

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



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -NO ₃ ⁻) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N_2O 排放的影响

周慧^{1,2}, 史海滨^{1,2*}, 郭珈玮^{1,2}, 张文聪^{1,2}, 王维刚^{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: 选取内蒙古河套灌区轻度盐渍土 S_1 (EC 为 $0.46 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 及中度盐渍土 S_2 (EC 为 $1.07 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) 为研究对象, 在等施氮量条件下, 采用静态箱-气相色谱法研究了不同有机无机肥配比: CK (不施肥)、 U_1 ($240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化肥)、 U_3O_1 ($180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化肥 + $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机肥)、 U_1O_1 ($120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化肥 + $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机肥)、 U_1O_3 ($60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化肥 + $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机肥) 和 O_1 ($240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机肥) 对春玉米农田土壤 N_2O 排放的影响, 旨在明确不同施肥策略下土壤 N_2O 排放特征, 为制定盐渍化农田合理的减排措施提供理论依据。结果表明, 2 种不同程度盐渍化土壤 N_2O 排放存在显著差异, 同一处理 S_2 土壤 N_2O 排放总量较 S_1 土壤高出 $11.86\% \sim 47.23\%$ ($P < 0.05$)。各施肥处理对土壤 N_2O 排放通量影响趋势基本一致, 即施肥后出现排放高峰, 基肥和追肥后累积排放量占整个生育期排放量 60% 左右。适当施入有机肥可以显著降低土壤 N_2O 排放, S_1 和 S_2 盐渍土分别以 U_1O_1 及 O_1 处理 N_2O 排放量最小, 较 U_1 处理显著降低 33.62% 和 28.51% ($P < 0.05$), 同时可以获得较高的玉米产量。各施肥处理 N_2O 排放通量与土壤 NH_4^+-N 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 而与土壤 NO_3^--N 含量呈负相关关系, 表明硝化作用是盐渍化玉米农田 N_2O 产生的主要途径, 配施有机肥可以持续减少土壤 NH_4^+-N 供给而减少 N_2O 的排放。从玉米产量及减少温室效应的角度, 得到本地区适宜的施肥管理模式: 轻度盐渍土为 $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机肥 + $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化肥, 中度盐渍土为 $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有机肥。

关键词: 氧化亚氮 (N_2O); 盐渍化土壤; 有机无机肥配施; 铵态氮 (NH_4^+-N); 硝态氮 (NO_3^--N); 土壤孔隙充水率 (WFPS)

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3811-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202002046

Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N_2O Emissions from Saline Soil

ZHOU Hui^{1,2}, SHI Hai-bin^{1,2*}, GUO Jia-wei^{1,2}, ZHANG Wen-cong^{1,2}, WANG Wei-gang^{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: Combining organic fertilizer with chemical fertilizer may affect the microbial processes related to nitrous oxide (N_2O) emissions under different degrees of soil salinization. A mild saline soil (S_1 ; electrical conductivity (EC) $0.46 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) and moderate saline soil (S_2 ; EC $1.07 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) in the Hetao irrigation district of Inner Mongolia were selected. Under equal N rates, the study involved five treatments: U_1 ($240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of chemical fertilizer), U_3O_1 ($180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of chemical fertilizer + $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of organic fertilizer), U_1O_1 ($120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of chemical fertilizer + $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of organic fertilizer), U_1O_3 ($60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of chemical fertilizer + $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of organic fertilizer), and O_1 ($240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of organic fertilizer). In addition, a blank control treatment (CK) was employed to investigate the effects of different fertilization treatments on the N_2O emissions from the two saline soils. The results showed that the total N_2O emissions from the S_2 soil in the same treatment were between 11.86% and 47.23% higher than those from the S_1 soil ($P < 0.05$). the dynamic trend of the soil N_2O fluxes among the different treatments were similar. The peak N_2O emissions occurred after fertilization, and the N_2O cumulative emission fluxes accounted for nearly 60% of the emissions during the entire growth period. The proper application of organic fertilizer could significantly reduce the soil N_2O emission; the S_1 and S_2 saline soils treated with U_1O_1 and O_1 , respectively, had the lowest N_2O emissions, whereby there were significant reductions of 33.62% and 28.51% in comparison to the U_1 treatment ($P < 0.05$). Moreover, higher maize yields could be obtained and the N_2O flux was significantly positively correlated with the NH_4^+-N content ($P < 0.01$) but negatively correlated with the NO_3^--N content. The results demonstrated that nitrification was the main way to produce N_2O in the studied salinized maize farmland, and that the addition of organic fertilizer could reduce the N_2O production by decreasing the soil NH_4^+-N content. Based on the changes in the corn yield and a reduction in the greenhouse effect, suitable organic and inorganic fertilizer management models for the Hetao irrigation area were the mild saline soil: $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of urea + $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of organic fertilizer, and the moderate saline soil: $240 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of organic fertilizer.

Key words: N_2O ; salinization soil; combined application of organic and inorganic fertilizers; NH_4^+-N ; NO_3^--N ; water-filled pore spaces (WFPS)

收稿日期: 2020-02-08; 修订日期: 2020-03-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51539005); 国家自然科学基金项目 (51769024); 内蒙古自治区科技重大专项 (zdzx2018059)

作者简介: 周慧 (1994 ~), 男, 博士生, 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

全球变暖和土壤盐渍化是国际上存在的主要问题. N_2O 通过微生物介导的硝化和反硝化过程在土壤中自然产生,是导致全球变暖的主要温室气体之一^[1]. 有研究表明,全球温室效应有 6% 的比例是由于 N_2O 形成^[2], 目前,大气中 N_2O 浓度仍以每年 0.2%~0.3% 的速度递增^[3]. 据报道,全球农业土壤每年 N_2O -N 排放量估计可达到 3.8~6.8 Tg^[4],是最主要的 N_2O 释放源^[5],其中每年因施用氮肥(含有机氮)所造成直接或间接 N_2O -N 排放约为 4 Tg^[6]. 因此,合理利用氮肥资源方式,以减少 N_2O 排放及提高粮食生产效率是当前亟待解决的科学问题.

盐渍化土壤是地球上广泛存在的一种土壤类型,全球约有 3.97×10^8 hm^2 土地受盐分影响^[7]. 过量盐分不仅会降低作物产量,而且还会干扰土壤微生物活性,导致由微生物介导的土壤过程也会受到影响^[8,9]. 因此,盐浓度可能对 N_2O 的排放产生显著影响^[10]. 尚会来等^[11]的研究表明,随着盐度升高,硝化过程中 N_2O 产量和转化率均有大幅度上升. Oren^[12]的研究表明,在嗜盐微生物存在的情况下,反硝化过程在盐接近饱和时普遍存在,这可能导致大量 N_2O 排放. 代伟等^[13]的研究发现,高盐碱环境会抑制 N_2O 还原酶的活性,从而使异养反硝化过程产生大量 N_2O . 可见,对于限制盐渍化土壤中 N_2O 的排放极为重要.

由于盐渍化土壤生产力较差,农民通常大量施用氮肥以提高产量,但施用氮肥的同时也会造成可溶性盐的累积^[14],从而对作物生长会产生抑制作用^[15]. 有机肥是中国最为传统的农业肥料^[16],其作为改良土壤的一种有效方法在世界范围内被广泛采用. 盐渍化农田中施加有机肥能降低土壤容重、电导率及交换性钠离子^[17],还可以为微生物提供能

量^[18],提高微生物活性及微生物量^[19]. 有机物质的输入通过影响微生物的活动,进而可能影响 N_2O 的排放^[20,21]. Reddy 等^[22]的研究表明,施用有机肥有利于减少受盐影响土壤的 N_2O 排放. 也有学者研究发现施入有机肥会促进 N_2O 排放^[23]. 有机肥对盐渍化土壤 N_2O 排放的影响尚未有一致结论.

