

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11
第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征 沈吉, 曹念文(4743)

2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征 宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)

武汉市PM_{2.5}化学组分时空分布及聚类分析 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)

郑州市某生活区大气PM_{2.5}中重金属污染特征及生态、健康风险评估 何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)

厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析 王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)

2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征 霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)

太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析 闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)

东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析 陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枫亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)

艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素 陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)

中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素 侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)

石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析 杨阳, 李杏茹, 刘水桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)

郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估 张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)

典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用 鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)

2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征 侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)

焦化厂建筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险 赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)

中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价 杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)

岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素 原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)

长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送 吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)

望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价 徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)

不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响 陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 笪文怡, 黄亚文(4924)

合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价 陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)

三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征 杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)

丹江口水库氮磷内源释放对比 王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)

不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性 李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王瑀(4962)

纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响 王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)

水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能 刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)

MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性 王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)

微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响 王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)

基于铁锰泥的除砷颗粒吸附剂制备及其比较 曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)

氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B 张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)

天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估 陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)

废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征 姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)

全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行 印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)

FeCl₃-生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀 魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)

污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响 李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)

厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征 宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)

基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响 陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文焯, 倪敏(5066)

太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)

土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例 王锐, 张凤雷, 徐姝姝, 张永文(5082)

半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)

土壤调理剂对镉污染稻田修复效果 周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)

改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复 韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)

铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应 梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)

温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤 徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)

重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应 王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)

双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响 郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)

不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响 崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)

黄土高原地区两种土地利用方式CO₂和N₂O排放特征 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)

生物质炭对华北平原4种典型土壤N₂O排放的影响 张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)

优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N₂O和CH₄排放的影响 胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)

《环境科学》征订启事(4995) 《环境科学》征稿简则(5039) 信息(4782, 4979, 5056)

生物质炭对华北平原 4 种典型土壤 N₂O 排放的影响

张秀玲¹, 孙贇¹, 张水清^{1,2}, 岳克², 曹红亮³, 林杉^{1*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070; 2. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 3. 华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 生物质炭作为一种新型的土壤改良剂, 在降低土壤温室气体排放方面发挥着重要作用. 为明确生物质炭对冬小麦苗期土壤 N₂O 排放的影响, 以华北平原的 4 种典型土壤(水稻土、砂姜黑土、褐土和潮土)为研究对象, 进行田间试验, 设置了 4 个处理: 对照(CK)、单施化肥(NPK)、单施生物质炭(BC)和化肥与生物质炭配施(NPK + BC). 结果表明, 单施化肥显著增加了 4 种土壤 N₂O 排放, 与对照相比, 水稻土、砂姜黑土、褐土和潮土 N₂O 排放分别增加了 314%、116%、240% 和 282%. 添加生物质炭对华北平原 4 种土壤 N₂O 排放影响存在差异, 与 CK 相比, 单施生物质炭水稻土、褐土 N₂O 排放显著增加了 72.4% 和 50.9%, 而砂姜黑土和潮土 BC 与 CK 处理无显著差异. 与 NPK 相比, 生物质炭与化肥配施显著降低了 4 种土壤 N₂O 排放. 添加生物质炭提高了 4 种土壤 pH, 其中, 初始 pH 最低的水稻土, 受生物质炭影响较显著, 施肥则降低了 4 种土壤 pH. 砂姜黑土、褐土和潮土施肥处理 N₂O 排放通量均与铵态氮含量呈显著正相关, 水稻土和砂姜黑土单施生物质炭处理 N₂O 排放通量与硝态氮含量呈显著正相关.

关键词: N₂O 排放; 生物质炭; 土壤矿质氮; pH; 华北平原

中图分类号: X144; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-5173-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201904272

Effects of Biochar on N₂O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain

ZHANG Xiu-ling¹, SUN Yun¹, ZHANG Shui-qing^{1,2}, YUE Ke², CAO Hong-liang³, LIN Shan^{1*}

