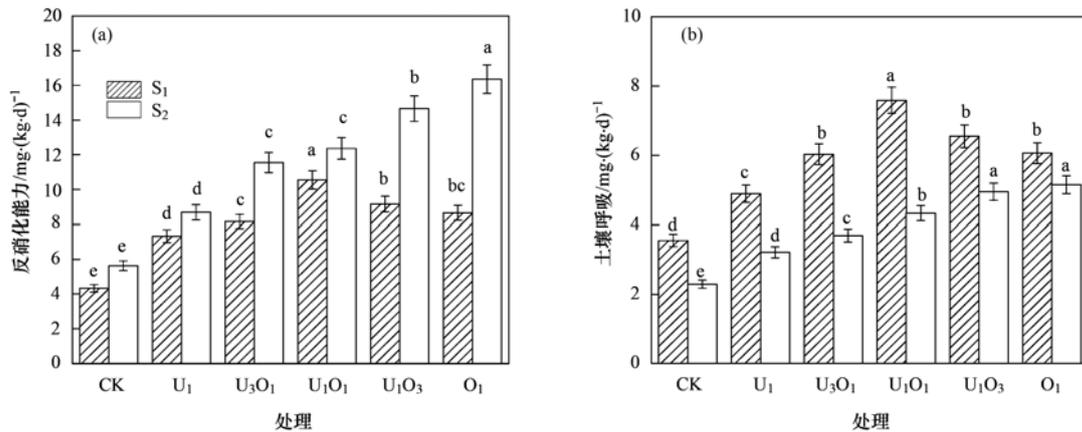
Fig. 3 Nitrification potential with the different treatments

高出 11.60%~88.26% 和 4.04%~60.44% (与 U_1O_3 处理不显著, $P < 0.05$)。

由图 5 可知,土壤盐度升高会提高土壤 $N_2O/(N_2O + N_2)$ 产物比,而施氮则会降低 $N_2O/(N_2O + N_2)$ 产物比。在 S_1 土壤,CK、 U_1 和 U_3O_1 处理之间 $N_2O/(N_2O + N_2)$ 产物比无显著差异,但均显著高于其余处理。 S_2 土壤则表现出有机氮投入量越大 $N_2O/(N_2O + N_2)$ 产物比越小的态势。

2.6 有机无机氮配施对土壤反硝化菌群丰度的影响

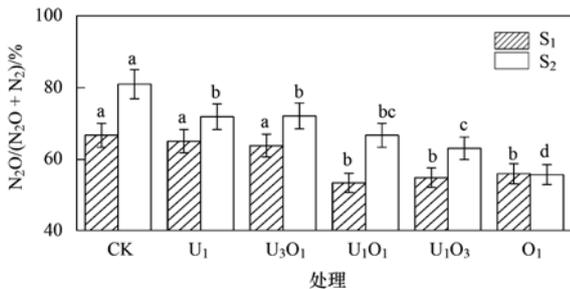
由图 6 可以看出, S_1 和 S_2 土壤 *nosZ* 基因数量



不同小写字母表示同一盐渍化土壤各处理反硝化能力和土壤呼吸在 $P < 0.05$ 水平下差异显著

图4 不同处理土壤反硝化能力和土壤呼吸变化

Fig. 4 Denitrification capacity and soil respiration with the different treatments