我国盐渍化土壤覆盖面积约为 3 670 万 hm^2 ^[24]. 内蒙古河套灌区是我国重要粮食产区,盐渍化面积已达到灌溉总面积的 50% 以上^[25],盐渍化程度较高且差异较大. 当地过分依赖化肥大量投入造成生态环境恶化日益严重. 因此,针对灌区不同程度盐渍化土壤制定合理的施肥模式对氮素养分高效利用及降低氮素面源污染具有重要意义. 基于以上背景,本文针对不同程度盐渍化玉米农田为研究对象,探讨不同有机无机氮肥配施比例对春玉米农田土壤 N_2O 排放特征的影响,以期为不同程度盐渍化土壤氮循环、农田增汇减排及减小环境污染提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于内蒙古河套灌区解放闸灌域沙壕渠试验站($40^{\circ}54'40''N$, $107^{\circ}9'57''E$,海拔 1 034 m)进行,试验区属于典型的干旱地区,多年平均降雨量 143 mm,蒸发量 2 100 mm,多年平均气温达到 7.7℃,无霜期为 135~150 d. 大于 10℃ 的年积温为 3 551℃,年平均日照时数 3 200 h,年冻融期大约在 180 d 左右. 全年太阳总辐射约为 6 000 $MJ \cdot m^{-2}$,热量充足. 土壤为典型的硫酸盐-氯化物型盐土,0~20 cm 土层为粉壤土,20~40 cm 土层为粉质黏壤土,40~60 cm 土层为粉壤土,60~100 cm 为砂壤土. 施肥处理前耕层初始土壤性质详见表 1.

表 1 试验区土壤基本性状¹⁾

Table 1 Basic properties of the tested soils

盐渍化程度	处理	有机质 / $g \cdot kg^{-1}$	全氮 / $g \cdot kg^{-1}$	硝态氮 / $mg \cdot kg^{-1}$	铵态氮 / $mg \cdot kg^{-1}$	速效磷 / $mg \cdot kg^{-1}$	速效钾 / $mg \cdot kg^{-1}$	pH
S ₁	CK	13.25cd	1.21b	13.39c	5.98b	35.26c	190.24c	8.2a
	U ₁	12.85d	1.33b	23.12b	6.76a	34.67c	183.23c	8.2a
	U ₃ O ₁	14.23bc	1.29b	25.31b	6.89a	37.69bc	185.07bc	8.2a
	U ₁ O ₁	14.56abc	1.47a	29.11a	7.86a	41.23ab	205.34ab	8.3a
	U ₁ O ₃	15.05ab	1.49a	28.58a	7.03a	43.68a	209.46a	8.3a
	O ₁	15.61a	1.55a	27.95a	6.80a	40.63ab	215.18a	8.3a
S ₂	CK	12.15c	0.89cd	8.81d	2.99c	26.57a	172.67d	8.4a
	U ₁	11.78c	0.8d	13.15c	3.04c	22.45bcd	165.65bc	8.4a
	U ₃ O ₁	12.64bc	0.93bc	14.25bc	3.78b	21.69cd	170.33bc	8.4a
	U ₁ O ₃	13.54ab	1.09b	15.40b	4.15a	22.39b	178.98abc	8.4a
	U ₁ O ₃	14.02a	1.21a	16.77a	4.27a	20.47d	184.09ab	8.5a
	O ₁	14.37a	1.16ab	17.13a	4.39a	23.46bc	189.9a	8.5a

1) 同列不同小写字母表示处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著

1.2 试验设计

本试验开展于 2019 年,为连续定位试验的第 2 a,种植作物为玉米(内单 314),播种日期为 4 月 25 日,收获日期为 9 月 13 日.参考当地优化畦灌灌水定额 750 m³·hm⁻²作为灌水量^[26],优化施氮量 240 kg·hm⁻²为施氮总量,在 S₁(轻度盐渍土,EC: 0.46 dS·m⁻¹)、S₂(中度盐渍土,EC: 1.07 dS·m⁻¹)盐渍化农田上设置 6 个处理,重复 3 次,分别为:CK(不施肥)、U₁(240 kg·hm⁻²化肥)、U₃O₁(180 kg·hm⁻²化肥+60 kg·hm⁻²有机肥)、U₁O₁(120 kg·hm⁻²化肥+120 kg·hm⁻²有机肥)、U₁O₃(60 kg·hm⁻²化肥+180 kg·hm⁻²有机肥)、O₁(240 kg·hm⁻²有机肥),具体施肥设计见表 2. 共计 36 个小区,小区面积为 30 m²(6 m×5 m).各小区间设有 1 m 宽的隔离带并打起 15 cm 高田埂.供试肥料种类:无机肥料为尿素(含氮 46%),有机肥为商品有机肥(由玉米秸秆腐熟后喷浆造粒而成,含 N10%,P₂O₅ 1%,K₂O 1%,有机质≥45%,腐殖酸≥17%,S≥8%).有机肥和磷肥(过磷酸钙 50 kg·hm⁻²)于耕作前作为基肥一次性施用(均匀撒施,并旋耕 20 cm),化肥按 1:1 比例分别于玉米播种期和拔节期灌水时施入.

表 2 试验处理设计

Table 2 Design of the experimental treatments

处理	施氮量/kg·hm ⁻²		
	基肥(2019-04-25)	追肥(2018-06-14)	
	有机肥	尿素	尿素
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 测定项目及方法

利用静态暗箱法进行气体采集,其尺寸为 0.5 m×0.5 m×0.5 m,采样点定于玉米垄间,于播种后随机确定,将箱子的底座密封槽埋在土壤中,在密封槽中加入水,防止箱内气体外溢,箱内放置一温度计,用于测定箱内温度水平.取样时用 3 通阀进气,每次取样用 100 mL 注射器从采样箱采样口抽气约 100 mL,气体采集时间间隔 10 min,每次采样 4 个.采集的气体在实验室用 Agilent 6820 气相色谱仪(Agilent 6820D, Agilent corporation)进行测定分析.气体采集时间于 2019 年 4~9 月,在灌溉(6 月 16 日、7 月 12 日和 7 月 27 日)、施肥(4 月 25 日和 6 月 16 日)和降雨(6 月 21 日)后连续取样,其他时间取样频率约 1 周 1 次,并根据作物生长及季节变化适当调整.

每次采集完气体的同时,采用 5 点法取 0~20 cm 土层,过 2 mm 筛,一部分用于测定土壤含水率,一部分用氯化钙浸提法对土壤矿质氮含量进行提取^[27].

由以下方法计算 N₂O 气体排放通量^[28]:

$$K = \rho \times H \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中, K 为 N₂O 排放通量[μg·(m²·h)⁻¹], ρ 为标准状态下 N₂O 气体密度,其值为 1.977 g·L⁻¹; H 为静态暗箱高度(cm), dc/dt 为采样时 N₂O 浓度随时间变化的斜率, T 为采样箱内平均温度(°C),273 为气体方程常数.

N₂O 气体排放总量计算公式为^[28]:

$$K_t = \sum \frac{K_{i+1} + K_i}{2} (D_{i+1} - D_i) \times 24 \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, K_t 为 N₂O 排放总量(mg·m⁻²), K_i 和 K_{i+1} 为第 i 次和第 $i+1$ 次采样时 N₂O 排放通量[μg·(m²·h)⁻¹], D_i 和 D_{i+1} 为第 i 和 $i+1$ 次采样时间(d).

N₂O 排放系数计算公式^[28]:

$$f = \frac{F_N - F_{CK}}{C_N} \times 100\% \quad (3)$$

式中, f 为 N₂O 排放系数, F_N 为施氮处理 N₂O 排放量, F_{CK} 为对照处理 N₂O 排放量, C_N 为氮肥施用量(kg·hm⁻²).