(1. Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, College of Recourses and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: As a potential soil conditioner, biochar plays an important role in alleviating greenhouse gas (GHG) emissions. To clarify the influence of biochar on soil N₂O emissions during the winter wheat seedling stage, four typical soils in the North China Plain (paddy soil, shajiang black soil, cinnamon soil, and fluvo-aquic soil) were adopted for field experiments, and four treatments were set: Control (CK), Fertilizer (NPK), Biochar (BC), and Fertilizer + Biochar (NPK + BC). The results showed that fertilization (NPK) significantly increased the N₂O emissions of the four soils. Compared with that of the CK, the N₂O emissions of four soils were increased by 314%, 116%, 240%, and 282%, respectively. The effect of biochar addition on N₂O emissions of the four soils in the North China Plain was different. Compared with that of the CK treatment, the N₂O emissions of paddy soil and cinnamon soil in the BC treatment significantly increased by 72.4% and 50.9%, respectively, whereas the shajiang black soil and fluvo-aquic soil exhibited no significant differences. The combined application of biochar and fertilizer significantly reduced the N₂O emissions of the four soils, compared to that of NPK. The addition of biochar increased the pH of soil. In particular, paddy soil had the lowest initial pH and was most affected by biochar. Fertilization reduced the pH of the four soils. N₂O flux under fertilizer treatment for the shajiang black soil, cinnamon soil, and fluvo-aquic soil was significantly positively correlated with ammonium nitrogen content, whereas N₂O emission fluxes under single biochar treatment on paddy soil and shajiang black soil were significantly positively correlation with nitrate nitrogen content.

Key words: N₂O emissions; biochar; soil mineral nitrogen; pH; North China Plain

近年来, 由温室气体排放引起的全球变暖已引起国内外学者的广泛关注, 而氧化亚氮(N₂O)作为主要的贡献者之一, 其增温潜势是 CO₂ 的 298 倍^[1], 且还参与了破坏臭氧层, 危害人类健康. 据估计, 全球每年大约 70% 的 N₂O 排放来自于土壤, 其中农田土壤是 N₂O 的主要排放源^[2]. 华北平原作为我国粮食的重要产区, 其冬小麦产量大约占全国产量的 61%^[3,4], 但近年来, 由于化肥的不合理使

用造成了土壤 N₂O 的高排放^[5]. 因此, 改善土壤的理化性质, 降低土壤温室气体排放是当前人们关注的主要问题.

生物质炭是生物质在厌氧或无氧的密闭环境中

收稿日期: 2019-04-30; 修订日期: 2019-05-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301103); 湖北省自然科学基金项目(2017CFB159)

作者简介: 张秀玲(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农田温室气体排放, E-mail: 781730609@qq.com

* 通信作者, E-mail: linsan@mail.hzau.edu.cn

经高温热解 (<700℃) 生成的高度芳香化的固态物质^[6], 它具有 C/N 高、比表面积大、稳定性高和吸附性强等特性, 能够提高土壤 pH 值和养分有效性^[7], 在土壤改良^[8,9] 和抑制土壤氮磷流失^[10] 等方面发挥着重要作用. 施用生物质炭的改良措施已被认为是一种潜在的减少 N₂O 排放的方式^[11]. 且有研究发现生物质炭与氮肥配合施用, 显著降低了土壤 N₂O 排放^[12,13].

关于生物质炭对土壤 N₂O 排放的影响还存在争议. Wu 等^[14] 研究了两种生物质炭添加对酸性土和碱性土 N₂O 排放的影响, 得出用玉米棒为原料制成的生物质炭对碱性土壤 N₂O 排放无显著影响, 但降低了酸性土壤 N₂O 排放; 以橄榄果肉为原料制成的生物质炭显著降低了两种土壤 N₂O 的排放. 罗晓琦^[6] 通过 Meta 分析结果表明了添加生物质炭显著降低华南、华东、华中和东北地区土壤 N₂O 排放, 而对西北地区 N₂O 排放影响不显著. Liu 等^[15] 采用了 3 种生物质炭对中国南方稻田土壤进行了改良, 发现生物质炭降低了土壤 N₂O 排放 0~60.9%. 但也有一些研究发现添加生物质炭会通过增加氨氧化细菌的氨单加氧酶基因 (*amoA*) 丰度促进稻田土壤 N₂O 排放^[16,17]. 生物质炭对 N₂O 排放的影响取决于土壤质地、pH、土壤含水量、生物质炭的种类和施用量^[18,19] 等多种因素. 目前有不少关于生物质炭施用对降低土壤温室气体排放方面的研究报道, 但针

对生物质炭对华北平原不同土壤类型 N₂O 排放的影响还较少. 因此, 本文以华北平原 4 种典型土壤为研究对象, 探讨生物质炭添加对土壤理化性质和 N₂O 排放的影响, 通过进一步优化生物质炭在该地区农业生产中的应用, 以期缓解温室气体排放提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于河南省平原新区河南现代农业研究基地 (35°0'N, 113°43'E), 属北温带大陆性季风气候, 4 季分明, 雨热同期, 降水集中在夏季, 全年平均气温 15.6℃, 年平均降雨量 542.15 mm, 无霜期 209 d. 全年日照时间约 1 869.7 h.

