

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

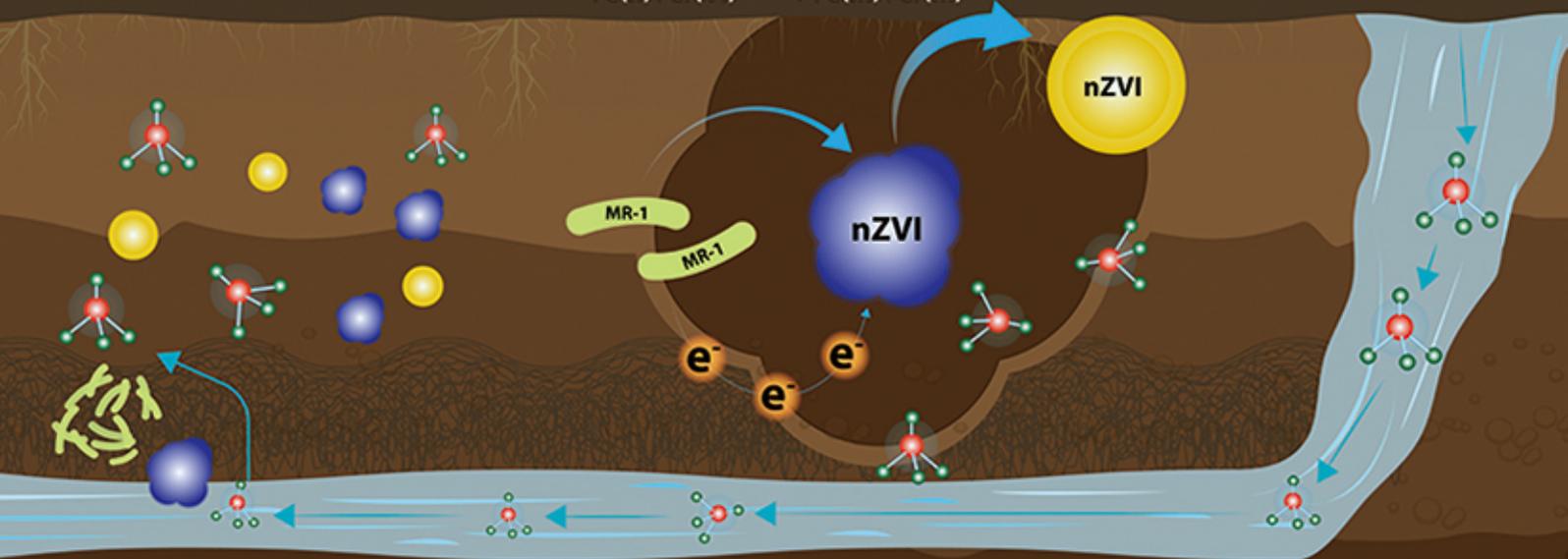
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJIANG KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 时空分布与健康效应评估 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟与分析 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM_{2.5} 污染影响 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气 PM_{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 生长的拮抗效应及其作用机制 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳炜, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何品晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系 马宸菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N₂O 排放的影响 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载 NH₄⁺-N 生物炭对土壤 N₂O-N 排放和 NH₃-N 挥发的影响 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019 年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N₂O 排放的影响

符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正*, 孟磊*

(海南大学热带作物学院, 海口 570228)

摘要: 合理施氮是获得较高目标产量和降低因氮环境污染的重要策略. 通过盆栽试验研究等氮量下不同分施次数对玉米产量及土壤 N₂O 排放的影响, 并探讨氮转化功能基因丰度与 N₂O 排放的关系. 本试验设空白(CK, 不施尿素)、一次性施氮(S1, 将 0.5 g·kg⁻¹ 尿素一次性施入土壤 + 硝化抑制剂)、二次分施(S2, 将 0.5 g·kg⁻¹ 尿素分 40% 和 60% 两次施入土壤)和三次分施(S3, 将 0.5 g·kg⁻¹ 尿素分 20%、40% 和 40% 3 次施入土壤). 结果表明: ① 施氮促进土壤酸化, 氮分施次数造成土壤酸化程度的显著差异, 氮分施次数越多, 土壤酸化越强. 施氮显著提高鲜食玉米果穗产量及茎秆生物量, 但氮肥分施次数对土壤 pH 影响的差异可能会导致植物对氮的吸收利用程度也存在着差异. S3 处理显著降低土壤 pH 的同时, 也降低了植物氮吸收累积量和氮素利用效率, 也造成了高的 N₂O 累积排放量. 与 S3 处理相比, S1 和 S2 处理分别增产了 40.21% 和 42.55%, 其 N₂O 累积排放量也分别显著降低了 79.4% 和 20.9%. ② N₂O 排放与 AOB 和 *nirK* 基因丰度呈显著正相关关系, AOB 和 *nirK* 是 N₂O 排放的主要贡献者. S1 处理显著降低了 AOB 和 *nirK* 基因丰度, 降低 N₂O 排放, S2 和 S3 处理施肥后显著增加了 *nirK* 和 *nirS* 基因丰度, 降低了 *nosZ* 基因丰度, 促进了 N₂O 的排放. 氮分施次数影响氮转化过程的功能基因, 从而影响 N₂O 排放. 由此可见, 尿素配合 DCD 一次性施入不仅能保证玉米产量, 提高氮素利用效率, 还能降低温室气体排放, 可作为海南地区鲜食玉米种植过程推荐的施肥模式.

关键词: 施肥次数; 玉米产量; 氮利用效率; N₂O 排放; 功能基因

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4538-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202101003

Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N₂O Emission from Potted Maize

FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, TANG Shui-rong, WANG Hong-hao, WU Yan-zheng*, MENG Lei*

(College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: Rational application of nitrogen is an important strategy for increasing yield while reducing environmental pollution due to nitrogen. Pot experiments were conducted to study the effects of different application times on maize yield and soil N₂O emission under conditions of equal nitrogen content, and to explore the relationship between the abundance of nitrogen conversion functional genes and N₂O emission. Four treatments were used, namely a control (CK, no urea), one-time application (S1, one application of 0.5 g·kg⁻¹ urea + nitrification inhibitor), two separate applications [S2, two applications of 0.5 g·kg⁻¹ urea (40% and 60% respectively)] and three separate applications (S3, 0.5 g·kg⁻¹ urea was divided into three different applications: 20%, 40% and 40% respectively). The results showed that: ① nitrogen application promoted soil acidification, and the degree of soil acidification varied significantly with different application times. More applications of nitrogen led to stronger soil acidification. Nitrogen application significantly increased the ear yield and stem biomass of fresh table maize, but different nitrogen application times may alter soil pH, leading to differences in the degree of nitrogen uptake and utilization in plants. While the S3 treatment significantly reduced soil pH, it also reduced the cumulative nitrogen uptake and utilization in the plants, resulting in a high cumulative N₂O emission. Compared with the S3 treatment, the yield was 40.21% and 42.55% higher in the S1 and S2 treatments, and the cumulative N₂O emission decreased by 79.4% and 20.9%, respectively. ② N₂O emission was positively correlated with the abundance of AOB and *nirK* genes, which were the main contributors to N₂O emission. S1 significantly decreased the abundance of AOB and *nirK* genes and N₂O emissions, while S2 and S3 significantly increased the abundance of *nirK* and *nirS* genes and decreased the abundance of *nosZ* genes after fertilization, promoting N₂O emissions. Nitrogen application times affect the functional genes of the nitrogen transformation process, and thus affect N₂O emissions. In conclusion, a one-time application of urea combined with DCD only guarantees high maize yield and improves the efficient use of nitrogen, but also reduces greenhouse gas emissions. Thus, it is the recommended nitrogen fertilization mode for the cultivation of fresh corn in Hainan.