土壤孔隙充水率(water-filled pore spaces, WFPS)计算公式为:

$$WFPS = \frac{VWC \times BD}{1 - BD/2.65} \times 100\% \quad (4)$$

式中,VWC 为土壤重量含水量,BD 为土壤容重(g·cm⁻³),并假定土壤密度为 2.65 g·cm⁻³.

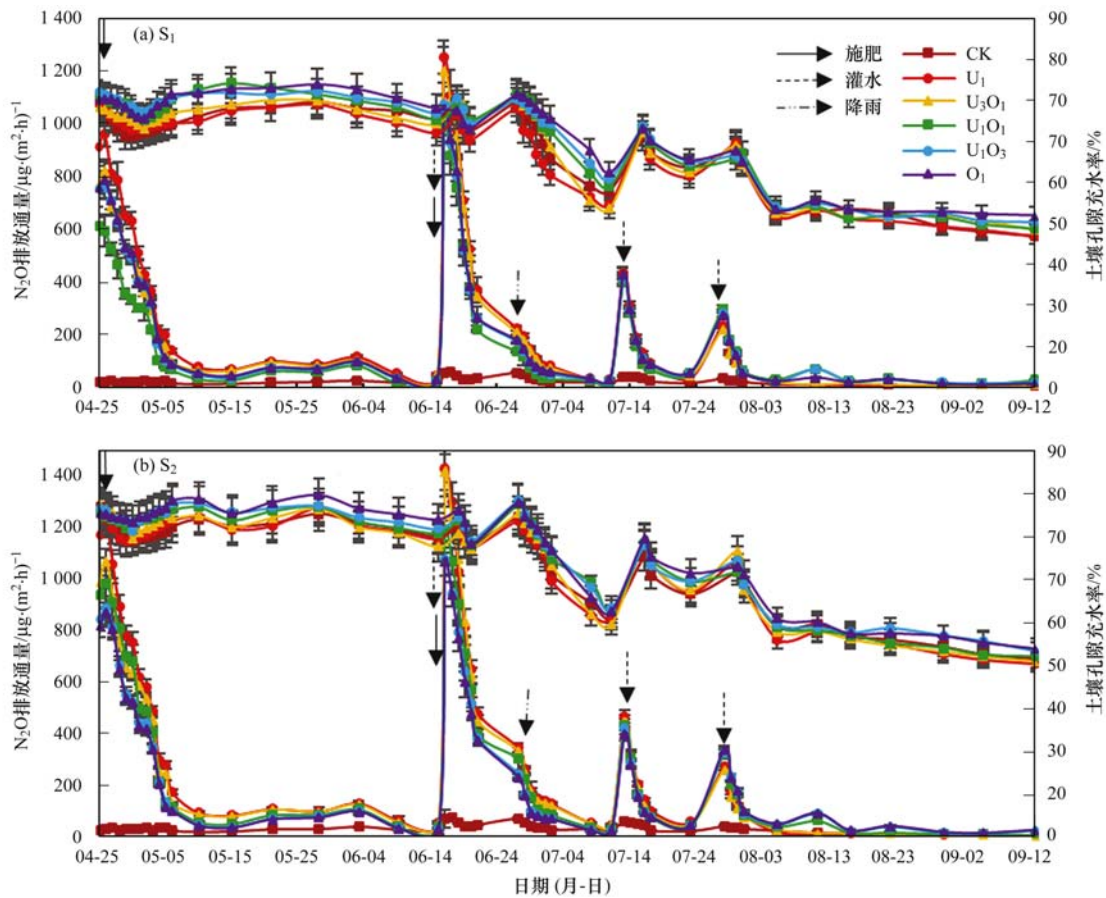
1.4 数据分析

用 SPSS 22.0 与 Excel 2016 进行分析及图表的绘制,采用单因素方差分析和 LSD 法比较不同处理 N₂O 气体排放通量和排放总量的差异.利用 Pearson 相关系数检验判断 N₂O 排放量与影响因子之间的相关性及其显著性水平.

2 结果与分析

2.1 不同程度盐渍土各处理土壤 N₂O 通量变化

CK 处理在 S₁、S₂ 土壤 N₂O 排放通量季节性变化不明显(图 1),变化范围分别在 4.93~61.55 μg·(m²·h)⁻¹和 13.22~75.12 μg·(m²·h)⁻¹之间.在整个玉米生长季内,各施肥处理 N₂O 共出现 2 次较大的排放峰,分别出现在基肥(4 月 25 日)、追肥(6 月 15 日)后,排放通量变化趋势基本一

图1 不同处理土壤 N_2O 排放变化Fig. 1 N_2O cumulative emission flux for different treatments

致,即在施肥后 1~2 d 迅速达到排放峰,随后开始逐渐下降,在作物其余生长阶段,各处理 N_2O 排放通量均维持在较低水平. 在整个观测期内,各处理土壤孔隙充水率受灌水及降雨影响出现 4 次峰值,其最大值为 79.76%,最小值为 36.78%. 土壤孔隙充水率和 N_2O 变化趋势较为一致,二者之间呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$),可见,土壤孔隙充水率是春玉米土壤 N_2O 排放的主要控制因子之一.

同一处理 S_2 土壤 N_2O 排放通量明显高于 S_1 土壤,但随着有机肥施入比例增加呈减缓态势. 在 S_1 土壤,各处理在玉米生长前中期表现出随有机肥施入比例增大 N_2O 排放通量先降后升的趋势,其大小顺序基本表现为 $\text{U}_1 > \text{U}_3\text{O}_1 > \text{O}_1 > \text{U}_1\text{O}_3 > \text{U}_1\text{O}_1$,而在生育后期施入有机肥比例较大的处理 N_2O 排放通量要高于施入化肥较多的处理. 在整个玉米生长季内, U_1 、 U_3O_1 、 U_1O_1 、 U_1O_3 及 O_1 处理平均排放通量分别为 297.82、266.90、211.51、247.41 和 251.10 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, U_1O_1 处理显著低于其余处理 ($P < 0.05$).

在 S_2 土壤,各施肥处理在作物生育前中期表现出有机肥施入比例越大 N_2O 排放通量越小的趋势,

而在作物生长后期则呈现出相反态势. 在春玉米生长季内 U_1 、 U_3O_1 、 U_1O_1 、 U_1O_3 及 O_1 处理平均排放通量分别达到 364.39、336.06、310.55、278.15 和 271.01 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,以 O_1 处理最低,与 U_1O_3 处理之间无显著性差异,但显著低于其余处理 ($P < 0.05$).

2.2 不同程度盐渍土各处理土壤 N_2O 排放总量、排放系数及作物产量

由表 3 可知,同一处理 S_2 土壤 N_2O 累积排放量均显著高于 S_1 土壤, S_2 土壤 CK、 U_1 、 U_3O_1 、 U_1O_1 、 U_1O_3 和 O_1 处理 N_2O 排放总量较 S_1 土壤分别高出 47.23%、23.97%、26.63%、43.26%、14.78% 和 11.86%,可见随着土壤盐度的增加 N_2O 排放累积量也随之增加. 有机无机配施比例对不同土壤盐分条件 N_2O 排放累积量影响各异,在 S_1 土壤盐分条件下, N_2O 累积量随有机肥施入比例呈先降后升的趋势,以 U_1 处理最大,为 4.97 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较其余施肥处理显著高出 10.16%~33.50% ($P < 0.05$), U_3O_1 、 U_1O_3 和 O_1 处理之间 N_2O 排放总量无显著性差异,较 U_1O_1 处理显著高出 14.64%~21.28% ($P < 0.05$). 在 S_2 土壤盐分条件下, U_1 处理 N_2O 排放总量为 6.17 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,随着有机肥施入比例增大

N₂O 排放总量逐渐减少, O₁ 处理 N₂O 排放量较其余处理显著降低(除与 U₁O₃ 处理不显著外)1.98%~28.47% ($P < 0.05$).