1.2 试验材料

选取华北平原 4 种 pH 值不同的土壤, 分别为: 水稻土、砂姜黑土、褐土和潮土. 潮土是试验点原土壤, 经过 5 a 匀地种植, 另外 3 种土壤则是从异地搬运到试验点混合均匀后放置试验小区. 试验之前水稻土耕作模式为稻麦轮作, 砂姜黑土、褐土和潮土均为小麦-玉米轮作. 4 种土壤基本理化性质见表 1. 供试生物质炭为河南 3 利新能源公司生产, 采用花生壳在 500℃ 高温厌氧条件下热解 4 h 制得, 其中有机碳含量 647.16 g·kg⁻¹, 碳氮比为 42.52, pH 为 9.16.

表 1 试验土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the soils in experimental field

土壤类型	采集地	pH	全氮 /g·kg ⁻¹	容重 /g·cm ⁻³	有机碳 /g·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	机械组成/%		
								砂粒	粉粒	黏粒
水稻土	河南潢川县	5.82	0.71	1.40	13.55	4.86	144.41	1.7	64.2	34.1
砂姜黑土	河南西平县	6.64	1.42	1.13	18.87	38.94	131.10	21.6	40.3	38.1
褐土	河南长葛市	7.12	0.51	1.31	12.36	9.03	104.48	20.7	53.8	25.5
潮土	河南原阳县	8.14	0.44	1.18	10.69	4.41	91.16	51.2	29.1	19.6

1.3 试验设计

将水稻土、砂姜黑土、褐土和潮土收集到同一个试验地点, 在相同的自然环境条件下进行试验. 试验小区为 1 m², 用 1 m 深的水泥板隔开, 去除表面 30 cm 土层填放水稻土、砂姜黑土和褐土这 3 种土壤, 小区采用随机区组排列. 试验设置 4 个处理: 不施肥 (CK)、施用化肥 (NPK)、施用生物质炭 (BC) 和化肥配施生物质炭 (NPK + BC), 每个处理 3 次重复. 生物质炭施用量 2.25 kg·m⁻², 化肥采用尿素、过磷酸钙和氯化钾, 施用量: 纯 N 165 kg·hm⁻², P₂O₅ 82.5 kg·hm⁻², K₂O 82.5 kg·hm⁻², 磷钾肥全部基施.

2017 年 10 月 16 日播种小麦, 播量约为 150 kg·hm⁻², 行距 23 cm, 当日对土壤进行翻耕施入基肥, 深度为 5 cm, 尿素加水溶解后灌溉, 灌水量为 12 mm. 施肥后第 1、3、5、9、13、18、25、35、43、56 和 93 d 采集不同处理的土壤 N₂O 气体, 同时采集土壤样品, 测定土壤矿质氮含量, 并测定第 1、5、25、43、56 和 93 d 的土壤 pH. 采样时间为上午 9:00, 以此时的通量代表采样日的日均通量^[20], 并记录此时气温, 同时采集土壤表层 (0~20 cm) 土样, 混合均匀后, 带回实验室, 测定土壤含水量, 然后去除样品中的杂物放于 4℃ 下保存, 用于测定土壤矿质氮含量. 降雨量资料使用试验地内的气象站

数据.

1.4 试验方法

采用静态箱-气相色谱法^[21]测定土壤中N₂O排放, 试验开始前将不锈钢底座打入土壤中, 底座凹槽与地面持平, 采样时将配套的静态箱(40 cm × 40 cm × 40 cm)体放入凹槽, 并在凹槽中加水做气密性处理, 箱体采气口用橡胶管连接三通阀, 在扣箱后半小时内用注射器抽取 60 mL 气体密封保存. 采集后的气体样品用改进的气相色谱仪(Agilent 7890A)分析, N₂O浓度用电子捕获检测器(ECD)测定, 检测器温度为 300℃, 色谱柱为 80/100 目 Porapak Q 填充柱, 柱箱温度为 55℃, 用高纯 N₂ 作为载气, 流速为 25 cm³·min⁻¹. 通过标准气体和待测气体的峰面积比值来计算出样品的浓度, 标准气体由国家标准物质中心提供.

