

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)

城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)

天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)

清洁取暖对保定市采暖期 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的影响 罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)

大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)

2016~2020 年成都市控制 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的健康效益评价 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗攻 (3117)

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)

雅鲁藏布江水化学演变规律 江平, 张全发, 李思悦 (3165)

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)

镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 黄静文, 刘磊, 顾晓元, 凌超普 (3321)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)

植被类型对黄土高原露天复垦土壤碳循环功能基因的影响 赵蛟, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N₂O 排放及其功能基因的影响 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)

云南 5 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属含量表征及健康风险 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 王美华 (3509)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 刘海, 魏伟, 潘海, 宋阳, 靳磊, 李建设, 叶林, 黄健敏 (3531)

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)

山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)

《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤N₂O排放及其功能基因的影响

陈绮琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正*, 孟磊*, 汤水荣
(海南大学热带作物学院, 海口 570228)

摘要: 生物炭具有一定的增产和减少N₂O排放效果,但关于其相关氮循环微生物作用的动态变化过程了解较少.为探究热带地区生物炭的增产减排效应潜力及相关微生物动态作用机制,通过辣椒盆栽试验对比添加生物炭(B)、常规施肥(CON)和不施氮(CK)处理对辣椒产量、氧化亚氮(N₂O)的排放及相关功能基因丰度的影响.结果表明,CON处理产量高于CK处理;与CON处理相比,生物炭显著增加辣椒产量18.0% ($P < 0.05$),添加生物炭在辣椒生长的大部分时期增加土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量;在辣椒的生长周期内,相比CON处理,生物炭处理显著减少土壤N₂O累积排放量18.3% ($P < 0.05$).N₂O排放通量与氨氧化古菌(AOA)和氨氧化细菌(AOB)的*amoA*基因丰度呈极显著负相关($P < 0.01$);与*nosZ*基因丰度呈显著负相关($P < 0.05$),表明N₂O排放可能主要来自反硝化过程;在辣椒生长初期,生物炭处理通过降低(*nirK + nirS*)/*nosZ*值显著降低N₂O的排放,而在辣椒生长后期B处理的(*nirK + nirS*)/*nosZ*值高于CON处理导致其N₂O通量高于CON处理.因此,添加生物炭不仅能够达到使热带地区蔬菜增产的效果,同时也减少N₂O的排放量,可以作为海南等热带地区土壤地力提升的新策略.

关键词: 生物炭;辣椒产量;N₂O排放;功能基因;动态变化

中图分类号: X16; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3418-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202207119

Effects of Biochar Amendment on N₂O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas

CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, WANG Yu-qin, ZHU Qi-lin, HU Tian-yi, HU Yu-jie, WU Yan-zheng*, MENG Lei*, TANG Shui-rong

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

Abstract: Biochar application may mitigate N₂O emissions and increase crop yield, yet little is known about microbial dynamics variation. To investigate the potential of increasing yield and reducing emissions of biochar in tropical areas and the dynamic mechanism of related microorganisms, a pot experiment was conducted to investigate the biochar application on pepper yield, N₂O emissions, and dynamic variation of related microorganisms. Three treatments were applied: 2% biochar amendment (B), conventional fertilization (CON), and no nitrogen (CK). The results showed that the yield of the CON treatment was higher than that of the CK treatment. Compared with that of the CON treatment, biochar amendment significantly increased the yield of pepper by 18.0% ($P < 0.05$), and biochar amendment could increase the content of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in soil in most periods of pepper growth. Compared with that in the CON treatment, the B treatment significantly reduced cumulative N₂O emissions by 18.3% ($P < 0.05$). Ammonia oxidizing archaea (AOA)-*amoA* and ammonia oxidizing bacteria (AOB)-*amoA* were very significantly negatively correlated with N₂O flux ($P < 0.01$). N₂O flux was significantly negatively correlated with *nosZ* gene abundance ($P < 0.05$). This indicated that N₂O emission may have mainly resulted from the denitrification process. In the early stage of pepper growth, biochar significantly reduced N₂O emissions by reducing the value of (*nirK + nirS*)/*nosZ*, whereas in the late stage of pepper growth, the value of (*nirK + nirS*)/*nosZ* of the B treatment was higher than that of the CON treatment, resulting in higher N₂O flux in the B treatment. Therefore, biochar amendment could not only increase vegetable production in tropical areas but also reduce N₂O emissions, which can be used as a new strategy to improve soil fertility in Hainan Province and other tropical areas.

Key words: biochar; pepper yield; N₂O emission; functional gene; dynamic change

氧化亚氮(N₂O)是重要的温室气体,对全球变暖的贡献率达到8%,其全球增温潜势约为二氧化碳的298倍,在大气中的滞留时间较长(约114 a),对臭氧层持续造成破坏^[1,2].农业生态系统是N₂O的重要排放源,农业上合成氮(N)肥的广泛使用,造成了60%的全球N₂O排放^[3].海南岛属于热带地区,其良好的湿热条件使得物质循环强烈,造成土壤贫瘠且保肥能力差,肥料利用率低^[4].近些年,海南地区稻-菜种植模式的耕作土壤面积日益增加,在施肥方面,瓜菜施用的化肥远远超出作物所需^[5].为提高作物产量和增加收益,每季瓜菜都伴随多次施肥,

造成氮肥的大量盈余,残留的大量氮肥加剧N₂O的排放^[6].添加外源生物炭是农业土壤减少温室气体排放、增强土壤碳固存、提高土壤肥力和提高作物生产力的新策略^[7].特别是在热带地区,生物炭的应用能够作为一种环境友好的土壤管理方式,以达到减少农业土壤N₂O排放的目的^[8,9].