Key words: fertilization times; corn yield; nitrogen efficiency; N₂O emission; functional gene

海南冬季丰富的热量资源使其成为鲜食玉米的重要生产基地^[1]. 2016 年海南省鲜食玉米种植面积

收稿日期: 2021-01-02; 修订日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661051, 42067008); 海南省自然科学基金高层次人才项目(320RC493)

作者简介: 符佩娇(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤温室气体排放与硝化抑制剂应用, E-mail: 649962852@qq.com

* 通信作者, E-mail: wyl198712@163.com; menglei94@sohu.com

已达 263.06 km² (约 39.44 万亩)^[2]. 鲜食玉米种植成为助推当地农业产业结构调整, 促进农民增收的重要产业^[1]. 施氮是玉米生产管理的重要环节. 传统的玉米除基施氮肥外, 还分别在拔节期、大喇叭口期或抽雄期等进行追施氮^[3,4]. 改革开放后大量的农村青壮年劳动力进城务工造成农村劳动力的短缺. 为节省劳动力的开支, 降低施肥成本, 玉米施氮次数减少到只基施氮肥和拔节期追施氮肥^[5]. 缓、控释肥等新型肥料的出现, 又使玉米一次性施氮成为现实^[5,6].

施氮次数影响玉米产量. 张鑫^[7]的研究显示, 与普通尿素分两次施用相比, 树脂包膜尿素一次性基施显著提高玉米产量. 唐拴虎等^[8]的研究也发现, 一次性施用控释肥比普通肥料四次分施增产了 10.1%. 但也有研究发现, 等施氮量下, 一次性施用稳定性肥料与两次施肥 (基肥 + 追肥) 的玉米产量没有明显差异^[5,6]. 施氮次数还影响氮利用率. 安景文等^[9]的研究显示, 一次性施用包膜尿素相较于二次分施氮肥 (基肥 + 拔节期追肥), 玉米氮利用率提高了 33.08%. 唐拴虎等^[10]的研究也显示, 一次性施用控释肥比四次分施普通肥料的氮利用率高出了 13.5%, 可能源于一次性施用控释肥料较四次分施而言, 更能显著增强玉米对氮的吸收转化能力. 刘兆辉等^[11]对全国玉米施氮次数与产量及利用率的关系进行了综述, 结果显示, 一次性基施缓控释肥相较于氮肥分施分别使玉米产量及氮利用率提高了 8.3% 和 37.5%.

玉米施氮次数影响了肥料利用率, 由此相应影响 N_2O 排放. 作为重要温室气体的 N_2O 既加剧全球变暖趋势, 又破坏臭氧层^[12]. 胡小康等^[13]的研究显示, 相较于尿素分次施用, 一次性基施控释肥显著降低夏玉米土壤 N_2O 排放. 张婧等^[14]的研究也获得类似的结果. 而范会等^[15]的研究又发现, 一次性施用新型肥料对 N_2O 减排效果与常规分次施肥的差异不显著.

农业生产施肥的目的不仅追求高产, 还要考虑其对环境的负载. 找到一个既能降低施肥成本, 又能保证作物产量, 同时还能减少相关的氮损失以降低环境污染的施肥方式尤为重要. 目前针对玉米施肥次数的效应研究从区域上多侧重于温带地区的饲料玉米, 研究内容偏重于比较普通肥料与缓控释肥料的肥效差异, 施肥处理上没完全包括玉米的各种施肥次数. 因此, 不能准确评价氮肥施用次数对鲜食玉米产量、氮利用率及 N_2O 排放的影响. 海南地处热带, 形成的土壤在组成及性质上有别于北方的土壤. 大面积玉米种植是近年出现的, 尤其是鲜食玉米, 施肥经验少, 技术不成熟. 有关氮肥施用次数对鲜食玉

米产量、养分利用率及土壤 N_2O 排放的影响还是未知的. 此外, 添加硝化抑制剂或脲酶抑制剂的稳定性肥料的抑制效果受制于土壤性质及气候等因素^[16]. 本文采用盆栽方法研究等氮量下, 结合硝化抑制剂施用形成的不同氮肥施用次数对玉米产量、氮利用率及 N_2O 排放的影响, 同时结合氮转化功能微生物的分析, 明确其对 N_2O 排放的作用, 以期为热区鲜食玉米氮肥合理配施及 N_2O 减排提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地区

盆栽试验于 2019 年 10 月 27 日于海南大学实验基地进行. 该地属热带海洋气候, 年均温 23.8℃, 年均降水量 1 664 mm. 供试土壤基本理化性质为: pH 6.4、有机质 14.75 g·kg⁻¹、全氮 0.49 g·kg⁻¹、有效磷 125.87 mg·kg⁻¹、速效钾 313.05 mg·kg⁻¹ 和碱解氮 65.33 mg·kg⁻¹.

1.2 试验设计

1.2.1 培养装置

培养用盆钵主体为高 35 cm, 内径 20 cm 的圆桶. 圆桶内部的上端用两片 PVC 板将一长 5 cm 直径 5 cm 的 PVC 管对称焊接固定于圆桶中心, PVC 管有 3 cm 高出圆桶, 2 cm 伸入桶内. 圆桶上部穿过一底部封闭中央开孔的长 × 宽 × 高为 25 cm × 25 cm × 5 cm 箱体, 箱体顶部与圆桶顶部平齐.

1.2.2 试验设计

试验处理有: ①空白 (CK, 不添加氮肥, 只施磷钾肥); ②一次施入 [S1, 播种前将尿素与尿素用量 3.5% 的双氰胺 (DCD) 混匀一次性深施]; ③二次施入 (S2, 40% 的尿素作底肥, 60% 的尿素用于大喇叭口期追施); ④三次施入 (S3, 20% 尿素作底肥, 40% 尿素于小喇叭口期追施, 40% 尿素于抽雄期追施). 基肥在播种前与 20 cm 深度土壤混匀施入, 追肥则在玉米生长过程中溶于水里施入, 每个处理重复 3 次, 随机排列.

1.2.3 种植管理

将 1.5 kg 洗净的石英砂粒摊平在桶底, 然后在沙上覆上尼龙纱网, 继续装填过 2 mm 筛的风干土 10 kg. 此时, 土面与桶顶端距离 2 cm. 玉米种子播于桶中 PVC 管内 3 cm 深土壤中. 玉米于 2019 年 10 月 27 日播种, 每钵播种 2 粒玉米种子, 出苗后根据长势, 去掉异常株, 每钵保留 1 株. 于 2020 年 01 月 21 日结束试验, 玉米整个生育期为 87 d. 供试玉米品种为万鲜甜 159 甜玉米 (万农高科集团有限公司). 氮磷钾肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾. 施肥量为每 kg 风干土用 N 0.5 g、P₂O₅ 0.30 g 和 K₂O 0.40 g (分

别约为 380、230 和 300 kg·hm⁻²), 尿素按处理要求施入, 所有处理的磷钾均一次性施入。

1.3 气样采集与测定

采气时将箱盖上具有硅橡胶密封塞的采样孔且箱体中间留有圆孔的集气箱放置于培养桶上部, 培养桶中间的 PVC 管刚好穿过采气箱中央的圆孔。集气箱长×宽×高为 25 cm×25 cm×25 cm。用 702 硅胶将 PVC 管与采气箱交接处密封, 再往上部箱体内倒水, 使水没过采气箱底部 1 cm, 形成密闭空间。用带有三通阀的 10 mL 注射器在密封后的 0、15 和 30 min 通过采气箱上部的硅橡胶塞采集气体, 来回抽取数次以混匀内部气体, 然后抽取 5 mL 气体, 关闭三通阀, 将气体储存于注射器中, 带回实验室, 立即进行分析。分析仪器为岛津气相色谱仪(岛津 GC-2014), 检测器为电子捕获检测器(μ -ECD), 检测器温度为 300℃, 柱温 50℃, 检测所用标准气体由中国计量科学研究院提供。采样结束后立即将采气箱升起, 便于桶内土壤进行正常的气体交换。气体样品采集频率为 1 周 1 次, 施肥后加密采气, 一般持续两周时间。采样时间固定于 08:00~10:00 进行。