土壤矿质氮含量用浓度为 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液提取, 过滤, 用德国 Seal Analytical AA3 流动分析仪测定. 土壤 pH 采用电位法测定, 土壤水土质量比 2.5:1, 生物质炭为 10:1. 土壤全氮(TN)采用微量凯氏法测定. 土壤有机碳(TOC)测定采用土壤有机碳用总有机碳分析仪(Elementer, 德国)固体模块进行测定. 土壤机械组成采用比重计法测定. 土壤容重采用环刀法测定.

1.5 数据统计与分析

N₂O排放通量(F)按照下列公式^[22]计算:

$$F = \rho \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{273}{T} \quad (1)$$

式中, F 为气体排放通量 [以 N₂O-N 计, $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], ρ 为标准状态下 N₂O-N 的密度为 1.258 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); $\Delta c/\Delta t$ 为单位时间内采样箱内气体浓度增加量, N₂O浓度单位为 $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$; V 和 A 分别为采样箱的体积(m^3)与底面积(m^2), T 为绝对温度(K).

N₂O累积排放量通过相邻 2 次采样的气体平均排放通量与排放时间的乘积累加计算得出, 计算公式如下:

$$M = \sum \frac{(F_{i+1} + F_i)}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 10^{-5} \quad (2)$$

式中, M 代表土壤 N₂O 累积排放量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); F 代表土壤 N₂O 排放通量 [$\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; i 代表采样次数; t 代表试验天数 d.

采用 Execl 2010 对数据进行预处理, 利用 SPSS 22 进行方差分析(ANOVA)、多重比较和数据间的相关性分析, 显著性水平设置为 0.05. 用 Origin 9.0 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 降雨量与气温

在小麦播种前期温度和降雨量相对较高, 施肥播种一周后降雨基本停止, 持续干旱一段时间, 到 1 月初冬季有少量的降雪, 温度下降至 0℃ 以下, 在 2018 年 1 月 12 日温度开始回升, 降水减少. 该区域在冬小麦苗期平均降雨量为 1.23 mm, 平均气温为 7.51℃, 整体表现为低温少雨(图 1).

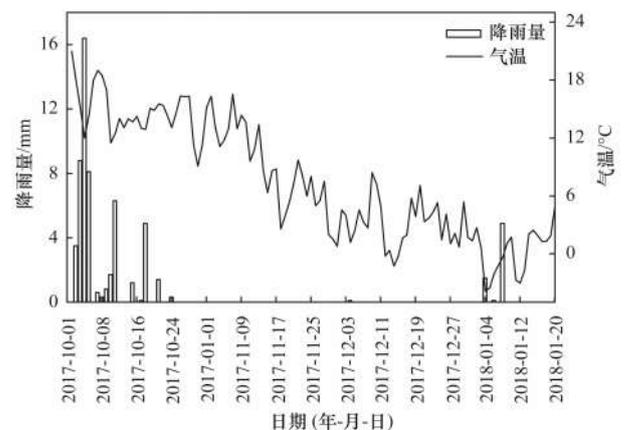


图 1 试验期间的降水量与气温变化

Fig. 1 Changes in precipitation and air temperature during the experimental period