不同小写字母表示同一盐渍化土壤 $N_2O/(N_2O + N_2)$ 产物比在 $P < 0.05$ 水平下差异显著

图5 不同处理土壤 $N_2O/(N_2O + N_2)$ 变化

Fig. 5 $N_2O/(N_2O + N_2)$ ratios with the different treatments

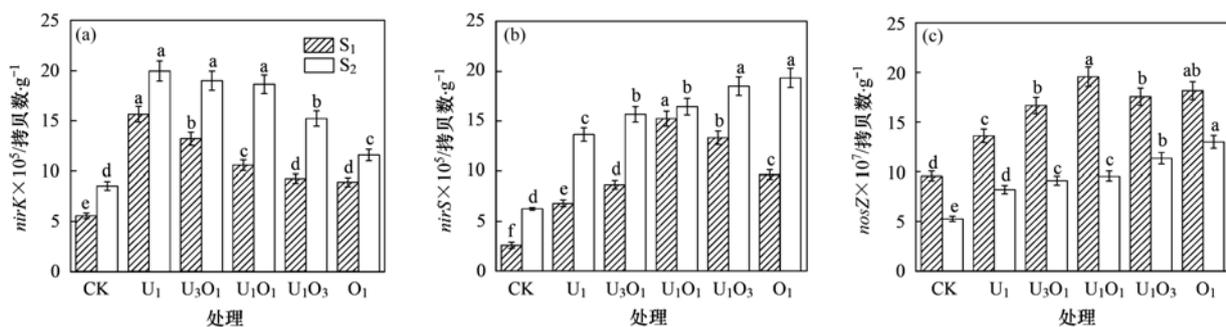
均显著高于 *nirK* 和 *nirS* ($P < 0.05$), 前者比后者要高出 1~2 个数量级. 土壤盐度升高会提高土壤 *nirK* 和 *nirS* 的基因丰度, 但会降低土壤 *nosZ* 基因丰度, 相同处理下 S_2 土壤 *nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 基因拷贝数较 S_1 土壤分别高出 27.59%~76.11%、7.86%~142.25% 和 -44.98%~-28.49%. 施肥会显著提高土壤反硝化基因拷贝数, 但有机无机氮配施对不同反硝化基因丰度影响不一, 随着有机肥投入量加大, S_1 和 S_2 土壤 *nirK* 基因拷贝数均呈降低的趋势 [图 6(a)]. *nirS* 和 *nosZ* 基因丰度变化趋势基本一

致, 在 S_1 土壤表现出随着有机氮施入比例增加 *nirS* 和 *nosZ* 基因拷贝数呈先升后降的趋势, 其中以 U_1O_1 处理最大, 而在 S_2 土壤则表现出随着有机氮投入量增大而增加的趋势.

2.7 相关性分析

表 4 和表 5 为土壤微生物相关参数与土壤理化性质相关性分析结果, 可以看出, S_1 和 S_2 土壤 AOA 与各土壤肥力要素均呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 而 AOB 与各土壤肥力要素呈极显著正相关关系 (除 S_1 土壤 AOB 与铵态氮相关性不显著, $P < 0.01$). S_1 和 S_2 土壤硝化潜势与 AOA 均呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$). S_1 土壤硝化潜势与 AOB 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 而与 AOA 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$). S_2 土壤硝化潜势与 AOB 相关性并不显著 ($P > 0.05$), 而与 AOA 呈极显著正相关 ($P < 0.01$).

S_1 和 S_2 土壤反硝化能力与土壤呼吸呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 同时二者也与 *nirK* (S_2 土壤不显著)、*nirS* 和 *nosZ* 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 反硝化能力与各土壤肥力要素均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而与 $N_2O/(N_2O + N_2)$ 产物比呈极显著



不同小写字母表示同一盐渍化土壤各处理 *nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 拷贝数在 $P < 0.05$ 水平下差异显著

图6 不同处理 *nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 基因拷贝数变化

Fig. 6 *nirK*, *nirS*, and *nosZ* copies with the different treatments

表 4 S₁ 土壤不同处理测定变量间相关性分析¹⁾

Table 4		Correlation analysis among measured variables in different treatment in the S ₁ soil													
	WFPS	全氮	有机质	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	DOC	pH	NP	AOA	AOB	nirK	nirS	nosZ	DC	土壤呼吸
NP	0.343	0.987**	0.783**	0.990**	0.593*	0.755*	-0.292								
AOA	-0.080	-0.759**	-0.807**	-0.790**	-0.754**	-0.691**	-0.020	-0.828**							
AOB	0.171	0.807**	0.910**	0.764**	0.324	0.920**	0.278	0.815**	-0.784**						
nirK	0.373	0.501*	-0.059	0.573**	0.439*	-0.088**	0.076	0.495*	-0.186	-0.081					
nirS	0.085	0.875**	0.753**	0.881**	0.231	0.775**	0.225	0.891**	-0.714**	0.925**	0.176				
nosZ	0.317	0.952**	0.864**	0.915**	0.454	0.865**	0.309	0.949**	-0.808**	0.903**	0.267	0.921**			
DC	0.280	0.967**	0.783**	0.957**	0.385	0.799**	0.284	0.966**	-0.756**	0.886**	0.358	0.963**	0.975**		
土壤呼吸	0.217	0.925**	0.777**	0.903**	0.271	0.807**	0.298	0.920**	-0.703**	0.895**	0.254	0.962**	0.972**	0.985**	
N ₂ O/(N ₂ O+N ₂)	0.267	-0.549**	-0.639**	-0.598**	-0.191	-0.615**	0.245	-0.609**	0.764**	-0.849**	-0.190	-0.788**	-0.695**	-0.697**	-0.700**