收稿日期: 2022-07-11; 修订日期: 2022-08-26

基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目(2019RC049); 国家自然科学基金项目(41661051, 42067008)

作者简介: 陈绮琦(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤氮循环, E-mail: chairqi@126.com

* 通信作者, E-mail: wyz198712@163.com; menglei@hainanu.edu.cn

生物炭的应用能改变土壤的物理化学性质和微生物作用过程,从而影响 N_2O 的产生过程^[1, 10]. 有研究结果证实,生物炭可以通过增加土壤通气性、土壤 pH 值和氮底物吸附等过程,减少 N_2O 的排放量^[11~13]. 除了土壤理化性质外,生物炭对 N_2O 的排放的影响还受到参与氮循环过程的微生物的调控^[14]. Ji 等^[15]和陈晨等^[16]的试验结果表明,生物炭增加 *nosZ* 基因丰度可能是减少 N_2O 排放的主要原因. Lin 等^[7]研究却表明,水稻土壤中添加生物炭促进了氨氧化细菌 *amoA* 基因丰度,从而促进了 N_2O 排放. 陈晨等^[16]在菜地土壤中施用生物炭增加 *amoA*、*nirS* 和 *nirK* 基因丰度从而间接促进 N_2O 排放,但同时增加 *nosZ* 基因丰度直接促进 N_2O 还原,综合效应表现为降低菜地土壤 N_2O 排放. Liu 等^[17]在小麦玉米轮作系统中发现在作物生长的大部分时期,添加生物炭 *nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 基因的丰度随着生物炭的添加而明显增加,在不同时期的 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 不同,进而导致 N_2O 的排放量不同. 因此,添加生物炭对 N_2O 排放影响的相关微生物及其动态过程的作用机制,还需要深入研究. 在培养试验过程中一般只有一次外源氮肥添加,而在盆栽试验和田间试验过程中,作物生长一般伴随多次施肥过程,特别是海南冬季瓜菜种植过程中多次施肥过程比较普遍^[18]. 在多次施肥的管理措施下,土壤环境条件的变化可以改变生物炭对土壤参与氮循环过程的硝化和反硝化微生物和酶的影响,进而导致土壤 N_2O 排放的变化^[19, 20]. 在种植一季蔬菜的过程中,需要对 N_2O 排放的相关过程进行微生物动态分析,仅仅是最后一次采样或者中间一次采样,可能无法表征整个生长过程的微生物动态变化. 此外,研究生物炭添加下微生物的动态过程变化的研究较少,了解生物炭添加下冬季瓜菜种植过程中的微生物动态过程变化,将更有利于解析生物炭添加对 N_2O 排放的作用机制.

生物炭由于其稳定的结构在土壤改良特别是减排方面发挥了重要作用,但对热带地区蔬菜土壤 N_2O 排放及其微生物随施肥的动态变化仍需深

入探究. 基于此,本研究设置盆栽试验,通过测定土壤 N_2O 排放及其氮转化基因丰度的动态变化,探究生物炭在热带地区土壤的环境效应及其潜在机制,以期为生物炭在热带地区土壤改良提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验在海南大学海甸校区农科试验基地进行,栽培装置主体为高 30 cm,直径 20 cm 的圆柱桶. 供试土壤为水稻土,是滨海沉积物母质发育的砂壤土, pH 值为 6.39 (土壤与水质量比为 1:2.5), ω (有机质)为 19.60 g·kg⁻¹, ω (碱解氮)为 113.97 mg·kg⁻¹, ω (速效磷)为 66.17 mg·kg⁻¹, ω (速效钾)为 362.62 mg·kg⁻¹. 供试作物为牛角椒,品种“超恒 1 号”,于 2020 年 9 月 30 日播种,11 月 16 日定植于栽培桶内,翌年 2 月 25 日采收. 供试生物炭由玉米秸秆在 400℃ 经厌氧热解制备而成, pH 值为 7.58 (生物炭与水质量比为 1:2.5), ω (有机质)为 85.34 g·kg⁻¹, ω (全氮)为 1.79 g·kg⁻¹, ω (全钾)为 22.90 mg·kg⁻¹, 阳离子交换量为 46.92 cmol·kg⁻¹, 比表面积为 3.75 m²·g⁻¹.

1.2 试验设计

盆栽试验共设 3 个处理,即不施氮肥的空白对照 (CK)、常规施肥对照 (CON) 和添加 2% 生物炭 (B) 处理 (相当于田间施用条件下的 40 t·hm⁻²). 每个处理设 4 个重复,共 12 盆,随机区组排列. 辣椒定植前 7 d 在每盆中装入 5 kg 干土, B 处理同时施加生物炭混匀后装盆,并加水活化一周. 于定植前 1 d 混入基肥,所用肥料为 15-15-15 复合肥,定植后 20 d 施入第 1 次追肥,随后每 15 d 追肥一次,共 5 次,所用肥料为 13-10-20 硫基复合肥, CK 处理的磷、钾肥使用过磷酸钙和硫酸钾肥等量补足. 具体施肥方案见表 1. 试验期间各项农艺管理措施一致,肥料以水溶液的形式施用在土壤表面,辣椒每天根据土壤湿度情况进行灌溉.

表 1 盆栽试验施肥方案¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 1 Fertilization schemes of incubation experiment/mg·kg⁻¹

处理	辣椒 (基肥 + 追肥 + 追肥 + 追肥 + 追肥 + 追肥)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	—	250 + 26 + 52 + 52 + 52 + 52	250 + 52 + 104 + 104 + 104 + 104
CON/B	250 + 62.5 + 125 + 125 + 125 + 125	250 + 26 + 52 + 52 + 52 + 52	250 + 52 + 104 + 104 + 104 + 104

1) “—”表示未施入氮肥

1.3 气体的采集和测定

使用静态箱法收集气体^[4], 盆栽培养桶桶口外装有 55 cm × 55 cm 的采气底座, 底座边缘设有 2.5

cm 宽的水槽, 用于密封采气箱. 采气箱尺寸为 50 cm × 50 cm × 50 cm, 侧边开有采气孔, 箱子顶端插有温度计. 采气前, 先向水槽中加水形成密闭环境,

将采样箱置于底座凹槽内,再将内置风扇打开,使箱体内部及底座周边空气充分流动.于盖上采气箱的0、30和60 min抽取30 mL气体,注入抽成真空的20 mL顶空瓶中.采气时间为08:00~11:00,采集频率为一周一次,施肥后第1 d和4 d加密采样.采集的气体带回实验室由气相色谱仪(岛津GC-2014)分析, N_2O 检测器为电子捕获检测器(ECD),载气为氩甲烷,检测器温度300℃.标准气体由中国计量科学研究院提供.