本试验 S₁ 土壤各处理 N₂O 直接排放系数介于 1.23%~1.76% 之间(表 3), U₁ 处理 N₂O 的排放系数最高, 显著高于其它处理($P < 0.05$); U₃O₁ 处理 N₂O 的排放系数与 U₁O₃ 及 O₁ 处理相似, 并显著高于 U₁O₁ 处理($P < 0.05$). S₂ 土壤各处理 N₂O 直接排放系数介于 1.53~2.10 之间, U₁ 处理 N₂O 的排放系数显著高于其余处理($P < 0.05$); U₃O₁ 的排放系数与 U₁O₁ 处理相似, 显著高于 U₁O₃ 和 O₁ 处理($P < 0.05$).

随着土壤盐分增加玉米产量显著降低(表 3), 相同处理下 S₁ 土壤玉米产量较 S₂ 土壤显著提高 41.81%~67.03% ($P < 0.05$); 不同有机无机肥配施比例对于作物产量同样具有显著影响, 在 S₁ 盐渍土, U₁O₁ 处理玉米产量最高, 为 11 902.91 kg·hm⁻², 此外, U₁O₃ 处理也具有较高产量, 二者之间无显著性差异($P > 0.05$), 但分别较单施化肥显著高出 19.78% 和 11.58% ($P < 0.05$). 在 S₂ 盐渍土, 表现出随着有机肥施入比例越大产量越大的趋势, O₁ 处理玉米产量最大, 为 7 609.67 kg·hm⁻², 与 U₁O₁ 及 U₁O₃ 处理之间差异不显著($P < 0.05$), 较单施化肥显著高出 17.57% ($P < 0.05$).

表 3 不同施肥处理下土壤 N₂O 累积排放量、直接排放系数和作物产量¹⁾

处理	累积排放量/kg·hm ⁻²		排放系数/%		作物产量/kg·hm ⁻²	
	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
CK	0.76e	1.12e	—	—	7 789.34d	5 319.83d
U ₁	4.97a	6.17a	1.76a	2.10a	9 937.23c	6 472.33c
U ₃ O ₁	4.51b	5.71b	1.56b	1.91b	10 652.57bc	6 623.51bc
U ₁ O ₁	3.72d	5.33c	1.23c	1.76b	11 902.91a	7 126.26ab
U ₁ O ₃	4.24c	4.89d	1.46b	1.57c	11 088.12ab	7 370.49a
O ₁	4.29c	4.8d	1.47b	1.53c	10 791.37bc	7 609.67a

1) 同列不同小写字母表示处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著, “—”表示文章中没有相关数据

2.3 降水量及土壤温度变化

春玉米生长季内, 降水量及土壤温度及动态变化见图 2. 试验期内降水量较少, 总量为 52.2 mm, 且主要集中在 6 月下旬, 6 月 21~26 日降雨量达

36.86 mm. 分析试验期内土壤地温变化得到, 5 cm 处土壤温度要高于 10 cm 处土壤温度, 变化范围分别为 10.5~36.9℃ 和 9.2~34.0℃, 春秋季节温度较低, 夏季最高.

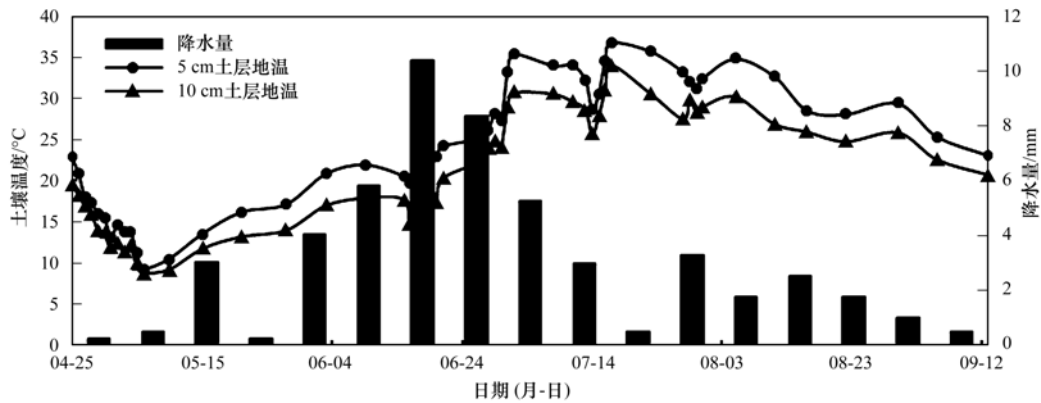


图 2 降水量及土壤 5 cm 和 10 cm 温度变化

Fig. 2 Changes in precipitation and soil temperature at 5 cm and 10 cm

2.4 不同程度盐渍土各处理土壤 NH₄⁺-N 及 NO₃⁻-N 含量变化

图 3 为玉米生长季内土壤 NH₄⁺-N 的动态变化情况. 可以看出, CK 处理在整个生育期内土壤 NH₄⁺-N 含量均处于较低水平, S₁ 和 S₂ 土壤 NH₄⁺-N 变化幅度分别在 1.03~10.98 mg·kg⁻¹ 和 0.76~7.32 mg·kg⁻¹ 之间. 各施肥处理土壤 NH₄⁺-N 在玉米季变化趋势基本一致, 即施肥后 1~4 d 内, 土壤 NH₄⁺-N

含量迅速达到峰值, 随后逐渐降至较低水平, 整个高峰期约持续 2 周左右.

不同土壤盐分条件下, 有机无机肥配施比例所产生的土壤 NH₄⁺-N 动态过程表现不一. S₁ 土壤, U₁ 及 U₃O₁ 处理在施基肥后第 2 d 达到峰值, 分别为 77.93 mg·kg⁻¹ 和 63.97 mg·kg⁻¹; U₁O₁ 和 U₁O₃ 处理呈双峰变化, 分别在第 2 d 和第 4 d 达到峰值, 最大值分别为 53.61 mg·kg⁻¹ 和 59.58 mg·kg⁻¹, O₁ 处

理在施肥后第 1 d 即出现最大值,为 $62.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 追肥后各处理土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 均在第 2 d 出现最大值,但较施入基肥后均明显降低, U_1 处理较其余施肥处理高出 $10.63\% \sim 43.89\%$,在整个高峰期内 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 呈现出 $\text{U}_1 > \text{U}_3\text{O}_1 > \text{O}_1 > \text{U}_1\text{O}_3 > \text{U}_1\text{O}_1$ 的趋势,而在后期则呈现出相反态势.

S_2 土壤,各处理 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 峰值出现时间均较 S_1 土壤有所延迟,但最大值却有所提高(除 O_1 处理外). 基肥后, U_1 及 U_3O_1 处理 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量在第 3 d 达到峰值,为 $81.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $71.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别较 S_1 土壤高出 5.19% 和 13.24% ; U_1O_1 和

U_1O_3 处理在第 4 d 出现最大值,分别为 $67.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $60.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较 S_1 土壤高出 25.52% 和 1.51% ; O_1 处理在第 2 d 出现峰值为 $52.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较 S_1 土壤降低 18.69% . 追肥后,各处理 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 峰值出现时间均在第 2 d. 在整个高峰期内,峰值出现前不同处理 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量呈现出与 S_1 土壤一致规律,而最大值较 S_1 土壤有所降低, U_1 、 U_3O_1 、 U_1O_1 、 U_1O_3 及 O_1 处理较 S_1 土壤分别降低 14.98% 、 16.72% 、 36.36% 、 22.71% 和 14.11% ,而在峰值出现后则表现出有机肥施入比例越大 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量越小的趋势.