1) DOC 表示可溶性有机碳, NP 表示硝化势, DC 表示反硝化能力, * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$, 下同

表 5 S₂ 土壤不同有机无机肥配施测定变量间相关性分析

Table 5		Correlation analysis among measured variables in different treatment in the S ₂ soil													
	WFPS	全氮	有机质	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	DOC	pH	NP	AOA	AOB	nirK	nirS	nosZ	DC	土壤呼吸
NP	0.247	0.564**	0.545**	0.919**	0.765**	0.406*	0.229								
AOA	-0.343	-0.733**	-0.751**	-0.892**	-0.862**	-0.553**	0.142	0.730**							
AOB	0.434	0.943**	0.972**	0.684**	0.802**	0.938**	0.282	0.371	-0.724**						
nirK	0.003	0.096	0.122	0.614**	0.370	-0.024	0.082	0.849**	-0.479*	-0.037					
nirS	0.008	0.922**	0.930**	0.955**	0.948**	0.810**	0.236	0.778**	-0.883**	0.850**	0.415*				
nosZ	-0.205	0.983**	0.968**	0.866**	0.935**	0.895**	0.278	0.620**	-0.793**	0.914**	0.159	0.959**			
DC	0.190	0.970**	0.981**	0.840**	0.892**	0.897**	0.250	0.572**	-0.808**	0.948**	0.142	0.956**	0.987**		
土壤呼吸	0.211	0.973**	0.990**	0.833**	0.911**	0.919**	0.277	0.571**	-0.815**	0.967**	0.162	0.954**	0.975**	0.989**	
N ₂ O/(N ₂ O+N ₂)	0.471	-0.808**	-0.786**	-0.723**	-0.846**	-0.640**	0.203	-0.427*	0.853**	-0.808**	-0.011	-0.806**	-0.859**	-0.852**	-0.843**

负相关关系($P < 0.01$).

3 讨论

3.1 有机无机氮配施对氨氧化微生物、硝化贡献率及硝化潜势的影响

有研究表明,盐分是影响 AOA 和 AOB 生长的关键因素^[51]. 本研究通过连续 3 a 定位试验后发现,相同处理下,中度盐渍化土壤 AOB *amoA* 硝化基因丰度较轻度盐渍化土壤显著降低,而 AOA *amoA* 基因丰度却呈现出增大的趋势(图 1). Jin 等^[52]的研究也发现,盐度增加会抑制土壤 AOB 丰度,而 Zhang 等^[22]的研究却发现 AOB 丰度对土壤盐度并不敏感. 前人对于 AOA 的研究结果也各有不同, Wang 等^[53]的研究表明,盐分对 AOA 的影响并不显著. 也有学者发现,在中等盐分条件下土壤 AOA 丰度最大^[22,54]. 可以看出,在不同试验条件下,盐分对 AOA 和 AOB 的影响结果各不相同,这些矛盾的结果可能是因为自然环境复杂多变,导致 AOA 和 AOB 这两种不同种类的微生物对盐分的响应不一^[55].

有研究发现, AOA 在酸性和低氮含量环境中起着更重要的作用($< 15 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{dw soil}$ 计)^[56,57], Wang 等^[58]的研究也证明 AOA 仅在低铵态氮环境中增长. 本研究中,在每个处理中都添加了等量氮肥,较高氮素含量和碱度条件可能是 AOA 增长的限制因素,导致 AOB 较 AOA 高出 7.23 ~ 46.29 倍. 同时,相关性显示, AOA 和 AOB 分别与土壤氮素呈显著负相关($P < 0.05$)和极显著正相关($P < 0.01$)关系,这也证明施肥对土壤 AOB 提升更为有利,而对土壤 AOA 则会产生负效应. 有机无机氮配施对不同程度盐渍化土壤 AOB 和 AOA 的影响存在显著差异,在轻度盐渍化土壤,以有机无机氮各半配施土壤 AOB 丰度最大,而中度盐渍化土壤则以单施有机氮处理最大,这是因为这 2 种处理对土壤养分提升程度最大,而在高营养环境中,更加利于 AOB 生长^[59,60]. 轻度和中度盐渍土均表现出尿素氮施入比例越大 AOA 基因丰度越大的趋势,这可能由于 AOA 具有脲酶基因,能够利用尿素增殖,并通过尿素水解进行 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化作用有关^[61]. 相关性分析表明,土壤呼吸与 AOA 丰度呈极显著负相关关系($P < 0.01$),这是因为 AOA 在低 CO_2 环境下更容易固定^[62],而尿素较有机肥产生的 CO_2 更少,这也可能是增大无机氮施入比例 AOA 增殖的原因.