于采气后(辣椒移栽后第2 d)采集土壤样品,频率为一周一次,最后一次追肥(65 d)后,只采取第68 d和第95 d的土壤,土壤样品采取0~20 cm处土壤,每次采土约为20 g,共10次采样,所有采样土壤为总土重的4%,土壤采样对植物生长几乎不会有影响.用靛酚蓝比色法(625 nm)和紫外双波长法(275 nm和220 nm)分别测定 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量.按小区分批采收成熟辣椒果实,称取鲜质量,累加计产.

根据B处理和CON处理土壤 N_2O 的排放情况以及先前的研究结果^[10],用于微生物检测的土壤采样时间为施肥2 d以后(第1、22、39、58和67 d).土壤微生物DNA的提取采用mobio DNA easy Power Soil® Kit土壤微生物DNA强力提取试剂盒,每个样品称取鲜土0.5 g,按照试剂盒说明书流程提取土壤DNA.提取后使用微量紫外分光光度计(NanoDrop 2000, USA)测定核酸浓度及质量,并置于-20℃保存备用.

1.4 荧光定量 qPCR

本试验采用土壤中氨氧化古菌(AOA)氨氧化基因(Arch-*amoA*)、氨氧化细菌(AOB)氨氧化基因(Bacteria-*amoA*)、亚硝酸还原酶基因(*nirK*、*nirS*)和一氧化氮还原酶基因(*nosZ*),所用引物分别为Arch-*amoA* 26F/Arch-*amoA* 417R、*amoA*-1F/*amoA*-2R、*nirK*-1F/*nirK*-5R、*nirS*-cd3aF/*nirS*-R3cd和*nosZ*-F/*nosZ*-1662R^[21].定量分析采用SYBRGREEN法,反应体系为20 μL,包括10 μL 2×T5 Fast qPCR Mix (SYBR Green I),10 μmol·L⁻¹正反引物各1 μL,1 μL DNA模板,并加入7 μL无菌水.用10⁻⁸~10⁻¹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^[10].

1.5 数据处理与分析

N_2O 排放通量计算见式(1).

$$F_{N_2O} = \rho \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273.15}{273.15 + T} \times h \quad (1)$$

式中, F_{N_2O} 为排放通量,单位为 $\mu g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$; ρ 为

标准状态下 N_2O 的密度($kg \cdot m^{-3}$); h 为采样箱高度(m); $\Delta c/\Delta t$ 为采样过程中箱内气体摩尔分数变化速率($\mu g \cdot h^{-1}$); T 为采样时箱内平均温度(℃).

累积排放量(f , $kg \cdot hm^{-2}$)计算见式(2).

$$f = \sum_{i=1}^n (F_i \times 24) + \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i - 1) \times 24 \right] \quad (2)$$

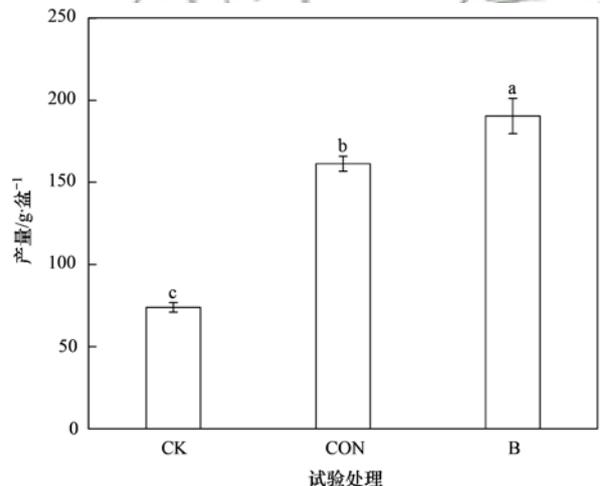
式中, n 和 i 为采样次数, t 为采样天数(d).

使用SPSS 20.0和Origin 2018进行数据统计分析与制图,所有试验测定4个重复,试验数据均为4个平行样品测定的平均值±标准差.单因素方差分析作显著性检验,处理间差异采用Duncan多重比较法;采用Pearson法对各变量间相关性进行分析,显著性水平为0.05.

2 结果与分析

2.1 生物炭对辣椒产量的影响

如图1所示,与CK相比,CON处理和B处理显著提高了辣椒产量.相比CON,B处理显著提高了18.0%的辣椒产量($P < 0.05$).



不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著($P < 0.05$)

图1 不同处理对辣椒产量的影响

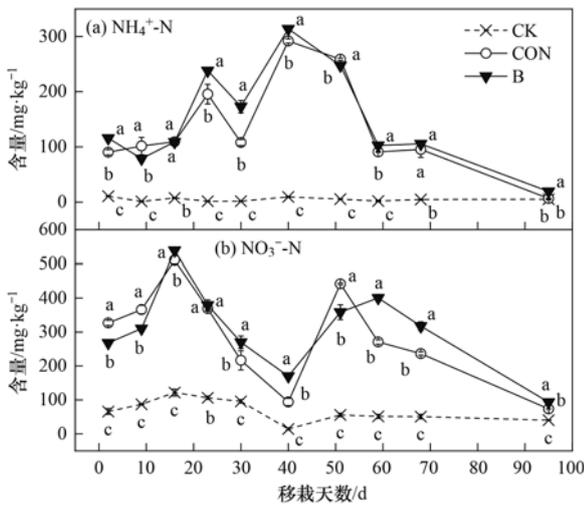
Fig. 1 Effects of different treatments on pepper yield