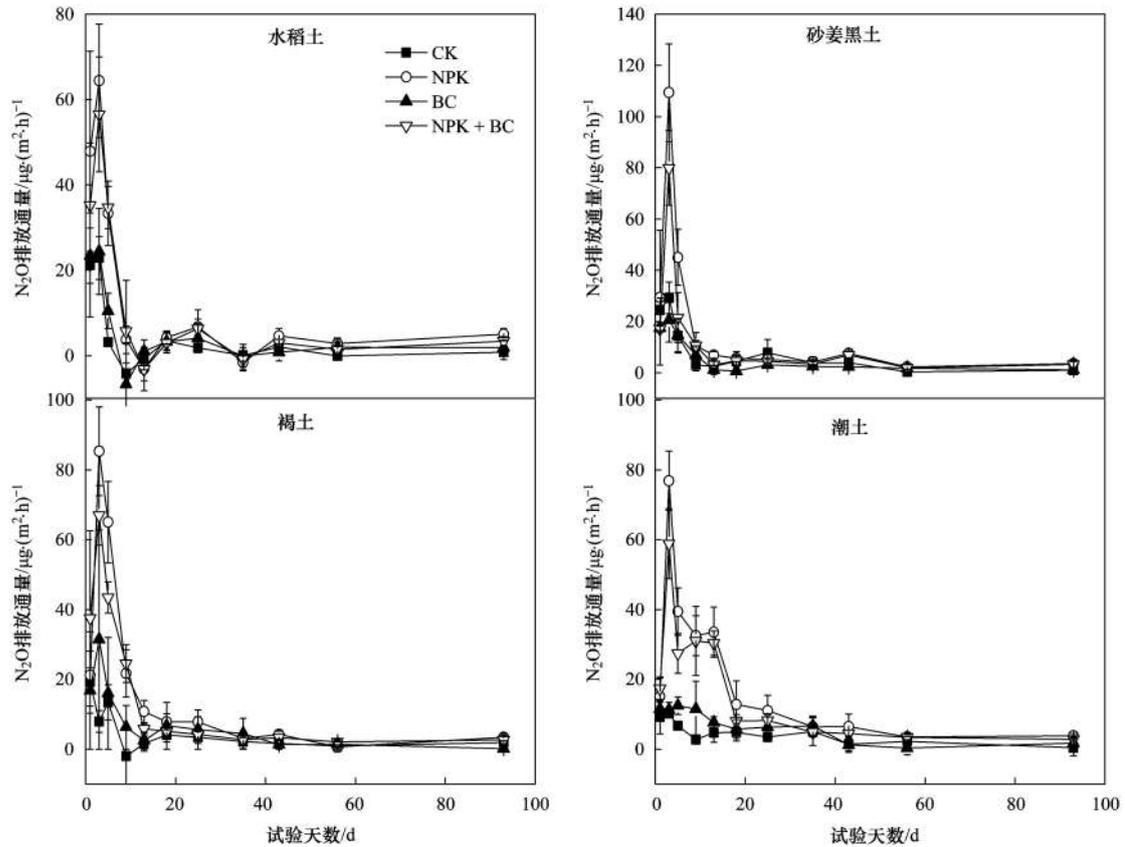
2.2 土壤 N₂O 排放

2.2.1 土壤 N₂O 排放通量

如图 2 所示, 水稻土、砂姜黑土和褐土这 3 种土壤 NPK 和 NPK + BC 处理 N₂O 排放通量随采样时间变化趋势基本一致, 均呈现先升高后迅速降低再保持平稳的趋势. 潮土的 NPK 和 NPK + BC 处理 N₂O 排放通量达到最大值后下降较平缓, 且在施肥后第 3 ~ 13 d 排放通量维持在 30 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 左右, 高于其他 3 种土壤. 与对照相比, 施肥显著 ($P < 0.05$) 增加了 N₂O 排放, 在施肥处理中, 4 种土壤 N₂O 排放通量均在施肥后第 3 d 达到最大值, 且均为 NPK 处理 N₂O 排放通量高于 NPK + BC 处理, 其中, 砂姜黑土 NPK 处理 N₂O 排放通量最高为 109.33 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 水稻土 NPK + BC 处理 N₂O 排放最低为 56.52 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 在未施肥处理中, 除褐土 BC 处理 N₂O 排放通量在第 13 d 之前高于 CK 处理之外, 其他 3 种土壤 CK 和 BC 处理 N₂O 排放通量无显著差异.

2.2.2 土壤 N₂O 累积排放量

整个试验观测期间土壤 N₂O 累积排放量如表 2, 在未施肥处理中, 添加生物质炭显著 ($P < 0.05$) 增加了水稻土和褐土的 N₂O 累积排放量, 与 CK 相比, 水稻土和褐土 BC 处理 N₂O 累积排放量分别增加了

图2 不同土壤N₂O通量的动态变化Fig. 2 Dynamics of N₂O fluxes from the four treatments for the different soils

72.4% 和 50.9%，但生物质炭添加对砂姜黑土和潮土N₂O累积排放量影响不显著。在施肥处理中，添加生物质炭显著($P < 0.05$)降低了4种土壤N₂O累积排放量，且4种土壤NPK + BC处理间N₂O累积排放量差异显著($P < 0.05$)。4种土壤均是NPK处理土壤N₂O累积排放量最高，表明施肥显著增加了N₂O累积排放($P < 0.05$)。与NPK相比，NPK + BC