有研究表明,耕地中 AOB 对于硝化作用的贡献要更大^[58],本研究对硝化贡献率的测定结果也表明,轻度和中度盐渍化土壤 AOB 的硝化贡献率达到

了 55.67% ~ 77.70%,这可能是由于 AOB 较 AOA 丰度更大所致. 中度盐渍土 AOA 的硝化贡献率较轻度盐渍土有所增加,这也证明在本研究条件下 AOA 对于盐分的耐受性要大于 AOB. 轻度盐渍化土壤各处理土壤硝化潜势显著高于中度盐渍化土壤,这可能是因为轻度盐渍土 AOB 基因丰度较大的原因. 此外,有研究发现,中度盐渍化土壤氨挥发也明显高于轻度盐渍化土壤^[63],这可能是由于盐分抑制了土壤 AOB 活性,导致较多氮素以 NH_3 形式存在而造成的. 本研究表明,施肥会显著提高土壤硝化潜势,这与前人研究结果基本一致^[64,65]. 轻度盐渍土硝化潜势随着有机氮施入比例增加呈先升后降的趋势,其中有机无机氮各半配施处理的硝化潜势最大,这可能与该处理 AOA 与 AOB 之和在所有处理中最大有关. 在中度盐渍化土壤,各有机无机氮配施处理之间硝化潜势差异并不显著,这可能是因为盐分较高的条件下,会提高 AOA 丰度而抑制 AOB 丰度,且施入无机氮对 AOA 基因丰度提升较大,因而会缩小各处理间硝化潜势的差异.

3.2 有机无机氮配施对反硝化能力及反硝化菌的影响

反硝化作用使 N 以 N_2O 和 N_2 的形式返回到大气中,也显示出与盐度不同的关系^[53]. Giblin 等^[23]的研究表明,盐度升高会减少反硝化作用底物从而限制土壤反硝化作用进行. 而本研究表明,土壤盐度升高虽然会减少土壤硝酸盐,但却会促进土壤反硝化作用的进行. 一方面,这可能是因为盐度增加会通过增强硝酸盐还原酶活性进而增加硝酸还原菌的丰度,促进硝酸盐向亚硝酸盐的转化^[66],另一方面,本研究发现土壤盐度升高会显著提高土壤 *nirK* 和 *nirS* 基因丰度,更加利于土壤反硝化进行. 因此,即使在中度盐渍化土壤硝酸盐较少的情况下,其反硝化能力依然强于轻度盐渍化土壤. 本研究还发现,盐度增加会提高 $\text{N}_2\text{O}/(\text{N}_2\text{O} + \text{N}_2)$ 产物比,这是因为 *nosZ* 基因丰度受盐分胁迫而显著减少,抑制了 N_2O 向 N_2 还原而造成的.

有机肥带入的大量碳源为土壤反硝化微生物提供了丰富的电子供体,从而对反硝化过程也可能产生影响. 总体来看,本研究轻度和中度盐渍土施入有机氮均会促进土壤反硝化过程进行. 相关性分析表明,土壤反硝化能力与可溶性有机碳呈极显著正相关,说明土壤中可利用碳源是影响反硝化的重要原因,这与前人研究结果基本一致^[43,65]. 同时,本研究发现土壤呼吸与土壤反硝化能力存在极显著正相关,说明适当的有机无机氮配施比例会促进土壤呼吸,为反硝化过程提供低氧环境^[67].

Akiyama 等^[68]的研究表明,反硝化作用在有机肥料改良土壤中占主导优势,这是因为有机氮施入对反硝化基因影响较大,从而可能对反硝化能力产生一定影响. 本研究表明,配施有机氮会抑制土壤 *nirK* 反硝化菌生长,这与王军等^[69]的研究结果一致. 而轻度和中度盐渍土配施有机氮均可以提高土壤 *nirS* 和 *nosZ* 基因丰度,分别以有机无机氮各半配施和单施有机氮最佳,相关性分析表明,除轻度盐渍土 *nirS* 和 *nosZ* 与土壤铵态氮相关性不显著外,轻度和中度盐渍土均与其它土壤肥力要素呈极显著正相关关系,表明 *nirS* 和 *nosZ* 型菌更喜欢营养元素丰富的环境. 而 Tatti 等^[65]的研究发现,长期施入有机肥对 *nirK* 基因拷贝数也有明显的提升,这可能与试验田土壤性质以及定位试验周期不同有关. 此外,轻度和中度盐渍土土壤反硝化能力均与 *nirS* 和 *nosZ* 基因丰度呈极显著正相关,而与 *nirK* 基因丰度相关性不显著. 由此可见,本试验条件下, *nirS* 和 *nosZ* 型菌在土壤反硝化过程中起主要驱动作用. 反硝化作用不仅会造成氮肥损失,而且产生的 N_2O 会造成温室效应并破坏臭氧层. 本研究发现, $N_2O/(N_2O + N_2)$ 产物比与土壤 *nosZ* 基因拷贝数呈极显著负相关关系,说明提高土壤 *nosZ* 基因拷贝数会显著减少 N_2O 排放. 因此,在不同程度盐渍化土壤施入有机肥虽然会提高土壤反硝化损失,但也会促进 N_2O 还原为 N_2 .