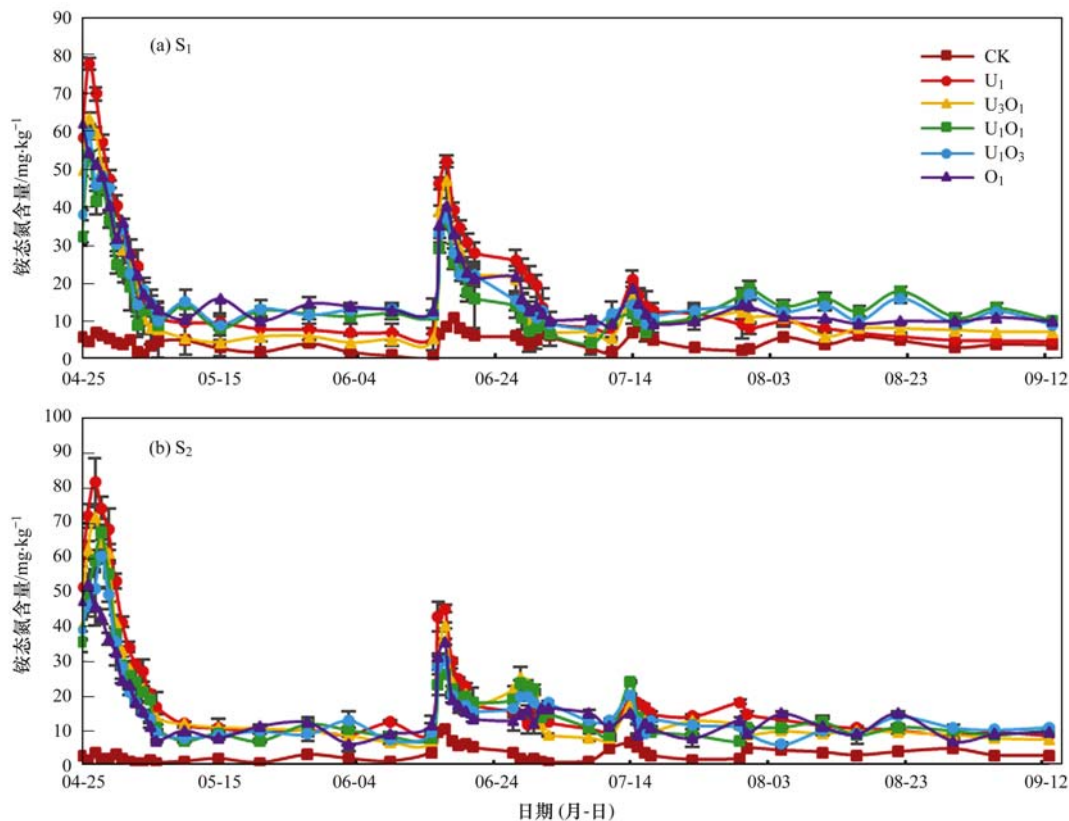


图 3 不同处理土壤铵态氮含量变化

Fig. 3 Variation in the soil $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ content with different treatments

图 4 为玉米生长季内不同程度盐渍化土壤各有机无机配施处理 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量变化规律. 可以看出, CK 处理 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量在整个生育期内波动较小, S_1 、 S_2 土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 变化幅度分别在 $9.36 \sim 20.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.17 \sim 16.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间. 而各施肥处理 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量在生育期内波动较为剧烈,施肥后土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量迅速增大,且峰值出现时间基本一致,持续一段时间后开始下降,至作物收获时含量达到最小值.

在 S_1 土壤盐分条件下,基肥后各施肥处理呈现出随着有机肥施入比例增大 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量先降后升的趋势, U_1 处理 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 峰值为 $96.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较其余

处理显著高出(除与 U_3O_1 处理不显著外) $7.63\% \sim 37.88\%$ ($P < 0.05$); 追肥后一段时间内呈现出随着有机肥施入比例越大土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量越小的趋势,在 7 月 8 日之后 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量基本表现出 $\text{U}_1\text{O}_1 > \text{U}_1\text{O}_3 > \text{O}_1 > \text{U}_3\text{O}_1 > \text{U}_1$ 的规律.

在 S_2 土壤盐分条件下,基肥后各处理 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 峰值出现时间与 S_1 土壤盐分条件下基本一致,但最大值有所降低, U_1 、 U_3O_1 、 U_1O_1 、 U_1O_3 及 O_1 处理分别较 S_1 土壤降低 55.24% 、 49.66% 、 10.96% 、 12.98% 和 20.47% ,且以 O_1 处理最大,为 $70.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与 U_1O_3 处理差异不显著,但均显著高于其余处理 ($P < 0.05$); 而在追肥后基本呈现出有机肥施入比例

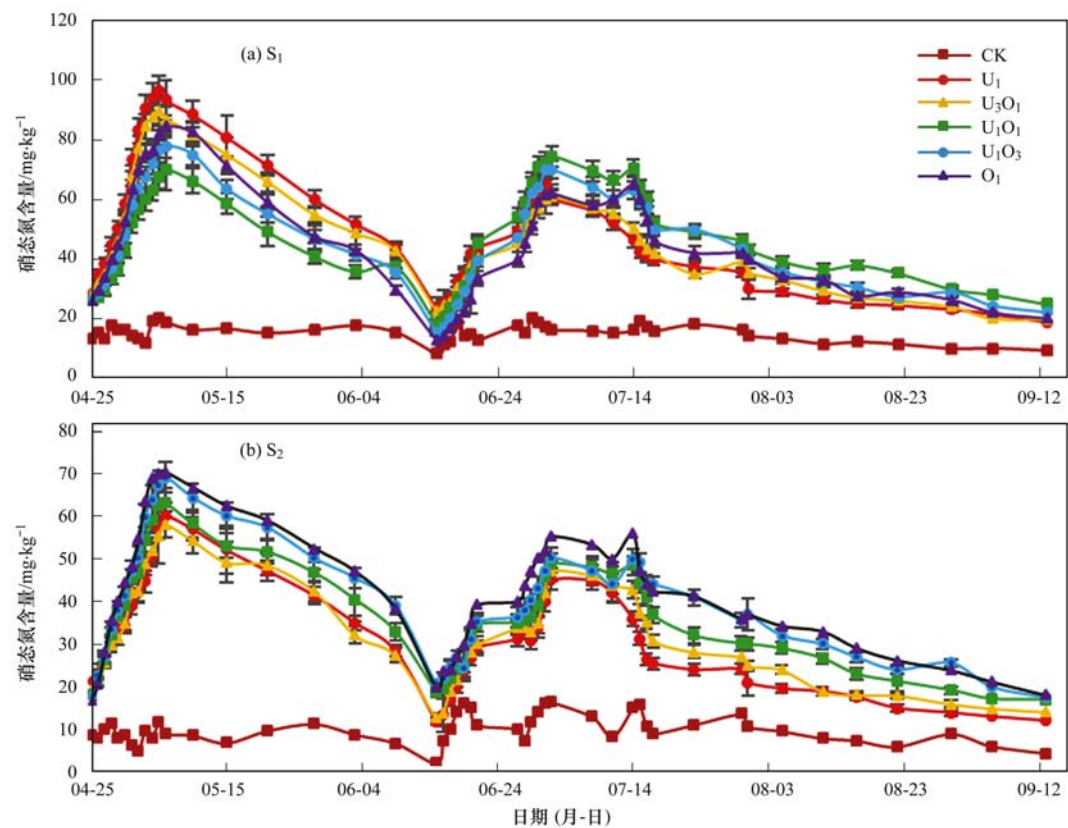


图 4 不同处理土壤硝态氮含量变化
Fig. 4 Variation in the soil NO₃⁻-N content with different treatments

越大NO₃⁻-N含量越大的态势。

2.5 N₂O 排放通量与各土壤因子的相关性分析

N₂O 排放通量与土壤各环境因子相关性分析见表 4,可以看出,各处理土壤 N₂O 排放通量与 5 cm、10 cm 土层土壤温度呈显著负相关关系 ($P < 0.05$),而与土壤孔隙充水率呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$). N₂O 排放通量与土壤无机氮含量的相