2.2 土壤铵态氮和硝态氮含量变化

由图2可知,CK处理的 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量几乎不变且维持在较低水平,CON和B处理土壤 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量变化趋势基本一致且大部分时期存在显著差异,仅在个别时期差异不明显.CON处理的 $\omega(NH_4^+$ -N)在第23 d前逐渐增加且在第23 d达到195.49 $mg \cdot kg^{-1}$,在第30 d下降至107.90 $mg \cdot kg^{-1}$,在第40 d达到最大值291.86 $mg \cdot kg^{-1}$ 后逐渐降低;B处理的 $\omega(NH_4^+$ -N)在第9 d时由第2 d的115.86 $mg \cdot kg^{-1}$ 下降至78.69 $mg \cdot kg^{-1}$,在第23

d 增加至 238.19 mg·kg⁻¹, 在第 30 d 下降至 172.99 mg·kg⁻¹, 在第 40 d 达到最大值 313.92 mg·kg⁻¹ 后逐渐降低. 仅在第 9 d 时, CON 处理的 NH₄⁺-N 含量显著高于 B 处理 ($P < 0.05$); 在第 16、51 和 68 d 时, CON 和 B 处理的 NH₄⁺-N 含量没有明显差异; 在第 2、23、30、40、59 和 95 d 时, 即大部分时期 B 处理的 NH₄⁺-N 含量要显著高于 CON 处理 ($P < 0.05$).

CON 和 B 处理的 $\omega(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 第 2 d 开始逐渐增加, 在第 16 d 达到 511.08 mg·kg⁻¹ 和 539.13 mg·kg⁻¹, 在第 40 d 下降至 94.20 mg·kg⁻¹ 和 170.04 mg·kg⁻¹. 在 51 d 时, CON 处理的 $\omega(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 再次升高至 442.09 mg·kg⁻¹ 后逐渐降低; 而 B 处理的 $\omega(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 在 59 d 达到峰值为 400.45 mg·kg⁻¹ 而后逐渐降低. 在第 2、9 和 51 d 时, CON 处理的 NO₃⁻-N 含量显著高于 B 处理 ($P < 0.05$); 仅在第 23 d 时, CON 和 B 处理的 NO₃⁻-N 含量没有明显差异; 在第 16、30、40、59、68 和 95 d 时, B 处理的 NO₃⁻-N 含量要显著高于 CON 处理 ($P < 0.05$), 即大部分时期, B 处理的 NO₃⁻-N 含量要高于 CON 处理.



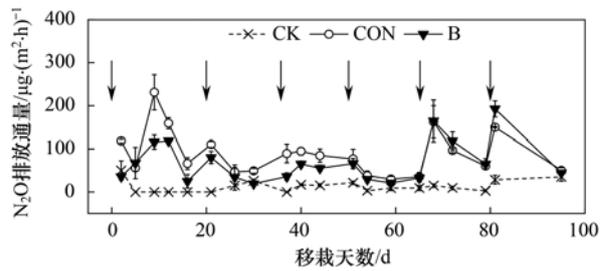
不同小写字母表示同一采样时间不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 不同处理下土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in NH₄⁺-N and NO₃⁻-N under different treatments

2.3 N₂O 排放通量和累积排放量的变化

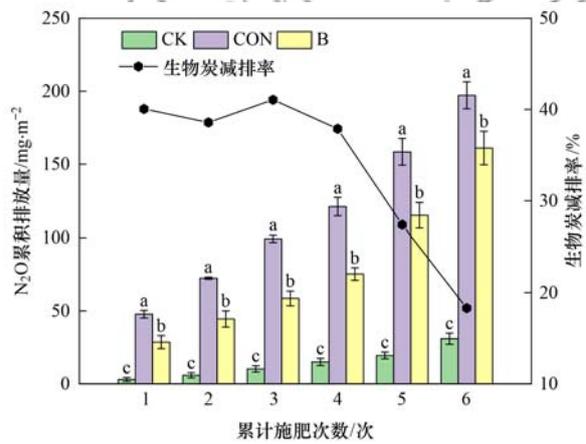
如图 3 所示, CK 处理的土壤 N₂O 排放维持在较低且平稳水平. 除 CK 处理外, CON 和 B 处理均有明显的排放峰, 且峰值都是出现在施肥后, 之后随着培养时间延长迅速回落. 施用基肥后, CON 的 N₂O 排放通量达到最大值, 为 231.10 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 在第 4 次追肥前, B 处理的 N₂O 排放通量均低于 CON 处理. 第 4 次追肥后, B 处理的 N₂O 排放通量超过了 CON 处理.



↓ 从左到右依次表示基肥、追肥、追肥、追肥、追肥和追肥
图 3 不同处理下 N₂O 排放通量动态变化

Fig. 3 Dynamic changes in N₂O fluxes in different treatments

施肥显著提高了土壤的 N₂O 累积排放量 (图 4), 在辣椒的生长周期内, CK、CON 和 B 处理的 N₂O 累积排放量分别为 30.94、197.22 和 161.13 mg·m⁻². 生物炭处理显著减少了整个生长周期内的 N₂O 排放总量, 与 CON 处理相比, B 处理的 N₂O 排放总量显著减少了 18.3% ($P < 0.05$). 随着施肥次数的增加, B 处理的减排率逐渐下降, 依次为 40.1%、38.6%、41.1%、37.9%、27.4% 和 18.3%.