笔者通过前面的研究发现,相比于 $NO_3^- - N$,氮素以 $NH_4^+ - N$ 形式存在更加利于土壤 N_2O 排放^[70],证明本研究区反硝化过程并不会产生较多的 N_2O . 因此,施入有机氮虽然会促进土壤反硝化作用进行,但并不会显著增大氮素损失,而适宜的有机无机氮配施利于土壤氨氧化微生物的生存,从而缩短土壤硝化过程,可以减少硝化-反硝化过程中 N_2O 排放量. 此外,盐度较高可能抑制亚硝酸盐氧化菌活性,导致施入无机氮较多的处理硝化过程停留在亚硝酸盐阶段,可能增加土壤硝化-反硝化过程中土壤 N_2O 排放. 因此,在未来的研究中,有机无机肥配施对盐渍土亚硝酸盐氧化菌活性影响应该进一步探讨.

4 结论

(1) 土壤 EC 从 $0.62 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 升高至 $1.17 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,土壤硝化势受到抑制,显著减少了土壤 AOB 的丰度和硝化贡献率,而有利于 AOA 硝化贡献率的增加;盐度升高增强了土壤反硝化能力,并促进 *nirK*、*nirS* 型反硝化菌的生长,而抑制 *nosZ* 基因丰度.

(2) 轻度盐渍土以有机无机氮各半配施 (120

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 无机氮 + $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 有机氮) 土壤硝化势及反硝化势最高, AOB 基因丰度及硝化贡献率也达到最大值,同时增大了 *nirS* 和 *nosZ* 基因丰度. 无机氮会增加 AOA 的丰度和硝化贡献率,同时会提高 *nirK* 型反硝化菌基因丰度.

(3) 中度盐渍土各施肥处理对硝化势无显著影响,同时对 AOA 丰度和硝化贡献率影响也较小. 单施有机氮 ($240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 有机氮) 可以显著提高 AOB 基因丰度,硝化贡献率也达到最大值;且增大了 *nirS* 和 *nosZ* 基因丰度,土壤反硝化势也显著增加,而增施无机氮会提高 *nirK* 型反硝化菌基因丰度.

(4) 轻度盐渍土 AOB 在硝化作用中起主导作用,盐度升高会提高 AOA 丰度及硝化贡献率,中度盐渍土由 AOB 和 AOA 共同主导土壤硝化作用;轻度和中度盐渍土反硝化作用均以 *nirS* 和 *nosZ* 起主要驱动作用.

参考文献:

- [1] Osman K T. Saline and sodic soils [A]. In: Osman K T (Ed.). Management of Soil Problems [M]. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. 255-298.
- [2] Irshad M, Honna T, Yamamoto S, et al. Nitrogen mineralization under saline conditions [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, **36**(11-12): 1681-1689.
- [3] Abalos D, Jeffery S, Sanz-cobena A, et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, **189**: 136-144.
- [4] Allen DE, Kingston G, Rennenberg H, et al. Effect of nitrogen fertilizer management and waterlogging on nitrous oxide emission from subtropical sugarcane soils [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, **136**(3-4): 209-217.
- [5] Arrigo K R. Marine microorganisms and global nutrient cycles [J]. Nature, 2005, **437**(7057): 349-355.
- [6] Hadrich J. Managing the economics of soil salinity in the Red River Valley of North Dakota [J]. Journal of the ASFMRA, 2012, **2012**: 80-88.
- [7] Thapa R, Wick A, Chatterjee A. Response of spring wheat to sulfate-based salinity stress under greenhouse and field conditions [J]. Agronomy Journal, 2017, **109**(2): 442-454.
- [8] Céccoli G, Senn M E, Bustos D, et al. Genetic variability for responses to short-and long-term salt stress in vegetative sunflower plants [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, **175**(6): 882-890.
- [9] Akhtar M, Hussain F, Ashraf M Y, et al. Influence of salinity on nitrogen transformations in soil [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2012, **43**(12): 1674-1683.
- [10] Elgharably A, Marschner P. Microbial activity and biomass and N and P availability in a saline sandy loam amended with inorganic N and lupin residues [J]. European Journal of Soil Biology, 2011, **47**(5): 310-315.
- [11] Walpola B C, Arunakumara K K I U. Effect of salt stress on decomposition of organic matter and nitrogen mineralization in animal manure amended soils [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2010, **5**(1): 9-18.
- [12] Chandra S, Joshi H C, Pathak H, et al. Effect of potassium salts