关分析表明,不同有机无机肥配施比例下,N₂O 排放通量与土壤NH₄⁺-N 含量之间均存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$). S₁ 土壤,除 U₁O₁ 处理 N₂O 排放通量与土壤NO₃⁻-N 含量呈显著负相关外,其余处理均无显著相关性; S₂ 土壤,U₁O₃ 与 O₁ 处理 N₂O 排放通量与土壤NO₃⁻-N 含量呈显著负相关关系,其余处理之间相关关系并不显著。

表 4 N₂O 排放通量与土壤环境的相关性¹⁾

处理	Correlation between the N ₂ O flux and soil conditions									
	U ₁		U ₃ O ₁		U ₁ O ₁		U ₁ O ₃		O ₁	
	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
5 cm 土层温度	-0.368 *	-0.376 *	-0.334 *	-0.358 *	-0.280	-0.349 *	-0.337 *	-0.335 *	-0.343 *	-0.331 *
10 cm 土层温度	-0.395 *	-0.398 *	-0.371 *	-0.390 *	-0.320 *	-0.373 *	-0.362 *	-0.361 *	-0.368 *	-0.349 *
土壤孔隙充水率	0.521 **	0.514 **	0.514 **	0.527 **	0.410 **	0.466 **	0.460 **	0.440 **	0.405 **	0.412 **
NH ₄ ⁺ -N	0.938 **	0.878 **	0.907 **	0.816 **	0.807 **	0.837 **	0.887 **	0.814 **	0.937 **	0.870 **
NO ₃ ⁻ -N	-0.031	-0.046	-0.115	-0.116	-0.435 **	-0.229	-0.295	-0.307 *	-0.208	-0.317 *

1) * * 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关

3 讨论

有研究表明,氮肥施用是促进土壤 N₂O 排放的主要因素^[29, 30],这与本研究结果一致,2 种不同程度盐渍化土壤各施肥处理在基肥和追肥后均导致 N₂O 大量排放,这是因为施肥向土壤提供了大量氮素,为土壤硝化和反硝化作用提供充足底物,从而利

于 N₂O 排放^[31, 32]. 在本研究中,各有机无机配施处理在施肥初期均出现明显的 N₂O 排放高峰,S₁ 土壤各施肥处理在基肥(施肥后 12 d)和追肥(施肥后 17 d)初期 N₂O 累积排放量占玉米生长季累积排放的比值分别为 23.48%~29.46% 和 32.94%~38.43%, S₂ 土壤分别为 27.01%~30.07% 和 33.45%~39.00%,表明土壤 N₂O 排放发生在施肥后较短时间

内.这主要是因为基肥施入后,植株萌发期对氮素利用较少,土壤中大量无机氮累积导致 N_2O 大量排放;而在追肥的同时进行灌溉,且在此期间发生大量降雨,加速了肥料水解,导致追肥后 N_2O 排放峰较基肥后更为强烈.

盐渍化土壤中氮素有效性随着盐渍化程度的不同而不同^[33],有研究已指出,土壤无机氮含量随着盐渍化程度增大而减少^[34].本试验研究结果表明,同一处理中度盐渍土 N_2O 累积排放量显著高于轻度盐渍土,这可能也是导致高盐度土壤氮素更为匮乏的原因之一.本研究发现,有机无机配施比例对不同程度盐渍化土壤 N_2O 排放影响不一. S_1 土壤表现出随着有机肥施入比例增大 N_2O 排放量先降后升的趋势,其中以有机无机各半配施处理排放量最小.究其原因,可能是因为在盐分较小时,施入适当的有机肥可以改善土壤理化性质,促进土壤微生物对氮素的固持,而在作物生长中后期,微生物的死亡伴随着体内氮素的释放,可以在玉米生长季内更好地满足作物对氮素需求,从而在相同氮素施用量条件下能有效减少氮素向 N_2O 转化^[35,36].同时,本研究也表明,单施有机肥也可以较单施化肥显著降低 N_2O 排放量,一方面是由于有机肥施入提高了异养硝化的无机过程^[37];另一方面,有机肥的施入为反硝化细菌提供能量,促使 N_2O 向 N_2 还原,从而减少 N_2O 排放^[38].在 S_2 盐分条件下,表现出随着有机肥施入比例增大 N_2O 排放量逐渐减少的趋势.这是因为在高盐环境下,亚硝酸盐氧化菌活性受到抑制,使土壤硝化过程基本停留在亚硝酸盐阶段^[39],延缓了硝化进程,这可能也是高盐土壤环境产生更多 N_2O 的原因,因此,在高盐条件下需要施入大量有机肥提高土壤微生物活性^[40],从而促进土壤亚硝态氮向硝态氮的转化速率,减少硝化过程中 N_2O 的排放.此外,在高盐条件下 N_2O 还原酶活性会受到抑制^[13],增大有机肥施入比例可能会改善这一情况,利于减少异养反硝化过程 N_2O 排放量.本研究春玉米 N_2O 排放系数为 1.23%~2.10%,较其它非盐渍化地区要明显提高^[41~43],这可能是因为土壤中盐分的存在会促进土壤 N_2O 的排放,同时,河套灌区地下水埋深较浅,且生育期内连续的灌溉致使土壤湿度适宜,利于土壤 N_2O 排放.此外,本试验 CK 处理已连续 2 a 未进行施肥,使得产生 N_2O 的底物显著减少,导致计算 N_2O 排放系数的本底值较小.

土壤温度通过影响微生物代谢强度进而改变硝化反硝化过程,有研究表明,通常 N_2O 产生随着土壤温度升高而增加^[44].但在本研究条件下,各施肥处理 N_2O 通量与 5 cm 及 10 cm 土壤温度呈显著负

相关关系($P < 0.05$).究其原因,这主要与研究区气候及种植制度有关,本试验区属于干旱地区,春玉米生长季内仅降雨 67.5 mm,加之该地区盐渍化程度较为严重,土壤氮素相对匮乏,水氮状况强烈限制土壤 N_2O 排放状况,故土壤温度对 N_2O 排放影响有限.同时,在玉米基肥期及追肥期气温较低,施肥期间的肥料效应对 N_2O 排放影响要明显大于土壤温度效应^[45],而进入 7、8 月气温高峰期时却不再施肥, N_2O 排放量也相应减少,导致土壤温度出现负效应.有研究表明,土壤水分及温度通过影响微生物活性、通气状况,进而影响土壤 N_2O 产生过程^[46].一般来说,15~35℃是硝化作用微生物活动的适宜温度范围^[47],本研究生育期大多时间土壤温度处于这一区间,利于土壤硝化作用的进行.姚志生等^[48]的研究表明,当土壤孔隙充水率在 75% 之下时, N_2O 排放通量与土壤湿度呈正相关,反之则呈负相关,这与本研究结果基本一致,即当土壤孔隙充水率介于 36.78%~79.76% 之间时,春玉米农田土壤 N_2O 排放与土壤孔隙充水率呈极显著正相关关系($P < 0.01$).

大量试验证明,无论是硝化还是反硝化作用,土壤中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量是限制 N_2O 产生的根本因素^[46,49].前人研究表明,土壤中无机氮含量越多,氮素被转化为 N_2O 的几率越大^[50].本研究发现,土壤 N_2O 排放通量与 NH_4^+-N 含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),而与 NO_3^--N 含量呈负相关关系.可见,灌区盐渍化玉米农田土壤 NH_4^+-N 对 N_2O 贡献占主要地位,即硝化作用是产生 N_2O 的主要过程,这与陈哲等^[51]的研究结果基本一致.He 等^[52]的研究表明,施入有机肥可以为氨氧化细菌(AOB)和氨氧化古菌(AOA)提供基质、养分及适宜的环境,从而利于土壤硝化作用的进行.此外,有学者发现有机肥处理的土壤 AOB 硝化潜势及 AOB 数量明显高于化学氮肥^[53].因此,不同程度盐渍化土壤施入适宜有机肥均利于土壤氨氧化微生物的生存,从而加快土壤 NH_4^+-N 向 NO_3^--N 的转化速率,缩短土壤硝化过程,可以有效减少硝化过程中 N_2O 排放量.