显著降低了4种土壤N₂O排放，分别降低了18.6%、26.4%、14.4%和18.5%。从表3可以看出，生物质炭和施肥的交互作用对水稻土、褐土和潮土N₂O排放影响显著($P < 0.05$)。在整个观测期间，潮土NPK处理N₂O累积排放量最高为0.248 kg·hm⁻²，水稻土CK处理累积排放量最低为0.035 kg·hm⁻²。

表2 4种土壤不同处理间的N₂O累积排放量¹⁾/kg·hm⁻²Table 2 Cumulative N₂O emissions among different treatments for the four soils/kg·hm⁻²

土壤类型	CK	NPK	BC	NPK + BC
水稻土	0.035 ± 0.012 Dc	0.145 ± 0.012 Ac	0.060 ± 0.016 Ca	0.118 ± 0.005 Bd
砂姜黑土	0.089 ± 0.022 Ca	0.193 ± 0.028 Ab	0.071 ± 0.012 Ca	0.142 ± 0.017 Bc
褐土	0.057 ± 0.003 Dbc	0.194 ± 0.022 Ab	0.086 ± 0.016 Ca	0.166 ± 0.006 Bb
潮土	0.065 ± 0.012 Cab	0.248 ± 0.011 Aa	0.087 ± 0.022 Ca	0.202 ± 0.012 Ba

1) 不同大写字母表示不同处理间差异达显著水平，小写字母表示不同土壤间的差异显著水平($P < 0.05$)

表3 生物质炭和化肥交互作用对N₂O累积排放的影响Table 3 Influence of interaction between biochar and fertilizer on cumulative N₂O emission

土壤类型	生物质炭		NPK肥		生物质炭 + NPK肥	
	F	P	F	P	F	P
水稻土	0.034	0.858	155.030	<0.001	15.302	<0.01
砂姜黑土	8.567	<0.05	54.371	<0.001	1.980	0.197
褐土	0.002	0.968	177.884	<0.001	12.319	<0.01
潮土	2.317	0.166	311.625	<0.001	16.422	<0.01

2.3 土壤 pH

如图 3, 4 种土壤中, 添加生物质炭的两个处理(BC 和 NPK + BC)土壤 pH 均高于不加生物质炭的处理, 表明添加生物质炭提高了 4 种土壤 pH(图 3), 其中, 水稻土初始 pH 最低, 生物质炭对其影响较显著, 在观测期第 1 d, BC 处理

pH 值相较于 CK 处理增加了一个单位. 施肥同样影响土壤 pH, 在整个试验期间, 4 种土壤的 CK 和 BC 处理土壤 pH 值随时间变化不大, 而施肥处理土壤 pH 出现缓慢下降, 观测结束时, 4 种土壤 NPK 和 NPK + BC 处理土壤 pH 均低于观测期第 1 d 土壤 pH.