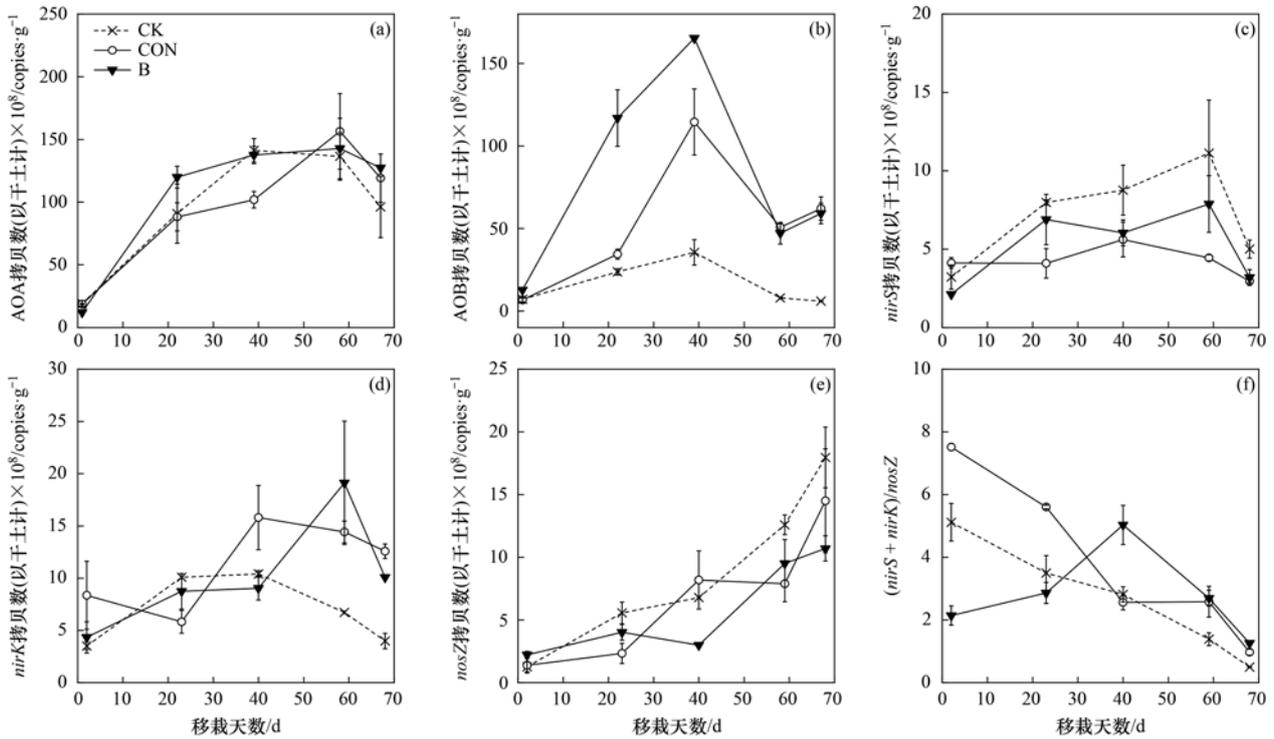
不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 不同累计施肥次数下各处理的 N₂O 累积排放量和生物炭减排率

Fig. 4 Cumulative N₂O emissions and biochar emission reduction ratio of each treatment in different cumulative fertilization times

2.4 基因丰度变化

由图 5 可知, 辣椒种植期间, AOA 丰度持续增加 [图 5(a)], 仅在 68 d 时下降, 辣椒移栽前期, B 处理要高于其他处理, 且和 CON 处理存在显著差异 ($P < 0.05$), 在第 59 d 后, 各个处理的 AOA 丰度差异不明显. 各处理土壤 AOB 丰度呈现先升后降的趋势, AOB 丰度在基肥施用后持续增加, 在第 2 次追肥后达到峰值 (移栽 40 d). 与 CK 对比, CON 和 B 处理显著提高了辣椒移栽后土壤 AOB 基因丰度 ($P < 0.05$), 而 B 处理较 CON 处理的 AOB 丰度较高 (23 d 和 40 d). 辣椒移栽第 59 d 后, B 和 CON 处理的 AOB 丰度水平基本一致 [图 5(b)].



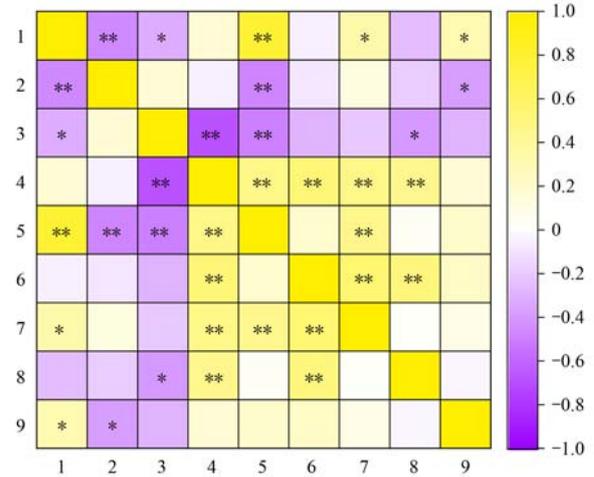
(a)、(b)、(c)、(d) 和 (e) 分别表示 AOA、AOB、*nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 基因的拷贝数, (f) 表示 $(nirK + nirS)/nosZ$ 的值
 图 5 不同处理下硝化和反硝化微生物的基因拷贝数变化

Fig. 5 Gene copies of nitrifying and denitrifying microorganisms under different treatments

生物炭处理对不同反硝化细菌丰度的影响不同,如图 5(d)所示,相比 CK,在辣椒移栽第 59 d 前,B 处理的 *nirK* 丰度与 CK 无明显差异. 59 d 后,B 处理的 *nirK* 丰度呈现先升后降的趋势. CON 处理的 *nirK* 丰度在 40 d 达到峰值后有缓慢下降的趋势. 除第 2 d 外,B 处理相比 CON 提高了不同时期的 *nirS* 基因丰度 [图 5(c)]. 生物炭添加降低了 *nosZ* 的平均基因丰度,在第二次追肥后,生物炭处理的 *nosZ* 基因的拷贝数要少于其他处理 [图 5(e)]. 各处理的 $(nirK + nirS)/nosZ$ 值总体呈现下降的趋势. 辣椒移栽初期,B 处理的 $(nirK + nirS)/nosZ$ 值低于 CON 处理,但在 40 d 时,B 处理的比值要显著高于 CON 处理,随后二者水平逐渐一致,无显著性差异 [$P > 0.05$,图 5(f)].

2.5 N_2O 排放与功能基因及土壤无机氮的关系

如图 6 所示, N_2O 的排放通量与 *nosZ* 基因丰度呈显著负相关关系 ($P < 0.05$),与 AOA 和 AOB 基因丰度呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$),与 NH_4^+-N 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$). NH_4^+-N 与 AOB 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$),与 *nirS* 和 $(nirK + nirS)/nosZ$ 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$). $NO_3^- -N$ 与 $(nirK + nirS)/nosZ$ 基因丰度呈显著负相关关系 ($P < 0.05$),与 AOB 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$).