本研究发现,随着土壤盐分的升高,作物产量也显著降低($P < 0.05$),这与 N_2O 排放的结果一致,这可能是因为土壤盐度升高会抑制作物对氮素的有效吸收利用^[54],从而为土壤 N_2O 排放提供充足底物,利于 N_2O 的排放.在不同盐渍化土壤,合理的施肥方式应该在保证作物产量的同时减少 N_2O 排放.整体来看,相较于单施化肥,本研究配施有机肥可以减少 N_2O 排放量,同时也可以显著提高作物产量(P

<0.05), 轻、中度盐渍土分别以有机无机各半配施及单施有机肥产量最大, 这也从侧面反映出单施化肥并不能满足作物对养分的需求, 反而会激发 N_2O 排放, 不利于农业生产的可持续发展. 可见, 不同程度盐渍化土壤适当的有机肥配施比例不仅能减少环境污染, 同时也利于作物获得高产.

有研究指出, 土壤盐分通过调控土壤硝化反硝化作用, 显著影响不同盐渍化程度土壤 N_2O 排放^[55]. 本研究表明, 当盐分水平低于 $1.07 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时, 土壤 N_2O 排放主要以硝化过程为主, 通过合理调配有机无机配施比例来改变土壤硝化过程可以有效降低 N_2O 排放量, 而随着盐分继续增大, 土壤通透性进一步下降, 土壤可能逐渐由好氧环境向厌氧环境转变, 反硝化作用将成为 N_2O 产生的重要来源, 因此, 针对灌区盐渍化程度更为严重的土壤该如何合理施肥还有待进一步深入研究.

4 结论

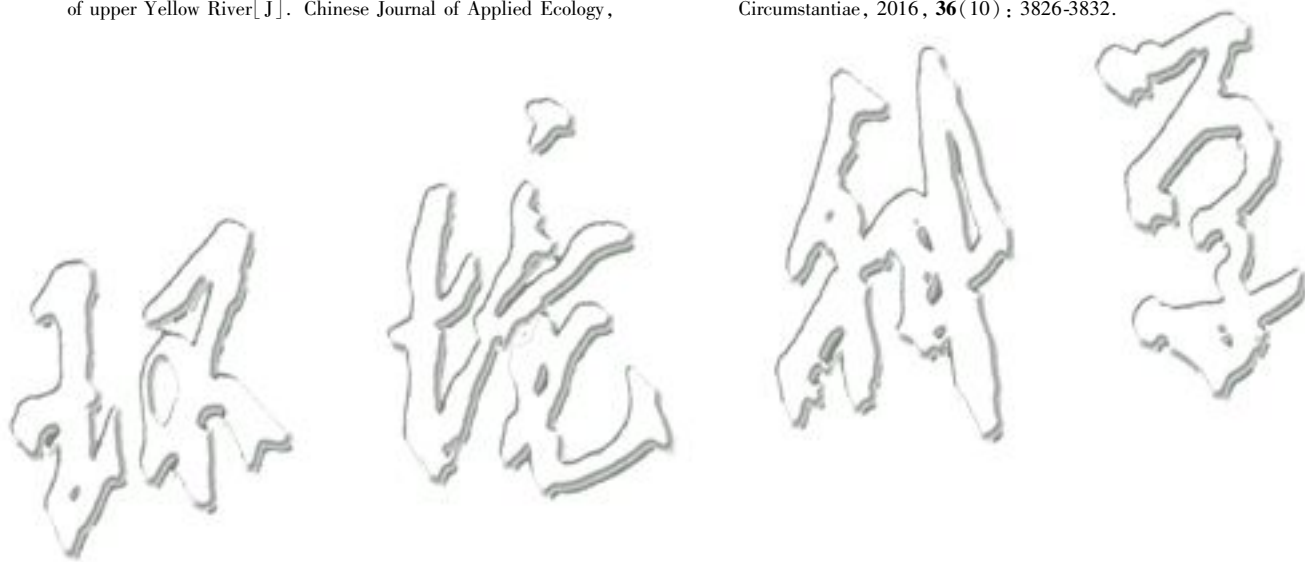
本研究通过连续 2 a 有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N_2O 排放的响应, 发现随着土壤盐度升高, N_2O 累积排放量增加; 配施有机肥可以显著减少盐渍土 N_2O 累积排放量, 轻、中度盐渍土分别以有机无机各半配施及单施有机肥 N_2O 排放量及排放系数最低, 同时可以获得最高产量; 施肥方式调控着土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 水平, 是土壤 N_2O 排放的主要调控因子, 同时, 土壤孔隙充水率也是影响 N_2O 排放的重要环境因子.

参考文献:

- [1] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, *et al.* Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C: N ratios[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(6): 973-981.
- [2] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(4): 659-662.
- [3] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of north India[J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(3): 181-195.
- [4] David K, Joseph A, Mark S, *et al.* Drawing down N_2O to protect climate and the ozone layer [M]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2013. 4-8.
- [5] IPCC, working group III. Climate change 2007, fourth assessment report[R]. Cambridge, Cambridge University Press, 2007. 80-84.
- [6] Bouwman A F, Stehfest E, Vankessel C. Nitrous oxide emissions from the nitrogen cycle in arable agriculture: estimation and mitigation[A]. In: Smith K (Ed.). *Nitrous Oxide and Climate Change*. London: Earthscan Ltd., 2010. 85-106.
- [7] FAO. Extent of salt-affected soils[EB/OL]. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/>, 2015-09-10.
- [8] Liang Y C, Si J, Nikolic M, *et al.* Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(6): 1185-1195.
- [9] 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.
- [10] Setia R, Marschner P, Baldock J, *et al.* Relationships between carbon dioxide emission and soil properties in salt-affected landscapes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(3): 667-674.
- [11] 尚会来, 彭永臻, 张静蓉, 等. 盐度对污水硝化过程中 N_2O 产量的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 1079-1083.
Shang H L, Peng Y Z, Zhang J R, *et al.* Effects of salinity concentration on N_2O production during nitrification [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(4): 1079-1083.
- [12] Oren A. Bioenergetic aspects of halophilism[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 1999, **63**(2): 334-348.
- [13] 代伟, 赵剑强, 丁家志, 等. 高盐高碱环境下硝化反硝化过程及 N_2O 产生特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3730-3737.
Dai W, Zhao J Q, Ding J Z, *et al.* Nitrification, denitrification, and N_2O production under saline and alkaline conditions [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3730-3737.
- [14] Han J P, Shi J C, Zeng L Z, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(4): 2976-2986.
- [15] Villa-Castorena M, Ulery A L, Catalan-Valencia E A, *et al.* Salinity and nitrogen rate effects on the growth and yield of chile pepper plants[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**(6): 1781-1789.
- [16] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. *土壤肥料*, 2004, (5): 12-16.
Wang L G, Li W J, Qiu J J, *et al.* Effect of biological organic fertilizer on crops growth, soil fertility and yield[J]. *Soils and Fertilizers*, 2004, (5): 12-16.
- [17] Shi S H, Tian L, Nasir F, *et al.* Response of microbial communities and enzyme activities to amendments in saline-alkaline soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **135**: 16-24.
- [18] Zhang T, Wang T, Liu K S, *et al.* Effects of different amendments for the reclamation of coastal saline soil on soil nutrient dynamics and electrical conductivity responses [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, **159**: 115-122.
- [19] Praveen-Kumar, Aggarwal R K. Interdependence of ammonia volatilization and nitrification in arid soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, **51**(3): 201-207.
- [20] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N_2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(11): 2037-2045.
- [21] Yang B, Xiong Z Q, Wang J Y, *et al.* Mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensities by substituting chemical nitrogen fertilizers with organic fertilization strategies in rice-wheat annual rotation systems in China: a 3-year field experiment[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **81**: 289-297.
- [22] Reddy N, Crohn D M. Effects of soil salinity and carbon availability from organic amendments on nitrous oxide emissions [J]. *Geoderma*, 2014, **235-236**: 363-371.
- [23] 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 等. 生物炭和有机肥对华北农田