土壤 N₂O 排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273.15}{(273.15 + T)} \times \frac{V}{A}$$

式中, F 为 N₂O 排放通量, $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; ρ 为标准状态下 N₂O 的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; $\Delta C/\Delta t$ 为采样过程中箱内 N₂O 排放速率; T 为采样时箱内平均温度, $^{\circ}\text{C}$; V 为采气箱内有效的空间体积, m^3 ; A 是采气箱及培养箱体形成的密封空间, m^2 。

土壤 N₂O 累积排放量计算公式如下:

$$M = F_1 \times 24 + \sum_{i=2}^n \frac{F_i + F_{i-1}}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \times 24$$

式中, M 为 N₂O 累积排放量, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; F 为土壤 N₂O 排放通量, $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; t 为采样时间, d; i 为采样次数; n 为总测定次数; $t_i - t_{i-1}$ 为两次采样的间隔天数。

1.4 土壤及植物样品采集与测定

培养结束后, 采集土壤分别用靛酚蓝比色法(625 nm)和紫外双波长(220 nm 和 275 nm)分光光度法进行 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量测定。其他指标测定待土壤自然风干后进行, 其中 pH 采用电位法(水土比 2.5:1)测定, 有机碳采用重铬酸钾-硫酸消化法测定, 土壤总氮采用半微量凯氏定氮法测定, 速效磷采用钼蓝比色法测定, 速效钾采用 1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 溶液(pH=7)浸提火焰光度计测定。

收获时, 将玉米分成果实和植株两部分带回实

验室, 测定果实产量和植株生物量。植物样品经杀青烘干, 粉碎后测定果实和植株体氮含量。植株氮含量用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-凯氏定氮法测定。

氮肥利用率的计算公式如下:

$$\text{氮肥利用率} = \left[\frac{\text{施氮处理吸氮量}}{\text{施氮量}} - \frac{\text{不施氮处理吸氮量}}{\text{施氮量}} \right] \times 100\%$$

1.5 土壤 DNA 提取

新鲜土壤样品 DNA 的提取采用 MOBIL 公司的土壤快速提取试剂盒 (PowerSoil™ DNA Isolation Kit, Mo Bio Laboratories Inc., CA), 提取步骤参考试剂盒说明书, 同时用超微量紫外分光光度计 (Nano Drop 2000) 测定 DNA 浓度和质量。采用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测提取出的 DNA 片段大小, DNA 样品存放于 -20℃ 保存待用。

1.6 荧光定量 qPCR

本试验采用土壤氨氧化细菌 *amoA* 基因、亚硝酸还原酶 *nirK*、*nirS* 基因和一氧化氮还原酶 *nosZ* 基因的拷贝数分别表示氨氧化细菌 (AOB)、*nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 基因型反硝化菌。所用引物分别为 AOB-1F/AOB-2R、*nirK*-1F/*nirK*-5R、*nirS*-cd3aF/*nirS*-R3cd、*nosZ*-F/*nosZ*-1662R^[17]。定量分析采用 SYBR GREEN 法, 反应体系为 20 μL , 其中包括 10 μL 2 × T5 Fast qPCR Mix (SYBR Green 1), 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 正反向引物各 1 μL , 1 μL DNA 模板, 7.4 μL 无菌水。并以 10⁻¹~10⁻⁸ 浓度梯度的标准质粒作为模板进行荧光定量 PCR 扩增, 最后根据扩增曲线计算基因丰度。

1.7 数据分析

利用 Excel 2010 进行基础数据处理, 方差分析利用 SPSS 21.0 软件完成, 处理间差异采用 Duncan 多重比较法, 差异性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同施肥次数对土壤理化性质的影响

施氮显著降低土壤 pH, 分施次数越多, 土壤 pH 越低。与 S3 处理相比, 减少施肥次数提高了土壤 pH, S1 和 S2 处理间差异不显著, 但都显著高于 S3 处理 ($P < 0.05$, 表 1)。各施氮处理的速效钾含量之间没有差异, 但显著低于 CK。氮肥分施次数的差异没有造成土壤全氮、有机质和速效磷含量的差异。

2.2 不同施肥次数对玉米生物量的影响

施氮显著增加了玉米果穗产量及茎秆生物量。S1 和 S2 处理的果穗产量无显著差异, 但均显著高

于 S3 施肥处理, 相较于 S3, S1 和 S2 的果穗产量分别增加了 40.21% 和 42.55%。施肥处理的玉米茎秆

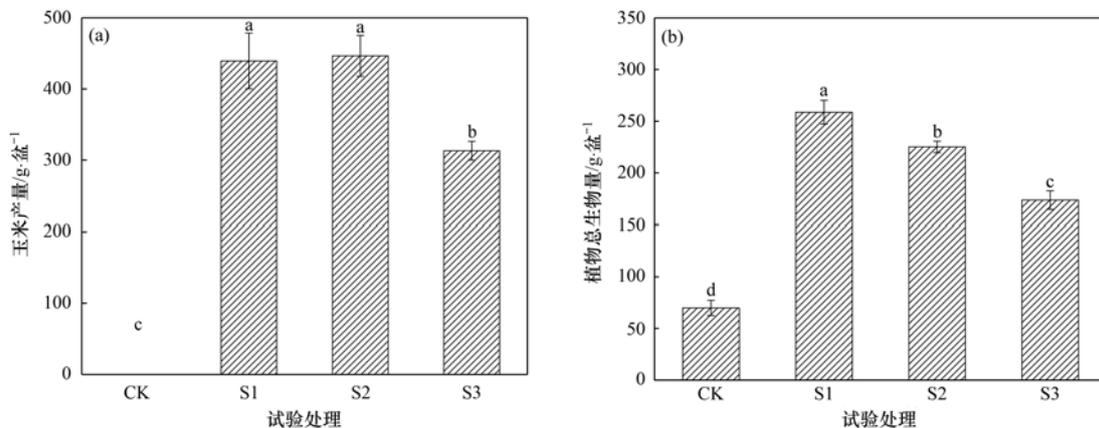
生物量存在显著差异, S1 最高, 其次为 S2, S3 最低, 但都显著高于 CK [图 1(a) 和 1(b)]。

表 1 不同处理下土壤的理化性质¹⁾

Table 1 Physicochemical properties of soil under different treatments

处理	pH	全氮/g·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹
CK	7.06 ± 0.06a	0.60 ± 0.01a	12.57 ± 0.36a	332.56 ± 29.19a	255.93 ± 2.86a
S1	6.70 ± 0.08b	0.63 ± 0.02a	12.52 ± 0.49a	126.48 ± 11.87b	206.99 ± 8.10a
S2	6.53 ± 0.10b	0.66 ± 0.06a	12.63 ± 0.25a	158.53 ± 20.33b	228.97 ± 5.19a
S3	6.20 ± 0.16c	0.63 ± 0.01a	11.99 ± 0.11a	145.76 ± 5.93b	235.88 ± 10.95a

1) 同一列不同小写字母表示在 5% 水平差异显著



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同处理对玉米果穗产量及茎秆总生物量的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on maize yield and total plant biomass

2.3 不同处理对玉米氮吸收的影响

施氮显著提高了作物对氮的吸收, 改变了氮的分配. 尽管施氮处理之间的累积吸氮量没有差异, 但

S1 有助于氮分配到果穗上, 其果穗吸氮量显著高于 S2 和 S3. 不同施肥次数处理之间在茎秆吸氮量、累积吸氮量及氮利用率间没有显著差异 (表 2)。

表 2 不同处理吸氮量差异及氮素利用效率¹⁾

Table 2 Differences in nitrogen uptake and nitrogen utilization efficiency under different treatments