1. NH_4^+-N , 2. $NO_3^- -N$, 3. N_2O 排放通量, 4. AOA-*amoA*, 5. AOB-*amoA*, 6. *nirK*, 7. *nirS*, 8. *nosZ*, 9. $(nirK + nirS)/nosZ$; * 表示显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$), 黄色表示正相关,紫色表示负相关

图 6 N_2O 排放与功能基因 (AOA、AOB、*nirK*、*nirS* 和 *nosZ*) 及土壤无机氮的相关性

Fig. 6 Pairwise correlations between N_2O emission and functional genes (AOA, AOB, *nirK*, *nirS*, and *nosZ*) and soil inorganic nitrogen

3 讨论

3.1 氮肥配施生物炭对辣椒产量和土壤矿质氮的影响

研究表明,在施用氮肥的基础上,添加生物炭

能够显著增加辣椒的产量 (18.0%)。有研究表明, 多次施氮显著增加了植株的生物量, 多次施肥的效果随着作物生长时间的延续而逐渐显现^[22]。有研究表明, 添加秸秆生物炭能够显著提高水稻土的有效磷含量, 对砂土的有效磷的提升效果要好于黏土和壤土^[23]。此外, 生物炭的多孔结构以及其含有大量营养物质, 可以改善土壤条件, 促进作物对养分 (氮和磷等) 的吸收和利用, 提高作物的产量^[24~26]。在本研究中, B 处理的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量在大部分时期都要高于 CON 处理, 生物炭提高了 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量, 生物炭的添加, 为微生物提供充足的底物, 增加了微生物的矿化作用, 进而增加了 NH_4^+ -N 的含量^[27], 促进了硝化过程; 此外, 根据“石灰效应”理论, 生物炭对酸性土壤硝化作用的影响更为强烈^[28,29], 结合辣椒不同时间段对硝态氮吸收的差异, 从而导致部分时间硝态氮含量升高^[30,31]。B 处理显著提高辣椒的产量 (图 1), 可能是生物炭促进辣椒对 NO_3^- -N 的吸收^[32], 这也是移栽初期 (第 1 d 和 9 d) B 处理的 NO_3^- -N 含量低于 CON 处理的原因。在 51 d 时, B 处理的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量要低于 CON 处理, 这是因为施肥后土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量迅速增加, 而生物炭能够吸附固定土壤中的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N^[33]。在此之后, 二者的 NH_4^+ -N 含量迅速下降, 且 B 处理的 NH_4^+ -N 要高于 CON 处理, B 处理的 NO_3^- -N 含量再次升高, 可能是生物炭促进硝化作用, 也可能是生物炭所吸附的氮素重新释放到土壤中^[34]。

3.2 生物炭对 N_2O 排放的影响

本研究表明, 施加生物炭能够显著减少 N_2O 的排放量, 且随着施肥次数的增加, 其减排效果依然高达 18.3%。在第一次追肥前, 生物炭限制了土壤中氮的可用性^[35], 从而减少土壤硝化菌和反硝化菌可用的无机氮库, 并最终减少农业土壤中的 N_2O 排放^[12]。在 59 d 后, B 处理的 N_2O 排放通量要高于 CON 处理, Lehmann 等^[36]研究认为, 施肥量的增加会削弱生物炭对 N 的固持效果, 更多的 N 源会增加 N_2O 的排放量。B 处理的 NO_3^- -N 含量比 CON 处理高也表明生物炭所吸附的氮素可能重新释放到土壤中供植物根系吸收利用, 潜在增加硝化过程 N_2O 产生风险^[37,38]。相关性分析表明 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 分别与 N_2O 的通量呈显著负相关 ($P < 0.05$) 和没有显著相关性, 因此, 推测本研究氮肥施用后, 无机氮不再是产生 N_2O 的限制性因素, 受生物炭影响的 N_2O 相关微生物可能在调节 N_2O 排放中发挥关键作用^[15]。

在辣椒的整个生长时期以及多次施肥的施肥管

理措施下, 生物炭对土壤 N_2O 排放相关的微生物过程产生动态影响, 特别是对反硝化基因 (*nirK*、*nirS* 和 *nosZ*) 的影响, 与 CON 处理相比, 在不同的生长时期, 生物炭产生的效应不同。施氮显著提高了辣椒移栽后土壤 AOB-*amoA* 基因丰度, 且 NH_4^+ -N 与 AOB 的基因丰度呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 施加生物炭增加其含量, 但对 AOA 的丰度无影响, 已经证实生物炭诱导的土壤 pH 值和其他物理化学性质的变化可以提高 AOA 和 AOB-*amoA* 基因的丰度, 生物炭的应用也可以提高土壤 C:N 值, 改善微生物活性, 进一步提高 AOB 的优势^[39,40]。Ji 等^[15]在研究氮肥及施加生物炭对中国东南地区的水稻土、沿海盐碱土和酸性红壤的 N_2O 排放的影响时发现生物炭改良后, 无论土壤类型如何, 生物炭的添加都显著提高 AOB-*amoA* 基因的丰度, AOB 数量的增加可能导致对土壤 N_2O 排放的刺激作用。但 AOA-*amoA* 和 AOB-*amoA* 基因与 N_2O 排放呈极显著负相关 ($P < 0.01$, 图 6), 可以推测, 反硝化作用可能是主导本研究中 N_2O 的产生途径。Duan 等^[41]研究也表明, 反硝化过程在酸性菜地土壤 N_2O 排放过程中占有主导地位。