- 盐碱土 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5333-5343.
- Shi Y L, Liu X R, Gao P L, *et al.* Effects of biochar and organic fertilizer on saline-alkali soil N_2O emission in the north China plain[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5333-5343.
- [24] Liu L P, Long X H, Shao H B, *et al.* Ameliorants improve saline-alkaline soils on a large scale in northern Jiangsu Province, China[J]. Ecological Engineering, 2015, **81**: 328-334.
- [25] 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.
- [26] 李祯, 史海滨, 李仙岳, 等. 不同水氮运筹模式对田间土壤氨挥发及春玉米籽粒产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(4): 799-807.
- Li Z, Shi H B, Li X Y, *et al.* Ammonia volatilization in soil and grain yield of the spring maize under different water-nitrogen management regimes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(4): 799-807.
- [27] Houba V J G, Novozamsky J, Huybregts A W M, *et al.* Comparison of soil extractions by 0.01M $CaCl_2$, by EUF and by some conventional extraction procedures[J]. Plant and Soil, 1986, **96**(3): 433-437.
- [28] 纪洋, 余佳, 马静, 等. DCD 不同施用时间对小麦生长期 N_2O 排放的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(23): 7151-7160.
- Ji Y, Yu J, Ma J, *et al.* Effect of timing of DCD application on nitrous oxide emission during wheat growing period[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(23): 7151-7160.
- [29] Zhu B, Wang T, Kuang F H, *et al.* Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the central Sichuan Basin, China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, **73**(4): 1419-1426.
- [30] Chadwick D R, Pain B F, Brookman S K E. Nitrous oxide and methane emissions following application of animal manures to grassland[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, **29**(1): 277-287.
- [31] 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 等. 有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 321-330.
- Hou M M, Lü F L, Zhang H T, *et al.* Effect of organic manure substitution of synthetic nitrogen on crop yield and N_2O emission in the winter wheat-summer maize rotation system [J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 321-330.
- [32] 赵长盛, 胡承孝, 孙学成, 等. 温度和水分对华中地区菜地土壤氮素矿化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, **20**(7): 861-866.
- Zhao C S, Hu C X, Sun X C, *et al.* Influence of temperature and moisture on nitrogen mineralization in vegetable fields of central China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, **20**(7): 861-866.
- [33] Gandhi A P, Paliwal K V. Mineralization and gaseous losses of nitrogen from urea and ammonium sulphate in salt-affected soils [J]. Plant and Soil, 1976, **45**(1): 247-255.
- [34] Laura R D. Salinity and nitrogen mineralization in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1977, **9**(5): 333-336.
- [35] 张亚丽, 张娟, 沈其荣, 等. 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(12): 1575-1578.
- Zhang Y L, Zhang J, Shen Q R, *et al.* Effect of combined application of bioorganic manure and inorganic nitrogen fertilizer on soil nitrogen supplying characteristics[J]. Journal of Applied Ecology, 2002, **13**(12): 1575-1578.
- [36] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, **39**(1): 89-96.
- Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, **39**(1): 89-96.
- [37] Müller C, Stevens R J, Laughlin R J. Evidence of carbon stimulated N transformations in grassland soil after slurry application[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(2): 285-293.
- [38] Azam F, Müller C, Weiske A, *et al.* Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide-role of oxidizable carbon and applied nitrogen[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **35**(1): 54-61.
- [39] Thapa R, Chatterjee A, Wick A, *et al.* Carbon dioxide and nitrous oxide emissions from naturally occurring sulfate-based saline soils at different moisture contents[J]. Pedosphere, 2017, **27**(5): 868-876.
- [40] Van Kessel J, Reeves J. Nitrogen mineralization potential of dairy manures and its relationship to composition [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, **36**(2): 118-123.
- [41] 武其甫, 武雪萍, 李银坤, 等. 保护地土壤 N_2O 排放通量特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(4): 942-948.
- Wu Q F, Wu X P, Li Y K, *et al.* Studies on the fluxes of nitrous oxide from greenhouse vegetable soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, **17**(4): 942-948.
- [42] Hou A X, Tsuruta H. Nitrous oxide and nitric oxide fluxes from an upland field in Japan: effect of urea type, placement, and crop residues[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, **65**(2): 191-200.
- [43] 丁洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 玉米-小麦轮作系统中氮肥反硝化损失与 N_2O 排放量[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(5): 557-560.
- Ding H, Cai G X, Wang Y S, *et al.* Nitrification-denitrification loss and N_2O emission from maize-wheat rotation system in north China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, **22**(5): 557-560.
- [44] 郎漫, 李平, 张小川. 土地利用方式和培养温度对土壤氮转化及温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(10): 2670-2676.
- Lang M, Li P, Zhang X C. Effects of land use type and incubation temperature on soil nitrogen transformation and greenhouse gas emission [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(10): 2670-2676.
- [45] Barnard R, Leadley P W, Hungate B A. Global change, nitrification, and denitrification: A review [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, **19**(1): GB1007.
- [46] 于亚军, 朱波, 荆光军. 成都平原土壤-蔬菜系统 N_2O 排放特征[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(4): 313-318.
- Yu Y J, Zhu B, Jing G J. N_2O emission from soil-vegetable system and impact factors in Chengdu Plain of Sichuan Basin [J]. China Environmental Science, 2008, **28**(4): 313-318.
- [47] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. 303.
- [48] 姚志生, 郑循华, 周再兴, 等. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N_2O 排放对比观测研究[J]. 气候与环境研究, 2006, **11**(6): 691-701.
- Yao Z S, Zheng X H, Zhou Z X, *et al.* Nitrous oxide emission from winter wheat and vegetable fields in the Taihu region: a

- comparison case study [J]. Climatic and Environmental Research, 2006, **11**(6): 691-701.
- [49] 潘晓健, 刘平丽, 李露, 等. 氮肥和秸秆施用对稻麦轮作体系下土壤剖面 N_2O 时空分布的影响[J]. 土壤学报, 2015, **52**(2): 364-371.
- Pan X J, Liu P L, Li L, *et al.* Spatial and temporal distributions of soil profile N_2O as affected by N fertilization and straw incorporation in the rice-wheat rotation system [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(2): 364-371.
- [50] Gu J X, Nicoullaud B, Rochette P, *et al.* A regional experiment suggests that soil texture is a major control of N_2O emissions from tile-drained winter wheat fields during the fertilization period[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **60**: 134-141.
- [51] 陈哲, 陈媛媛, 高霁, 等. 不同施肥措施对黄河上游灌区油菜田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(1): 129-139.
- Chen Z, Chen Y Y, Gao J, *et al.* Effects of different fertilization measures on N_2O emission in oil sunflower field in irrigation area of upper Yellow River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(1): 129-139.
- [52] He J Z, Shen J P, Zhang L M, *et al.* Quantitative analyses of the abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea of a Chinese upland red soil under long-term fertilization practices[J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(9): 2364-2374.
- [53] 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.
- [54] Pessarakli M, Tucker T C. Dry matter yield and nitrogen-15 uptake by tomatoes under sodium chloride stress [J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, **52**(3): 698-700.
- [55] 杨文柱, 孙星, 焦燕. 盐度水平对不同盐渍化程度土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3826-3832.
- Yang W Z, Sun X, Jiao Y. Effect of salinity gradient on nitrous oxide emissions from different salinization soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3826-3832.



CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebirur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)