处理	果穗吸氮量 /g·kg ⁻¹	茎秆吸氮量 /g·kg ⁻¹	累积吸氮量 /g·盆 ⁻¹	氮利用效率 /%
CK	—	0.12 ± 0.02b	0.12 ± 0.02b	—
S1	0.74 ± 0.12a	1.09 ± 0.15a	1.83 ± 0.26a	34.20 ± 5.68a
S2	0.56 ± 0.06b	1.35 ± 0.16a	1.90 ± 0.21a	35.64 ± 3.87a
S3	0.41 ± 0.08b	1.03 ± 0.18a	1.44 ± 0.21a	26.30 ± 4.21a

1) 同一列不同小写字母表示在 5% 水平差异显著

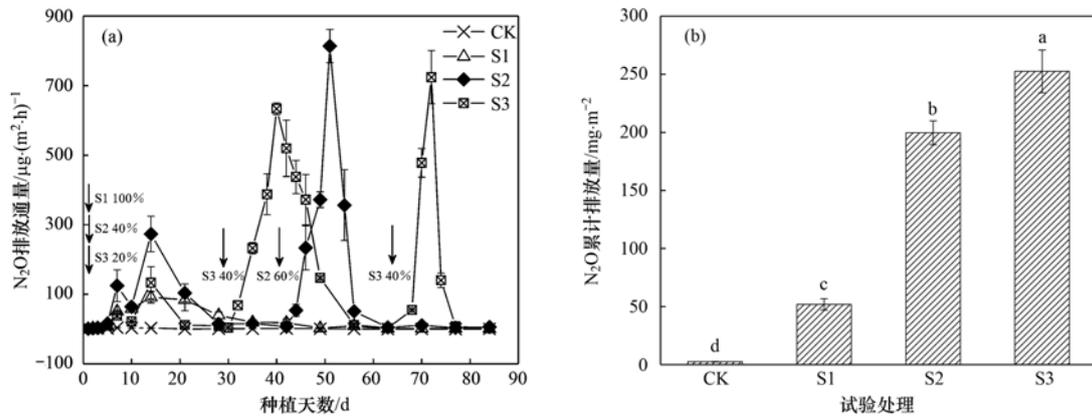
2.4 N₂O 排放通量和累积排放量

CK 土壤 N₂O 排放维持在较低水平. 施氮处理均出现明显的 N₂O 排放峰, 不同施肥处理的 N₂O 出现的排放峰次数不同 [图 2(a)]. 各施氮处理的第一次 N₂O 排放均在施肥后的第 7 d 开始起峰, 各处理从起峰到结束大概持续了 21 d, 第一次峰值的高低为: S2 > S3 > S1 > CK; S2 和 S3 处理第二次峰值分别为 814.04 μg·(m²·h)⁻¹ 和 633.71 μg·(m²·h)⁻¹, 均在施肥后的第 4 d 开始起峰, 起峰到结束分别持续了 12 d 和 17 d. S3 处理第三次施肥后的第 2 d 就开始起峰, 起峰到结束持续了 9 d, 峰值达到 724.12 μg·(m²·h)⁻¹ [图 2(a)].

施肥显著增加土壤 N₂O 累积排放量, 不同施肥次数的土壤 N₂O 累积排放量存在明显差异 ($P < 0.05$). 各处理 N₂O 累积排放量的高低为: S3 > S2 > S1 > CK. 相较于 S3, S1 和 S2 的 N₂O 累积排放量分别降低了 79.4% 和 20.9% [图 2(b)].

2.5 不同处理矿质氮动态变化

CK 土壤 NH₄⁺-N 含量一直处于平缓的低水平, 其它处理在施氮后土壤 NH₄⁺-N 含量均有明显升高, 随着培养时间延长又逐渐降低并趋于平缓 [图 3(a)]. 基肥施入后的第 7 d, S1、S2 和 S3 处理 NH₄⁺-N 含量与 CK 相比, 分别增加了 100.40、52.27 和 22.29 mg·kg⁻¹. S2 处理土壤 NH₄⁺-N 的第二次峰



(a) 不同处理土壤 N_2O 排放通量动态变化, 箭头表示施肥, 下同; (b) 不同处理土壤 N_2O 累积排放量

图2 不同处理土壤 N_2O 排放通量和 N_2O 累积排放量

Fig. 2 Soil N_2O emission fluxes and cumulative emission of N_2O in different treatments

值出现在施肥后第 8 d ($42.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S3 处理第二和第三次 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 峰值均出现在施肥后 1 周左右, 含量分别为 $176.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $41.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

CK 处理土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量变化相似, 也维持在较低水平. 其他处理的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量变化类似于相应的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量变化, 但其起峰时间略有滞后 [图

3(b)]. 施肥后第 7 d, S1、S2 和 S3 处理 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量开始起峰, 达到峰值时较 CK 分别增加了 24.32、30.53 和 $25.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. S2 处理土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的第二次峰值出现在追肥后的第 14 d ($32.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S3 处理两次 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 峰值分别出现在施肥后 2 周左右, 含量分别为 $147.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $32.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

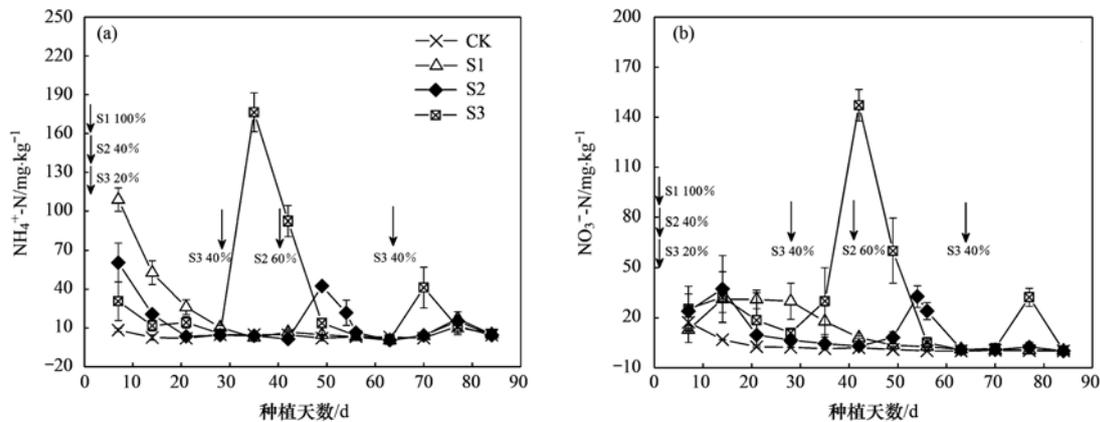


图3 不同处理土壤铵态氮含量和硝态氮含量动态变化

Fig. 3 Dynamic changes in soil $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ content and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ content under different treatments

2.6 施肥对 AOB、*nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 基因拷贝数的影响

第 40 d 和第 51 d (分别为 S2 和 S3 处理第二次施肥后的 N_2O 排放峰值时期) 时各处理 AOB 基因丰度均表现出显著差异 ($P < 0.05$, 下同). 第 40 d 时, 各处理土壤 AOB 丰度的大小顺序为: $\text{S3} > \text{S2} > \text{S1} > \text{CK}$; 第 51 d 时各处理土壤 AOB 丰度的大小顺序则为: $\text{S2} > \text{S3} > \text{S1} > \text{CK}$ [图 4(a)].