- and distillery effluent on carbon mineralization in soil [J]. *Bioresource Technology*, 2002, **83**(3): 255-257.
- [13] Nannipieri P, Ascher J, Ceccherini M T, *et al.* Microbial diversity and soil functions [J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, **68**(1): 12-26.
- [14] Wang Y F, Gu J D. Effects of allylthiourea, salinity, and pH on ammonia/ammonium-oxidizing prokaryotes in mangrove sediment incubated in laboratory microcosms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98**(7): 3257-3274.
- [15] Emel S, Gerard M. Diversity and spatio-temporal distribution of ammonia-oxidizing *Archaea* and *Bacteria* in sediments of the Westerschelde estuary [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2008, **64**(2): 175-186.
- [16] Franklin R B, Morrissey E M, Morina J C. Changes in abundance and community structure of nitrate-reducing bacteria along a salinity gradient in tidal wetlands [J]. *Pedobiologia*, 2017, **60**: 21-26.
- [17] Fawcett S E, Lomas M W, Casey J R, *et al.* Assimilation of upwelled nitrate by small eukaryotes in the Sargasso Sea [J]. *Nature Geoscience*, 2011, **4**(10): 717-722.
- [18] Kowalchuk G A, Stephen J R. Ammonia-oxidizing bacteria: a model for molecular microbial ecology [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2001, **55**(1): 485-529.
- [19] Cavagnaro T R, Jackson L E, Hristova K, *et al.* Short-term population dynamics of ammonia oxidizing bacteria in an agricultural soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **40**(1): 13-18.
- [20] Zhou M H, Butterbach-Bahl K, Vereecken H, *et al.* A meta-analysis of soil salinization effects on nitrogen pools, cycles and fluxes in coastal ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(3): 1338-1352.
- [21] Bernhard A E, Donn T, Giblin A E, *et al.* Loss of diversity of ammonia-oxidizing bacteria correlates with increasing salinity in an estuary system [J]. *Environmental Microbiology*, 2005, **7**(9): 1289-1297.
- [22] Jiang S Q, Yu Y N, Gao R W, *et al.* High-throughput absolute quantification sequencing reveals the effect of different fertilizer applications on bacterial community in a tomato cultivated coastal saline soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **687**(15): 601-609.
- [23] Giblin A E, Weston N B, Banta G T, *et al.* The effects of salinity on nitrogen losses from an oligohaline estuarine sediment [J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, **33**(5): 1054-1068.
- [24] Henderson S L, Dandie C E, Patten C L, *et al.* Changes in denitrifier abundance, denitrification gene mRNA levels, nitrous oxide emissions, and denitrification in anoxic soil microcosms amended with glucose and plant residues [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(7): 2155-2164.
- [25] Zhang L H, Zeng G M, Zhang J C, *et al.* Response of denitrifying genes coding for nitrite (*nirK* or *nirS*) and nitrous oxide (*nosZ*) reductases to different physico-chemical parameters during agricultural waste composting [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(9): 4059-4070.
- [26] Jones C M, Hallin S. Ecological and evolutionary factors underlying global and local assembly of denitrifier communities [J]. *The ISME Journal*, 2010, **4**(5): 633-641.
- [27] Philippot L, Andert J, Jones C M, *et al.* Importance of denitrifiers lacking the genes encoding the nitrous oxide reductase for N₂O emissions from soil [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(3): 1497-1504.