NO_2^- 还原酶 (由 *nirS* 或 *nirK* 基因编码) 和 N_2O 还原酶 (*nosZ*) 可部分决定 N_2O 净产量水平^[42]。在第 0~23 d, B 处理的 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 的值要低于 CON 处理, 这是本研究中生物炭减少 N_2O 排放的主要原因。有研究表明, 在作物生长前期, 生物炭可以通过降低反硝化的 N_2O 产量来减少反硝化产生的 N_2O 排放量^[43]。然而, 在 40 d 时, B 处理的 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 值显著高于 CON 处理, 此时 B 处理的 N_2O 排放通量却小于 CON 处理, 可能是微生物对 N_2O 产生的响应具有一定的滞后效应^[44,45]。在 59 d 和 68 d 时, B 处理和 CON 处理的 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 值没有显著差异, B 处理和 CON 处理的 N_2O 排放通量差异逐渐减小。大量研究表明, N_2O 通量和 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 具有相关性^[17,46,47], 但本研究的相关性分析没有观察到这样的关系, 可能跟微生物的动态变化, 以及上述的一定滞后效应有关。因此, 本研究的结果表明, 在辣椒种植的多次施肥过程中, 动态监测相关的微生物变化, 能够更好地解析 N_2O 排放的机制。

4 结论

(1) 生物炭提高了辣椒产量 (18.0%); 随着氮肥施用次数增加, 生物炭处理的减排效果减弱, 甚至促进 N_2O 的排放, 但在辣椒的生长周期中, 生物炭能够显著减少 N_2O 的排放量 (18.3%)。因此, 在农

业生产中,添加 2% 生物炭能够达到减排增产的效果。

(2) 反硝化作用是本研究中 N_2O 的主要产生途径。在辣椒生长初期,生物炭通过减小 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 值显著降低 N_2O 的排放;随着作物的生长和氮肥施用次数的增多,生物炭处理的 (*nirK* + *nirS*)/*nosZ* 值高于其他处理,进而导致辣椒生长后期生物炭处理的 N_2O 通量高于常规施氮处理。

参考文献:

- [1] 赵光昕,刘杏认,张晴雯,等. 施用生物炭对农田土壤 N_2O 的减排效应[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(12): 2872-2880.
Zhao G X, Liu X R, Zhang Q W, *et al.* Effect of biochar on N_2O emissions from agricultural soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(12): 2872-2880.
- [2] Hu M P, Chen D J, Dahlgren R A. Modeling nitrous oxide emission from rivers: a global assessment[J]. Global Change Biology, 2016, **22**(11): 3566-3582.
- [3] Luo Z B, Lam S K, Fu H, *et al.* Temporal and spatial evolution of nitrous oxide emissions in China: assessment, strategy and recommendation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **223**: 360-367.
- [4] 王紫君,王鸿浩,李金秋,等. 椰糠生物炭对热区双季稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3931-3942.
Wang Z J, Wang H H, Li J Q, *et al.* Effects of coconut chaff biochar amendment on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in hot areas[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3931-3942.
- [5] 耿建梅,蒋红香,刘艳艳. 海南稻菜轮作休闲期适宜填闲作物初筛[J]. 土壤通报, 2019, **50**(1): 76-80.
Geng J M, Jiang H X, Liu Y Y. Selecting for suitable catch crop during the fallow period of rice-vegetable rotation in Hainan[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(1): 76-80.
- [6] 吉清妹,张文,王敏,等. 海南东北部地区蔬菜施肥现状与土壤养分状况[J]. 广东农业科学, 2011, **38**(22): 61-63.
- [7] Lin Y X, Ding W X, Liu D Y, *et al.* Wheat straw-derived biochar amendment stimulated N_2O emissions from rice paddy soils by regulating the *amoA* genes of ammonia-oxidizing bacteria[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, **113**: 89-98.
- [8] Smith P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies[J]. Global Change Biology, 2016, **22**(3): 1315-1324.
- [9] Rittl T F, Oliveira D M S, Camisares L P, *et al.* High application rates of biochar to mitigate N_2O emissions from a N-fertilized tropical soil under warming conditions[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, **8**, doi: 10.3389/fenvs.2020.611873.
- [10] 符佩娇,吉恒宽,何秋香,等. 氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4538-4547.
Fu P J, Ji H K, He Q X, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application times and nitrification inhibitor on N_2O emission from potted maize[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4538-4547.
- [11] Wu D, Raafat A, Pak E, *et al.* Dicer-microRNA pathway is critical for peripheral nerve regeneration and functional recovery in vivo and regenerative axonogenesis in vitro[J]. Experimental Neurology, 2012, **233**(1): 555-565.
- [12] He Y H, Zhou X H, Jiang L L, *et al.* Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: a meta-analysis[J]. GCB Bioenergy, 2017, **9**(4): 743-755.
- [13] Aamer M, Shaaban M, Hassan M U, *et al.* Biochar mitigates the N_2O emissions from acidic soil by increasing the *nosZ* and *nirK* gene abundance and soil pH[J]. Journal of Environmental Management, 2020, **255**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109891.
- [14] Zhang Q Q, Wu Z, Zhang X, *et al.* Biochar amendment mitigated N_2O emissions from paddy field during the wheat growing season[J]. Environmental Pollution, 2021, **281**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117026.
- [15] Ji C, Li S Q, Geng Y J, *et al.* Differential responses of soil N_2O to biochar depend on the predominant microbial pathway[J]. Applied Soil Ecology, 2020, **145**, doi: 10.1016/j.apsoil.2019.08.010.
- [16] 陈晨,许欣,毕智超,等. 生物炭和有机肥对菜地土壤 N_2O 排放及硝化、反硝化微生物功能基因丰度的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(5): 1912-1920.
Chen C, Xu X, Bi Z C, *et al.* Effects of biochar and organic manure on N_2O emissions and the functional gene abundance of nitrification and denitrification microbes under intensive vegetable production[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(5): 1912-1920.
- [17] Liu X R, Ren J Q, Zhang Q W, *et al.* Long-term effects of biochar addition and straw return on N_2O fluxes and the related functional gene abundances under wheat-maize rotation system in the North China Plain[J]. Applied Soil Ecology, 2019, **135**: 44-55.
- [18] 胡玉麟,汤水荣,陶凯,等. 优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5182-5190.
Hu Y L, Tang S R, Tao K, *et al.* Effects of optimizing fertilization on N_2O and CH_4 emissions in a paddy-cowpea rotation system in the tropical region of China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5182-5190.
- [19] Edwards J D, Pittelkow C M, Kent A D, *et al.* Dynamic biochar effects on soil nitrous oxide emissions and underlying microbial processes during the maize growing season[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, **122**: 81-90.
- [20] Duan P P, Zhang Q Q, Zhang X, *et al.* Mechanisms of mitigating nitrous oxide emissions from vegetable soil varied with manure, biochar and nitrification inhibitors[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, **278**, doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107672.
- [21] Qin H L, Wang D, Xing X Y, *et al.* A few key *nirK*- and *nosZ*-denitrifier taxa play a dominant role in moisture-enhanced N_2O emissions in acidic paddy soil[J]. Geoderma, 2021, **385**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114917.
- [22] 石伟琦,孙光明,陆新华,等. 分次施氮对菠萝产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(6): 1524-1529.
- [23] Shi W Q, Sun G M, Lu X H, *et al.* Effects of split application of nitrogen on yield and quality of pineapple[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, **18**(6): 1524-1529.
- [23] 宋文涛,田纪辉,董宇豪,等. 秸秆生物炭对水稻土和赤红壤磷素有效性及化学形态的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28**(6): 1422-1429.
- [23] Song W T, Tian J H, Dong Y H, *et al.* Effects of straw biochar amendment on the availability and fractions of phosphorus in