施氮提高土壤 *nirK* 基因丰度. 培养: 第 40 d 和第 51 d 时, S1、S2 和 S3 处理土壤 *nirK* 拷贝数分别较 CK 高出了 96.48%、81.51%、190.45% 和 97.83%、695.49%、463.17%. S3 处理土壤 *nirK* 拷贝数在培养第 40 d 时显著高于其他处理; 培养第 51 d 时各施氮处理间土壤 *nirK* 拷贝数差异显著, S2

处理最高, S3 处理次之, S1 处理最低.

施氮土壤的 *nirS* 基因拷贝数均显著高于 CK 处理. 培养第 40 d 和第 51 d 时, S1、S2 和 S3 处理土壤 *nirS* 拷贝数分别较 CK 增加了 286.42%、379.11% 和 182.14% 以及 173.98%、162.17% 和 259.71%. 培养第 40 d 时, 施氮处理间的 *nirS* 拷贝数差异显著, 各处理高低顺序为: $\text{S2} > \text{S1} > \text{S3} > \text{CK}$. 培养第 51 d 时, S3 处理显著高于 S1 和 S2 处理, 而 S1 和 S2 之间差异不显著 [图 4(c)].

施氮处理的土壤 *nosZ* 基因拷贝数均达到显著水平. 培养第 40 d 时, S3 处理的 *nosZ* 基因拷贝数显著低于 S1 和 S2 处理; 培养第 51 d 时, S2 处理的 *nosZ* 基因拷贝数最低, 可见施肥显著降低了土壤 *nosZ* 基因拷贝数 [图 4(d)].

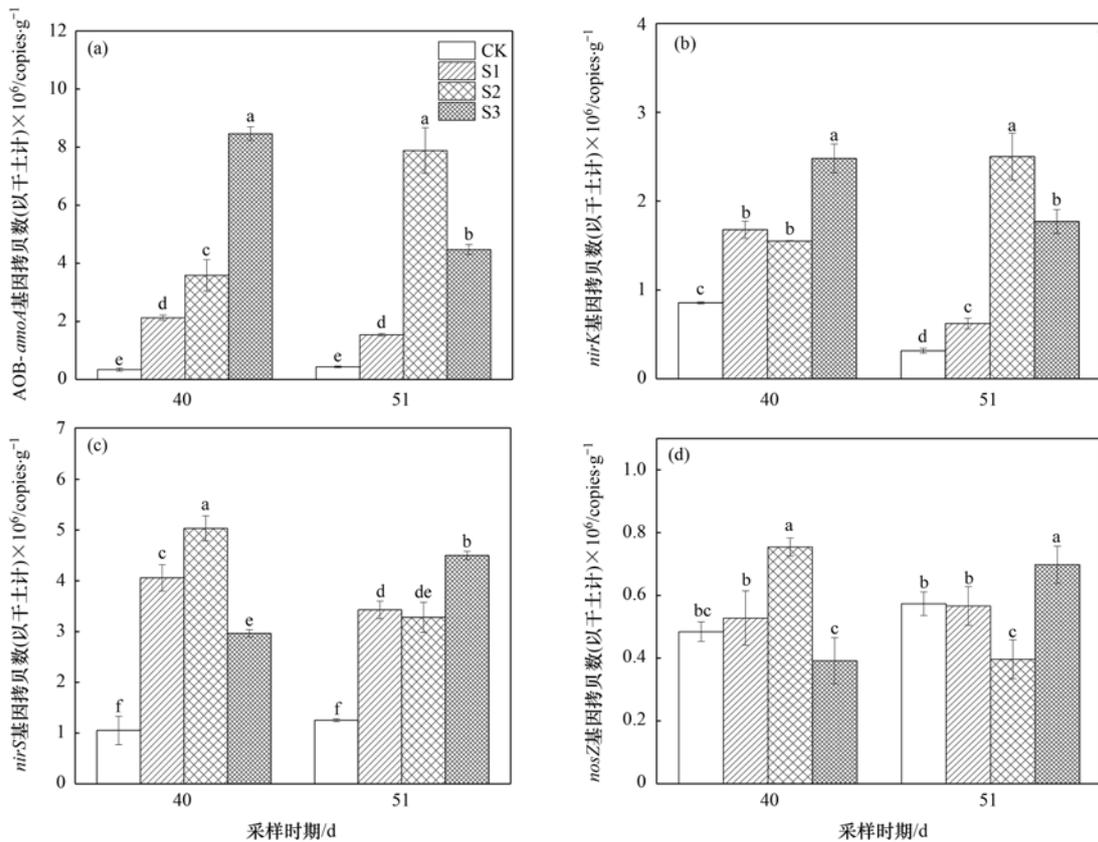


图 4 不同处理下硝化和反硝化细菌基因丰度的变化

Fig. 4 Changes in gene abundance of nitrifying and denitrifying bacteria under different treatments

与 CK 相比,施氮显著提高土壤 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 的比值 ($P < 0.05$, 图 5). 培养第 41 d 时, S3 处理的 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 比值显著高于 S2 处理, 各处理高低顺序为: S3 > S1 > S2 > CK; 培养第 51 d 时, S2 处理的土壤 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 值显著高于 S1 和 S3 处理.

2.7 N₂O 排放与功能基因及 pH 的关系

N₂O 排放通量与 AOB、*nirK*、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 呈极显著正相关, 与 pH 呈显著负相关. N₂O 排放通量与 *nirS* 和 *nosZ* 拷贝数之间相关性不显著. AOB 与土壤 NO₃⁻-N 呈显著正相关, 与 pH 呈极显著负相关. *nirK* 基因拷贝数与土壤 pH 呈极显著负相关, *nosZ* 基因与土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 呈极显著负相关, pH 与土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 呈显著负相关 (表 3).

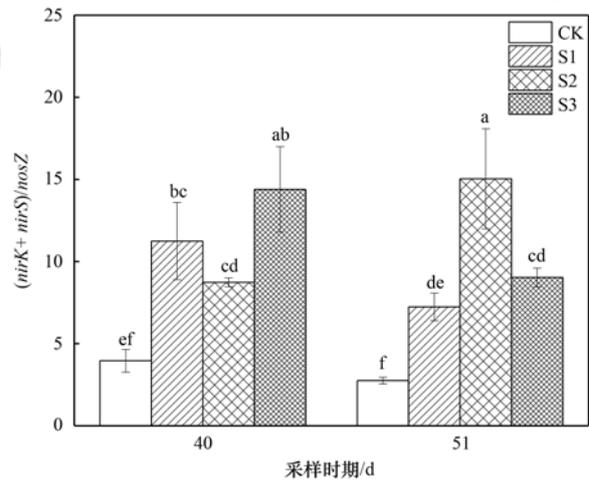


图 5 不同处理 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 比值

Fig. 5 Ratio in (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* under different treatments

表 3 N₂O 排放与功能基因 (AOB、*nirK*、*nirS* 和 *nosZ*) 及土壤理化性质的相关性¹⁾

Table 3 Pairwise correlations between N₂O emission and functional genes (AOB, *nirK*, *nirS*, and *nosZ*) and soil physicochemical properties

	N ₂ O	AOB	<i>nirK</i>	<i>nirS</i>	<i>nosZ</i>	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N
AOB	0.471 **						
<i>nirK</i>	0.340 **	0.522 **					
<i>nirS</i>	-0.171	-0.003	-0.082				
<i>nosZ</i>	-0.151	0.533 **	0.267 *	0.381 **			
NO ₃ ⁻ -N	0.784 **	0.259 *	0.216	-0.239	-0.340 **		
NH ₄ ⁺ -N	0.522 **	0.088	0.238	-0.195	-0.337 **	0.539 **	
pH	-0.295 *	-0.540 **	-0.486 **	0.224	-0.161	-0.264 *	-0.304 *

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3 讨论

3.1 氮分施次数对土壤性质的影响

尿素施入土壤后,在脲酶催化下水解成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,其又是硝化作用的反应底物,硝化微生物将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[18],施肥后尿素水解速度快于硝化速度,这是施尿素后土壤铵含量峰值出现的原因.硝化的产物 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 如果没有发生强还原及淋失,且作物吸收量低于硝化作用的供应量,也会在土壤中出现峰值.由于铵态氮和硝态氮的形成有先后顺序, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量起峰时间滞后于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的起峰时间. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 峰值的高低与施肥量有关,施肥量越多,峰值越高^[19].施入基肥时, S1 的施肥量最高,其次是 S2 (占氮总量的 40%), S3 的最低 (占氮总量的 20%),并且 S1 处理添加了 DCD,抑制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化,所以第一次 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 峰值的高低顺序为: S1 > S2 > S3 > CK. S3 处理第二次施肥量占氮总量的 40%,第二次峰值高于第一次.到培养后期,玉米生长需要大量的氮,土壤中的有效氮被植物吸收利用, S2 和 S3 最后一次的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 峰值较低,并且随培养的进行逐渐降低并趋于平稳状态.