- [28] Miao Y, Liao R H, Zhang X X, *et al.* Metagenomic insights into salinity effect on diversity and abundance of denitrifying bacteria and genes in an expanded granular sludge bed reactor treating high-nitrate wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **277**: 116-123.
- [29] Zhai S Y, Ji M, Zhao Y X, *et al.* Shift of bacterial community and denitrification functional genes in biofilm electrode reactor in response to high salinity [J]. *Environmental Research*, 2020, **184**, doi: 10.1016/j.envres.2019.109007.
- [30] Magalhães C, Bano N, Wiebe W J, *et al.* Dynamics of nitrous oxide reductase genes (*nosZ*) in intertidal rocky biofilms and sediments of the Douro River estuary (Portugal), and their relation to N-biogeochemistry [J]. *Microbial Ecology*, 2008, **55**(2): 259-269.
- [31] Lim S J, Shin M N, Son J K, *et al.* Evaluation of soil pore-water salinity using a Decagon GS3 sensor in saline-alkali reclaimed tidal lands [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, **132**: 49-55.
- [32] Feng Z Z, Wang X K, Feng Z W. Soil N and salinity leaching after the autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao Irrigation District, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, **71**(2): 131-143.
- [33] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析 [J]. *生态学报*, 2011, **31**(16): 4549-4559.
- Du J, Yang P L, Li Y K, *et al.* Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(16): 4549-4559.
- [34] Wei W, Isobe K, Shiratori Y, *et al.* N₂O emission from cropland field soil through fungal denitrification after surface applications of organic fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **69**: 157-167.
- [35] Tejada M, Garcia C, Gonzalez J L, *et al.* Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(6): 1413-1421.
- [36] López-Valdez F, Fernández-Luqueño F, Luna-Guido M L, *et al.* Microorganisms in sewage sludge added to an extreme alkaline saline soil affect carbon and nitrogen dynamics [J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, **45**(3): 225-231.
- [37] Fan F L, Yang Q B, Li Z J, *et al.* Impacts of organic and inorganic fertilizers on nitrification in a cold climate soil are linked to the bacterial ammonia oxidizer community [J]. *Microbial Ecology*, 2011, **62**(4): 982-990.
- [38] Xun W B, Zhao J, Xue C, *et al.* Significant alteration of soil bacterial communities and organic carbon decomposition by different long-term fertilization management conditions of extremely low-productivity arable soil in South China [J]. *Environmental Microbiology*, 2016, **18**(6): 1907-1917.
- [39] Mavi M S, Sanderman J, Chittleborough D J, *et al.* Sorption of dissolved organic matter in salt-affected soils: Effect of salinity, sodicity and texture [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **435-436**: 337-344.
- [40] Shen W S, Xu T T, Liu J J, *et al.* Long-term application of organic manure changes abundance and composition of ammonia-oxidizing archaea in an acidic red soil [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, **61**(4): 620-628.
- [41] Thangarajan R, Bolan N S, Tian G L, *et al.* Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **465**: 72-96.
- [42] Cui P Y, Fan F L, Yin C, *et al.* Long-term organic and