- paddy soil and lateritic red soil[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, **28**(6): 1422-1429.
- [24] Liang B Q, Lehmann J, Sohi S P, *et al.* Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(2): 206-213.
- [25] 王萌萌, 周启星. 生物炭的土壤环境效应及其机制研究[J]. *环境化学*, 2013, **32**(5): 768-780.
Wang M M, Zhou Q X. Environmental effects and their mechanisms of biochar applied to soils [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(5): 768-780.
- [26] Liu Y, Li H D, Hu T S, *et al.* A quantitative review of the effects of biochar application on rice yield and nitrogen use efficiency in paddy fields; a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **830**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154792.
- [27] 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(3): 509-517.
Shang J, Geng Z C, Chen X X, *et al.* Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(3): 509-517.
- [28] Nelissen V, Rütting T, Huygens D, *et al.* Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **55**: 20-27.
- [29] Ball P N, Mackenzie M D, Deluca T H, *et al.* Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry montane forest soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39**(4): 1243-1253.
- [30] 王翰琨, 吴永波, 刘俊萍, 等. 生物炭对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, **38**(6): 689-701.
Wang H K, Wu Y B, Liu J P, *et al.* A review of research advances in the effects of biochar on soil nitrogen cycling and its functional microorganisms [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, **38**(6): 689-701.
- [31] 刘丽君, 朱启林, 李凯凯, 等. 添加生物炭对海南燥红壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(9): 2049-2056.
Liu L J, Zhu Q L, Li K K, *et al.* Effects of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions in Hainan dry red soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(9): 2049-2056.
- [32] Nguyen T T N, Xu C Y, Tahmasbian I, *et al.* Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen; a review and meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2017, **288**: 79-96.
- [33] 刘国子, 杨凤根, 许斌. 生物炭对土壤氮素淋失影响的研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2020, **18**(4): 139-149.
Liu G Z, Yang F G, Xu B. Advances in research on effects of biochar on soil nitrogen leaching[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, **18**(4): 139-149.
- [34] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, **29**(1): 68-79.
Wu Y, Xu G, Lü Y C, *et al.* Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, **29**(1): 68-79.
- [35] Cayuela M L, Van Zwieten L, Singh B P, *et al.* Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions; a review and meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **191**: 5-16.
- [36] Lehmann J, da Silva J P Jr, Steiner C, *et al.* Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the central Amazon basin; fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, **249**(2): 343-357.
- [37] 朱云飞, 张琪, 黄一伦, 等. 生物炭与硝化抑制剂联合施用对热带菜地土壤硝化过程及 N_2O 排放的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, **42**(10): 3042-3048.
Zhu Y F, Zhang Q, Huang Y L, *et al.* Effects of co-application of biochar and nitrification inhibitor on soil nitrification and N_2O emissions in tropical vegetable soil [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, **42**(10): 3042-3048.
- [38] Laird D, Fleming P, Wang B Q, *et al.* Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, **158**(3-4): 436-442.
- [39] Muñoz C, Ginebra M, Zagal E. Variation of greenhouse gases fluxes and soil properties with addition of biochar from farm-wastes in volcanic and non-volcanic soils [J]. *Sustainability*, 2019, **11**(7), doi: 10.3390/su11071831.
- [40] Song Y J, Zhang X L, Ma B, *et al.* Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, **50**(2): 321-332.
- [41] Duan P P, Song Y F, Li S S, *et al.* Responses of N_2O production pathways and related functional microbes to temperature across greenhouse vegetable field soils [J]. *Geoderma*, 2019, **355**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113904.
- [42] Ji C, Li S Q, Geng Y J, *et al.* Decreased N_2O and NO emissions associated with stimulated denitrification following biochar amendment in subtropical tea plantations[J]. *Geoderma*, 2020, **365**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114223.
- [43] Harter J, Weigold P, El-Hadidi M, *et al.* Soil biochar amendment shapes the composition of N_2O -reducing microbial communities[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **562**: 379-390.
- [44] 陈虎, 王莹, 吕永康. 污水微生物脱氮过程中 N_2O 产生机理及影响因素研究进展[J]. *化工进展*, 2016, **35**(12): 4020-4025.
Chen H, Wang Y, Lü Y K, *et al.* Progress on mechanisms and influence factors of N_2O production in microbial nitrogen removal process from wastewater[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, **35**(12): 4020-4025.
- [45] 虞璐. 生物质炭对酸化土壤的改良效应及其对土壤硝化作用的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Yu L. The effect of biochar on acidic soil amelioration and soil nitrification[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [46] Geng Y J, Yuan Y M, Miao Y C, *et al.* Decreased nitrous oxide emissions associated with functional microbial genes under bio-organic fertilizer application in vegetable fields[J]. *Pedosphere*, 2021, **31**(2): 279-288.
- [47] 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 等. 生物炭对华北农田土壤 N_2O 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.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)