与 CK 相比,各施氮处理的土壤均出现酸化现象.减少施肥次数减缓土壤酸化程度, S1 和 S2 处理的土壤 pH 差异不显著,但显著高于 S3 处理 ($P < 0.05$, 表 1). 土壤 pH 变化与尿素水解、硝化及植物对铵态氮和硝态氮的吸收利用等有关^[20-23]. 尿素施入土壤水解成 NH_3 , NH_3 质子化过程释放 OH^- , 提高土壤 pH^[19, 24], 尿素投入越多,水解后的 NH_3 质子化过程释放 OH^- 也越多. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为硝化底物,其浓度增加刺激了硝化进程,硝化细菌将 NH_4^+ 氧化成 NO_3^- 的同时释放 H^+ , 降低了土壤 pH^[23, 25]. 硝化作用每氧化 1 mol NH_4^+ 为 NO_3^- , 向环境释放 2 mol H^+ ^[26], 所以本试验中铵态氮硝化反应产生的 H^+ 抵消了 NH_3 质子化过程释放的 OH^- 后还有剩余,这就导致施氮处理土壤 pH 下降. S1 的土壤 pH 高,是由于硝化抑制剂 DCD 延缓铵态氮的硝化过程,从而提高土壤 pH^[20]. Poss 等^[27] 的研究表明, NO_3^- 被作物根系吸收是质子消耗过程,释放出 OH^- . Weligama 等^[28] 的研究指出,利用喜硝植物吸收硝态氮过程中释放的 OH^- 能够中和土壤酸度.而 S1 处理肥效释放缓慢,与 S2 处理的氮利用率均高于 S3 处理,土壤中大量的硝态氮被植物吸收利用,释放的 OH^- 与硝化作用释放的 H^+ 达到平衡状态,所以 S1 和 S2 的 pH 要显著高于 S3 处理,这就是氮分施次数造成土

壤 pH 差异的原因(表 1).

3.2 氮肥分施次数对作物产量及氮素吸收的影响

氮素利用效率是衡量土壤-植物系统氮素损失指标^[29]. Liu 等^[30] 的研究发现, DCD 能提高小麦-玉米轮作田产量、植株氮素吸收和肥料氮利用效率.同时 Afreh 等^[31] 的研究表明,地上生物量越高氮素吸收越高.氮肥分施次数影响土壤 pH,从而影响植物对氮素的吸收利用. Abbasi 等^[32] 的研究指出,土壤 pH 对氮的吸收起着至关重要的作用,随着 pH 提高,氮素吸收增加. Wang 等^[33] 的研究指出, pH 值较低会对植物氮素吸收以及能为作物提供氮素的过程(矿化和硝化)产生负面影响,由于单施氮肥显著降低土壤 pH 值,其氮素吸收也最低^[34]. 本试验中 S1 和 S2 处理的 pH 值显著高于 S3 处理,因此其对应的植物氮吸收累积量和氮素利用效率较高.这可能也是 S1 和 S2 处理的作物产量和植株总生物量高于 S3 的原因.一般而言,玉米为喜硝作物,偏好吸收硝态氮^[35],由于 S3 处理显著降低了土壤 pH 值,并且施肥次数越多气态氮损失越多,植物可利用氮减少,氮素吸收量也降低,降低了生物量及产量.

3.3 不同分施处理对 N_2O 排放的影响

施肥后土壤 N_2O 排放出现峰值[图 2(a)],主要是由于尿素施入显著提高土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,为土壤硝化和反硝化过程提供底物,硝化和反硝化作用相互促进,增加 N_2O 排放^[36, 37]. 相关性分析结果显示,土壤 N_2O 排放与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈极显著正相关,施尿素量越多,铵硝含量越高,土壤 N_2O 峰值亦越高^[38, 39]. 方雅各等^[19] 的研究表明,未添加硝化抑制剂条件下, N_2O 排放总量为:一次性施肥 > 二次施肥 > 三次施肥.但本研究的各处理 N_2O 累积排放量高低顺序与其相反,即 S3 > S2 > S1 > CK,也就是施肥次数越多, N_2O 出现峰值次数越多,累积排放量越高.造成这一差异的原因:一方面是本研究中有玉米对氮的吸收,植物生长显著降低了参与 N_2O 生成的土壤氮量.土壤氮被植物利用后,使参加硝化或反硝化作用的氮量减少,从而减少 N_2O 产生^[40]. S1 和 S2 的植株氮利用率高于 S3,其参与 N_2O 生成的氮量相应少于 S3; 另一方面, S1 添加了硝化抑制剂 DCD,通过抑制尿素水解和铵态氮硝化作用,相应降低硝化及反硝化过程中 N_2O 产生^[41, 42]. 此外,土壤 pH 经常被认为是影响土壤 N_2O 产生途径的关键因素^[43]. 相关性分析显示, pH 与 N_2O 呈负相关关系,而与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别呈极显著负相关和显著负相关关系.倪康等^[44] 和田玉华等^[45] 研究表明, pH 值升高

可以显著提高氨挥发速率. 由于 S3 处理较低的 pH 会抑制氨挥发过程, 有利于更多的 NH₄⁺-N 参与硝化和反硝化过程, 从而导致较高的 N₂O 累积排放量. 微生物对所在环境的 pH 也具有高度的敏感性^[43]. 有研究表明 N₂O 排放随 pH 降低而增加, 主要源于低 pH 下的微生物活性受抑而无法进一步将 N₂O 还原成 N₂, 导致 N₂O 排放增多^[46,47].

贺纪正等^[48]的研究表明, AOB 多在中碱性土壤中起主导作用. 杨柳青^[49]的研究发现, 施肥后 AOB 拷贝数增加的同时出现了较强的 N₂O 排放峰. Shi 等^[50]的研究显示, 在 AOB 作用下, 有利于硝态氮的产生, 从而促进 N₂O 的排放. 本研究选取 S2 和 S3 第二次施肥后气体峰值时的微生物数据来分析施肥对氮转化相关功能基因的影响. 本研究土壤 pH 近中性, AOB 拷贝数又与 pH 呈极显著负相关, 与 NO₃⁻-N 含量呈显著正相关, 并且 N₂O 通量与 AOB 拷贝数呈极显著正相关(表 3), 因此 AOB 可能是 N₂O 排放的主要贡献者. Liu 等^[51]的研究结果表明, DCD 的施用不仅显著抑制了硝化作用, 而且降低了 AOB 的丰度, 所以 S1 处理排放较低. 本研究 N₂O 通量与 *nirK* 拷贝数之间存在极显著正相关, 施肥增加了 *nirK* 拷贝数, 同时 N₂O 出现峰值, 这表明 *nirK* 基因也对 N₂O 通量有贡献. 而 N₂O 通量与 *nirS* 和 *nosZ* 基因拷贝数均呈负相关关系. 本试验中 S2 和 S3 处理施肥后 N₂O 通量显著增加, 一方面可能是由于 *nirK* 基因丰度的增加, 促进 NO₂⁻ 还原为 NO, 间接刺激反硝化作用中 N₂O 产生^[36], 另一方面可能是因为 *nosZ* 基因丰度的减少抑制了反硝化过程中 N₂O 还原为 N₂, 直接增加了土壤 N₂O 排放.