- inorganic fertilization alters temperature sensitivity of potential N_2O emissions and associated microbes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **93**: 131-141.
- [43] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [44] Taylor A E, Zeglin L H, Wanzek T A, *et al.* Dynamics of ammonia-oxidizing archaea and bacteria populations and contributions to soil nitrification potentials [J]. *The ISME Journal*, 2012, **6**(11): 2024-2032.
- [45] Šimek M, Kalčík J. Carbon and nitrate utilization in soils; the effect of long-term fertilization on potential denitrification [J]. *Geoderma*, 1998, **83**(3-4): 269-280.
- [46] Park S J, Park B J, Rhee S K. Comparative analysis of archaeal 16S rRNA and *amoA* genes to estimate the abundance and diversity of ammonia-oxidizing archaea in marine sediments [J]. *Extremophiles*, 2008, **12**(4): 605-615.
- [47] Rotthauwe J H, Witzel K P, Liesack W. The ammonia monooxygenase structural gene *amoA* as a functional marker; molecular fine-scale analysis of natural ammonia-oxidizing populations [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(12): 4704-4712.
- [48] Hallin S, Lindgren P E. PCR detection of genes encoding nitrite reductase in denitrifying bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(4): 1652-1657.
- [49] Zhou Z F, Zheng Y M, Shen J P, *et al.* Response of denitrification genes *nirS*, *nirK*, and *nosZ* to irrigation water quality in a Chinese agricultural soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(9): 1644-1652.
- [50] Kloos K, Mergel A, Rösch C, *et al.* Denitrification within the genus *Azospirillum* and other associative bacteria [J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 2001, **28**(9): 991-998.
- [51] Min W, Guo H J, Zhang W, *et al.* Irrigation water salinity and N fertilization: Effects on ammonia oxidizer abundance, enzyme activity and cotton growth in a drip irrigated cotton field [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, **15**(5): 1121-1131.
- [52] Jin T, Zhang T, Ye L, *et al.* Diversity and quantity of ammonia-oxidizing *Archaea* and *Bacteria* in sediment of the Pearl River Estuary [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(3): 1137-1145.
- [53] Wang H T, Gilbert J A, Zhu Y G, *et al.* Salinity is a key factor driving the nitrogen cycling in the mangrove sediment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 1342-1349.
- [54] Zhang Y, Chen L J, Dai T J, *et al.* The influence of salinity on the abundance, transcriptional activity, and diversity of AOA and AOB in an estuarine sediment: a microcosm study [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(22): 9825-9833.
- [55] Santos J P, Mendes D, Monteiro M, *et al.* Salinity impact on ammonia oxidizers activity and *amoA* expression in estuarine sediments [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, **211**: 177-187.
- [56] 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.
- [57] Li Y Y, Chapman S J, Nicol G W, *et al.* Nitrification and nitrifiers in acidic soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **116**: 290-301.
- [58] Wang Q, Zhang L M, Shen J P, *et al.* Nitrogen fertiliser-induced changes in N_2O emissions are attributed more to ammonia-oxidising bacteria rather than archaea as revealed using 1-octyne and acetylene inhibitors in two arable soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, **52**(8): 1163-1171.
- [59] Di H J, Cameron K C, Shen J P, *et al.* Ammonia-oxidizing bacteria and archaea grow under contrasting soil nitrogen conditions [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, **72**(3): 386-394.
- [60] Pratscher J, Dumont M G, Conrad R. Ammonia oxidation coupled to CO_2 fixation by archaea and bacteria in an agricultural soil [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(10): 4170-4175.
- [61] Lu L, Han W Y, Zhang J B, *et al.* Nitrification of archaeal ammonia oxidizers in acid soils is supported by hydrolysis of urea [J]. *The ISME Journal*, 2012, **6**(10): 1978-1984.
- [62] Martens-Habbena W, Berube P M, Urakawa H, *et al.* Ammonia oxidation kinetics determine niche separation of nitrifying Archaea and Bacteria [J]. *Nature*, 2009, **461**(7266): 976-979.
- [63] 周慧, 史海滨, 徐昭, 等. 化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(7): 1649-1656.
- Zhou H, Shi H B, Xu Z, *et al.* Effects of combined application of chemical and organic fertilizers on ammonia volatilization and maize yield in salinized soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(7): 1649-1656.
- [64] Chu H Y, Fujii T, Morimoto S, *et al.* Population size and specific nitrification potential of soil ammonia-oxidizing bacteria under long-term fertilizer management [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(7): 1960-1963.
- [65] Tatti E, Goyer C, Zebarth B J, *et al.* Short-term effects of mineral and organic fertilizer on denitrifiers, nitrous oxide emissions and denitrification in long-term amended vineyard soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, **77**(1): 113-122.
- [66] 刘浩荣, 宋海星, 刘强, 等. 喷施氯化钾对小白菜体内硝酸盐累积的影响 [J]. *土壤*, 2008, **40**(2): 222-225.
- Liu H R, Song H X, Liu Q, *et al.* Effect of spraying KCL solution on nitrate accumulation in the Chinese cabbage [J]. *Soils*, 2008, **40**(2): 222-225.
- [67] Chen Z, Hou H J, Zheng Y, *et al.* Influence of fertilisation regimes on a *nosZ*-containing denitrifying community in a rice paddy soil [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, **92**(5): 1064-1072.
- [68] Akiyama H, McTaggart I P, Ball B C, *et al.* N_2O , NO, and NH_3 emissions from soil after the application of organic fertilizers, urea and water [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, **156**(1): 113-129.
- [69] 王军, 申田田, 车钊, 等. 有机和无机肥配比对黄褐土硝化和反硝化微生物丰度及功能的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, **24**(3): 641-650.
- Wang J, Shen T T, Che Z, *et al.* Effects of combination of organic and inorganic fertilizers on abundances of nitrifiers and denitrifiers and their function in yellow-cinnamon soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(3): 641-650.
- [70] 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 等. 有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N_2O 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3811-3821.
- Zhou H, Shi H B, Guo J W, *et al.* Effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on N_2O emissions from saline soil [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3811-3821.

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System; Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)