4 结论

(1) 氮分施次数造成土壤酸化程度的显著差异, 分施次数越多, 土壤酸化程度越强. 施氮显著提高鲜食玉米的果穗产量及茎秆生物量, 氮肥分施次数的差异造成玉米氮吸收利用的差异. 氮分施 3 次的处理土壤 pH 降幅最大, 植物氮吸收累积量最少, 氮素利用效率最低, N₂O 累积排放量最多. 尿素氮配合 DCD 一次性施入不仅保证玉米产量, 提高氮素利用效率, 还减缓 N₂O 排放, 可以作为海南热区鲜食玉米推荐的施肥模式.

(2) 施肥通过影响氮转化过程的功能基因, 从而影响 N₂O 排放. N₂O 排放与 AOB 和 *nirK* 基因丰度呈显著正相关关系, AOB 和 *nirK* 是 N₂O 排放的主要贡献者. 尿素氮配合 DCD 的一次性施肥显著降低了 AOB 和 *nirK* 基因丰度, 而尿素氮分二和三次

施肥显著增加 *nirK* 和 *nirS* 基因丰度, 降低 *nosZ* 的基因丰度, 促进了 N₂O 排放.

参考文献:

- [1] 林允珍, 符书贤, 熊怀阳, 等. 甜、糯鲜食玉米品种在海南的冬种表现及评价[J]. 上海农业科技, 2017, (5): 73-75.
Lin Y Z, Fu S X, Xiong H Y, et al. The performance and evaluation of sweet and waxy edible maize varieties in winter planting in Hainan [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2017, (5): 73-75.
- [2] 叶思敏. 海南鲜食玉米价格年后回升[N]. 南方农村报, 2016-03-03(11).
- [3] 颀健辉, 李玲玲, 谢军红, 等. 氮肥运筹对旱作覆膜玉米产量及固碳减排效应研究[J]. 中国土壤与肥料, 2019, (6): 134-141.
Xie J H, Li L L, Xie J H, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on yield, carbon sequestration and emission reduction of dryland mulched maize [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2019, (6): 134-141.
- [4] 侯云鹏, 孔丽丽, 李前, 等. 覆膜滴灌条件下氮肥运筹对玉米氮素吸收利用和土壤无机氮含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1378-1387.
Hou Y P, Kong L L, Li Q, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen absorption, utilization and soil inorganic nitrogen content under film mulch drip irrigation of maize [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(9): 1378-1387.
- [5] 韩蔚娟, 王寅, 陈海潇, 等. 黑土区玉米施用新型肥料的效果和环境效应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 307-311.
Han W J, Wang Y, Chen H X, et al. Study on the effect of new-type fertilizer application on spring maize production and its environmental impact in black soil area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 307-311.
- [6] 李雨繁, 贾可, 王金艳, 等. 不同类型高氮复混(合)肥氨挥发特性及其对氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 615-623.
Li Y F, Jia K, Wang J Y, et al. Ammonia volatilization characteristics of different kinds of high-nitrogen compound fertilizers and their effects on nitrogen balance [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(3): 615-623.
- [7] 张鑫. 施氮方式对玉米产量、氮素释放特征的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
Zhang X. Effects of nitrogen application approaches on the corn yield and characteristics of nitrogen release [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [8] 唐拴虎, 郑惠典, 张发宝, 等. 控释肥料养分释放规律及对水稻生长发育效应的研究[J]. 华南农业大学学报(自然科学版), 2003, 24(4): 9-12.
Tang S H, Zheng H D, Zhang F B, et al. Nutrient release of controlled-release fertilizer and its effects on rice growth and development [J]. Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition), 2003, 24(4): 9-12.
- [9] 安景文, 汪仁, 包红静, 等. 不同肥料配方一次性施肥对玉米产量和养分吸收的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 874-877.
An J W, Wang R, Bao H J, et al. Effects of basal dressing total fertilizers once with different fertilizer formulas on product and nutrient uptake of maize [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4): 874-877.
- [10] 唐拴虎, 徐培智, 陈建生, 等. 一次性施用控释肥对水稻根系活力及养分吸收特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 591-596.

- Tang S H, Xu P Z, Chen J S, *et al.* Effects of single basal application of controlled-release fertilizer on root activity and nutrient absorption of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, **13**(4): 591-596.
- [11] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学, 2018, **51**(20): 3827-3839.
- Liu Z H, Wu X B, Tan D S, *et al.* Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, **51**(20): 3827-3839.
- [12] IPCC. Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group iii to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [13] 胡小康, 黄彬香, 苏芳, 等. 氮肥管理对夏玉米土壤 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 中国科学: 化学, 2011, **41**(1): 117-128.
- Hu X K, Huang B X, Su F, *et al.* Effects of nitrogen management on methane and nitrous oxide emissions from summer maize soil in North China Plain[J]. Scientia Sinica Chimica, 2011, **41**(1): 117-128.
- [14] 张婧, 夏光利, 李虎, 等. 一次性施肥技术对冬小麦/夏玉米轮作系统土壤 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(1): 195-204.
- Zhang J, Xia G L, Li H, *et al.* Effect of single basal fertilization on N₂O emissions in wheat and maize rotation system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(1): 195-204.
- [15] 范会, 姜姗姗, 魏茨, 等. 农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH₃ 和 N₂O)减排效果比较: 以夏玉米季为例[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2906-2913.
- Fan H, Jiang S S, Wei Y, *et al.* Assessment of gaseous nitrogen (NH₃ and N₂O) mitigation after the application of a range of new nitrogen fertilizers in summer maize cultivation [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2906-2913.
- [16] 武志杰, 石元亮, 李东坡, 等. 稳定性肥料发展与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(6): 1614-1621.
- Wu Z J, Shi Y L, Li D P, *et al.* The development and outlook of stabilized fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(6): 1614-1621.
- [17] 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 等. 生物炭对华北农田土壤 N₂O 通量及相关功能基因丰度的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3816-3825.
- Liu X R, Zhao G X, Zhang Q W, *et al.* Effects of biochar on nitrous oxide fluxes and the abundance of related functional genes from agriculture soil in the north China plain[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3816-3825.
- [18] 王峰, 陈玉真, 尤志明, 等. 不同施氮量对两种茶园土壤硝化作用和 pH 值的影响[J]. 茶叶科学, 2015, **35**(1): 82-90.
- Wang F, Chen Y Z, You Z M, *et al.* Effects of different nitrogen application rates on nitrification and pH of two tea garden soil [J]. Journal of Tea Science, 2015, **35**(1): 82-90.
- [19] 方雅各, 解钰, 王丽华, 等. 等氮量下不同分施次数对燥红壤 N₂O 排放的影响[J]. 土壤, 2018, **50**(2): 347-352.
- Fang Y G, Xie Y, Wang L H, *et al.* Effects of different nitrogen application times on N₂O emission in dry red soil [J]. Soils, 2018, **50**(2): 347-352.
- [20] 刘源, 钱薇, 徐仁扣. 双氰胺对施氮肥引起的红壤酸化的抑制作用[J]. 生态与农村环境学报, 2013, **29**(1): 76-80.
- Liu Y, Qian W, Xu R K. Inhibitory effect of dicyandiamide on acidification of red soils induced by ammonium-based fertilizers [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, **29**(1): 76-80.
- [21] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, **47**(2): 238-244.
- Xu R K. Research progresses in soil acidification and its control [J]. Soils, 2015, **47**(2): 238-244.
- [22] 孟红旗, 刘景, 徐明岗, 等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. 土壤学报, 2013, **50**(6): 1109-1116.
- Meng H Q, Liu J, Xu M G, *et al.* Evolution of pH in top soils of typical Chinese croplands under long-term fertilization [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(6): 1109-1116.
- [23] 佟德利, 徐仁扣, 顾天夏. 施用尿素和硫酸铵对红壤硝化和酸化作用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, **28**(4): 404-409.
- Tong D L, Xu R K, Gu T X. Effect of application of urea and ammonium sulfate on nitrification and acidification in red soils different in initial pH [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, **28**(4): 404-409.
- [24] 蔡泽江, 孙楠, 王伯仁, 等. 几种施肥模式对红壤氮素形态转化和 pH 的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(14): 2877-2885.
- Cai Z J, Sun N, Wang B R, *et al.* Experimental research on effects of different fertilization on nitrogen transformation and pH of red soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, **45**(14): 2877-2885.
- [25] Zamanian K, Zarebanadkouki M, Kuzyakov Y, *et al.* Nitrogen fertilization raises CO₂ efflux from inorganic carbon: a global assessment[J]. Global Change Biology, 2018, **24**(7): 2810-2817.
- [26] Martikainen P J. Nitrification in forest soil of different pH as affected by urea, ammonium sulphate and potassium sulphate [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, **17**(3): 363-367.
- [27] Poss R, Smith C J, Dunin F X, *et al.* Rate of soil acidification under wheat in a semi-arid environment [J]. Plant and Soil, 1995, **177**(1): 85-100.
- [28] Weligama C, Tang C, Sale P W G, *et al.* Localised nitrate and phosphate application enhances root proliferation by wheat and maximises rhizosphere alkalisation in acid subsoil [J]. Plant and Soil, 2008, **312**(1-2): 101-115.
- [29] Mohanty S, Nayak A K, Swain C K, *et al.* Impact of integrated nutrient management options on GHG emission, N loss and N use efficiency of low land rice [J]. Soil and Tillage Research, 2020, **200**, doi: 10.1016/j.still.2020.104616.
- [30] Liu C, Wang K, Zheng X. Effects of nitrification inhibitors (DCD and DMPP) on nitrous oxide emission, crop yield and nitrogen uptake in a wheat-maize cropping system [J]. Biogeosciences, 2013, **10**(4): 2427-2437.
- [31] Afreh D, Zhang J, Guan D H, *et al.* Long-term fertilization on nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions in a double maize cropping system in subtropical China [J]. Soil and Tillage Research, 2018, **180**: 259-267.
- [32] Abbasi M K, Tahir M M, Rahim N. Effect of N fertilizer source and timing on yield and N use efficiency of rainfed maize (*Zea mays* L.) in Kashmir-Pakistan [J]. Geoderma, 2013, **195-196**: 87-93.
- [33] Wang L F, Du H C, Han Z Q, *et al.* Nitrous oxide emissions from black soils with different pH [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(6): 1071-1076.
- [34] Fageria N K, Baligar V C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants [J]. Advances in Agronomy, 2005, **88**: 97-185.

- [35] 程谊, 张金波, 蔡祖聪. 气候-土壤-作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用[J]. 土壤学报, 2019, **56**(3): 507-515.
Cheng Y, Zhang J B, Cai Z C. Key role of matching of crop-specific N preference, soil N transformation and climate conditions in soil N nutrient management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(3): 507-515.
- [36] Skiba U, Smith K A. The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils[J]. Chemosphere-Global Change Science, 2000, **2**(3-4): 379-386.
- [37] 郝耀旭, 刘继璇, 袁梦轩, 等. 长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2586-2593.
Hao Y X, Liu J X, Yuan M X, et al. Effects of long-term organic amendments on soil N₂O emissions from winter wheat-maize cropping systems in the Guanzhong plain [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2586-2593.
- [38] 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 等. 地膜覆盖和施氮对菜地 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 893-903.
Ni X, Hao Q J, Chen S J, et al. Effects of plastic film mulching and nitrogen fertilizer application on N₂O emissions from a vegetable field[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 893-903.
- [39] 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH₄、N₂O 气体排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3655-3661.
Wang X Y, Zhang R Z, Cai L Q, et al. Emission characteristics of CH₄ and N₂O fluxes from dryland field under different nitrogen treatments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(11): 3655-3661.
- [40] 杨兰芳, 蔡祖聪. 施氮和玉米生长对土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(1): 100-104.
Yang L F, Cai Z C. Effects of N application and maize growth on N₂O emission from soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, **16**(1): 100-104.
- [41] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 施氮量及抑制剂配比对双季稻生长期温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(4): 919-925.
Liu Z B, Ji X H, Peng H, et al. Effects of nitrogen amount and inhibitor ratio on greenhouse gas emission during double-rice growing season[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, **19**(4): 919-925.
- [42] 邱伟红, 刘金山, 胡承孝, 等. 硝化抑制剂双氰胺对菜地土壤 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3188-3192.
Qiu W H, Liu J S, Hu C X, et al. Mitigation of nitrous oxide emissions in vegetable system by treating soil with dicyandiamide, a nitrification inhibitor[J]. Environmental Science, 2011, **32**(11): 3188-3192.
- [43] 谭立山. 农业土壤 N₂O 产生途径及其影响因素研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2017, **13**(3): 196-204.
Tan L S. Advances in N₂O generation pathway in agricultural soils and major influencing factors[J]. Subtropical Agriculture Research, 2017, **13**(3): 196-204.
- [44] 倪康, 丁维新, 蔡祖聪. 有机无机肥长期定位试验土壤小麦季氨挥发损失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(12): 2614-2622.
Ni K, Ding W X, Cai Z C. Ammonia volatilization from soil as affected by long-term application of organic manure and chemical fertilizers during wheat growing season [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(12): 2614-2622.
- [45] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2007, **44**(5): 893-900.
Tian Y H, He F Y, Yin B, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the taihu lake region as affected by N and P combination in fertilization [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(5): 893-900.
- [46] Kim J S, Kim S J, Lee B H. Effect of *Alcaligenes faecalis* on nitrous oxide emission and nitrogen removal in three phase fluidized bed process[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2004, **39**(7): 1791-1804.
- [47] 欧阳学军, 周国逸, 黄忠良, 等. 土壤酸化对温室气体排放影响的培育实验研究[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(4): 465-470.
Ouyang X J, Zhou G Y, Huang Z L, et al. The incubation experiment studies on the influence of soil acidification on greenhouse gases emission [J]. China Environmental Science, 2005, **25**(4): 465-470.
- [48] 贺纪正, 沈菊培, 张丽梅. 土壤硝化作用的新机理——氨氧化古菌在酸性土壤氨氧化中的主导作用[J]. 科学观察, 2012, **7**(6): 58-60.
- [49] 杨柳青. 石灰性潮土 N₂O 产生过程及相关功能基因丰度和表达[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
Yang L Q. N₂O production processes and the abundance and expression of relative functional genes in calcareous fluvo aquic soil[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [50] Shi Y L, Liu X R, Zhang Q W. Effects of combined biochar and organic fertilizer on nitrous oxide fluxes and the related nitrifier and denitrifier communities in a saline-alkali soil[J]. Science of the Total Environment, 2019, **686**: 199-211.
- [51] Liu Y, Yang Y, Qin H L, et al. Differential responses of nitrifier and denitrifier to dicyandiamide in short-and long-term intensive vegetable cultivation soils[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, **13**(5): 1090-1098.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China, 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)