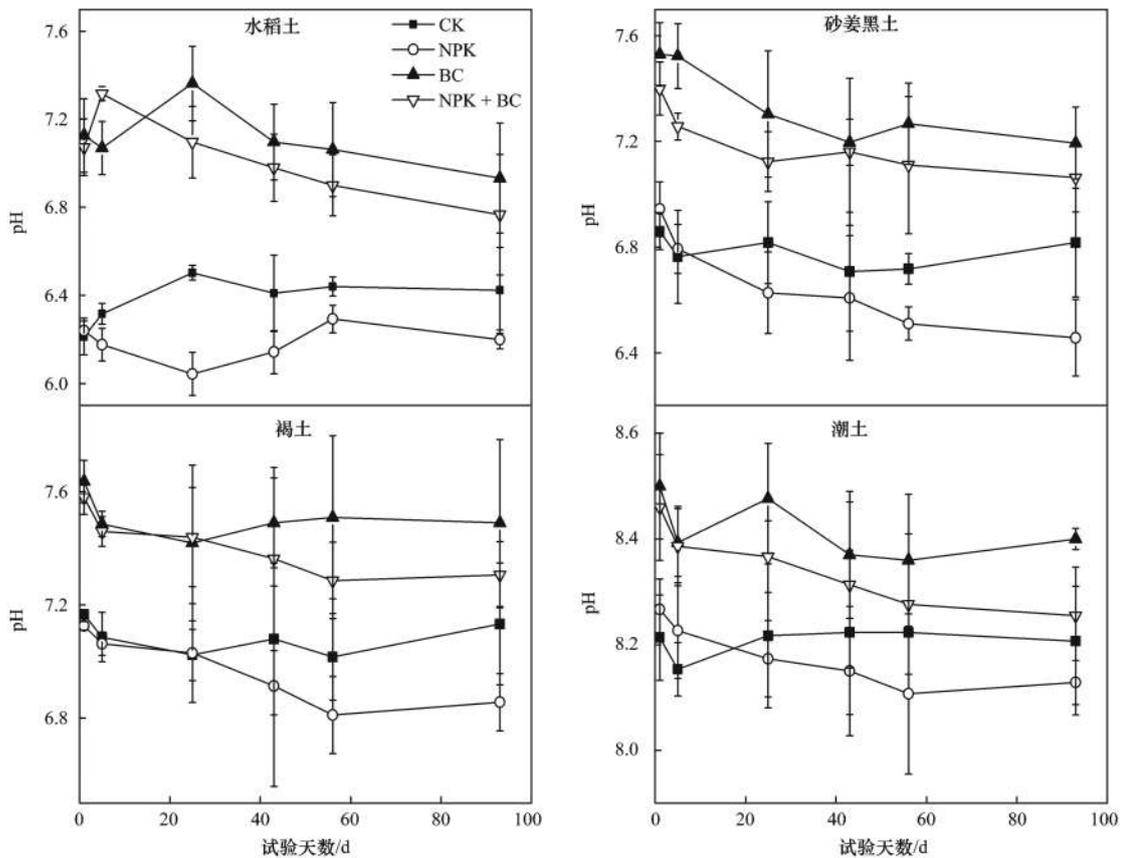


图 3 不同处理土壤 pH 动态变化

Fig. 3 Temporal dynamics of soil pH values in different treatments

2.4 土壤矿质氮含量的变化

本试验期间, 4 种土壤铵态氮含量整体变化趋势相似(图 4), 外加氮源影响了土壤铵态氮含量的变化, 施肥处理铵态氮含量在第 13 d 之前均高于未施肥处理, CK 和 BC 处理 NH₄⁺-N 含量总体保持较低的水平, 波动较小. 水稻土的 NPK 和 NPK + BC 处理土壤铵态氮含量在第 9 d 达到最大值, 而砂姜黑土、褐土和潮土在第 5 d 达到最大值, 与 NPK 处理相比, 4 种土壤生物质炭与化肥混施均降低了铵态氮含量最大值, 分别降低了 19.4%、18.6%、14.2% 和 23.9%. 从施肥后第 18 d, 土壤铵态氮含量处于较低水平, 除了水稻土和砂姜黑土铵态氮含量有小幅波动之外, 褐土和潮土铵态氮含量在 5 ~ 10 mg·kg⁻¹ 之间基本保持稳定.

土壤硝态氮含量的变化如图 5 所示, 在观测期第 1 d 水稻土各处理硝态氮含量高于其他 3 种土

壤, 随着试验进行水稻土 CK 和 BC 处理土壤硝态氮含量下降到 5 mg·kg⁻¹ 左右后基本达到平稳状态. 砂姜黑土、褐土和潮土这 3 种土壤其初始硝态氮含量较低, CK 和 BC 处理土壤硝态氮含量一直维持在较低水平. 与 CK 相比, 在前期施肥处理增加了 4 种土壤硝态氮含量. 砂姜黑土、褐土和潮土的 NPK 和 NPK + BC 处理土壤硝态氮含量总体呈现先上升后下降的趋势, 而水稻土由于初始硝态氮含量较高则表现为先下降后上升再下降趋势. 褐土和潮土的 NPK 和 NPK + BC 处理均都在第 13 d 达到最大值, 水稻土和砂姜黑土硝态氮含量的最大值出现较晚, 与铵态氮相反, 4 种土壤生物质炭与化肥混施硝态氮含量的最大值均高于单施化肥处理硝态氮含量最大值. 施肥显著 ($P < 0.05$) 增加了 4 种土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 平均含量, 单施生物质炭对 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 平均含量无显著影响 ($P > 0.05$, 表 4). 与

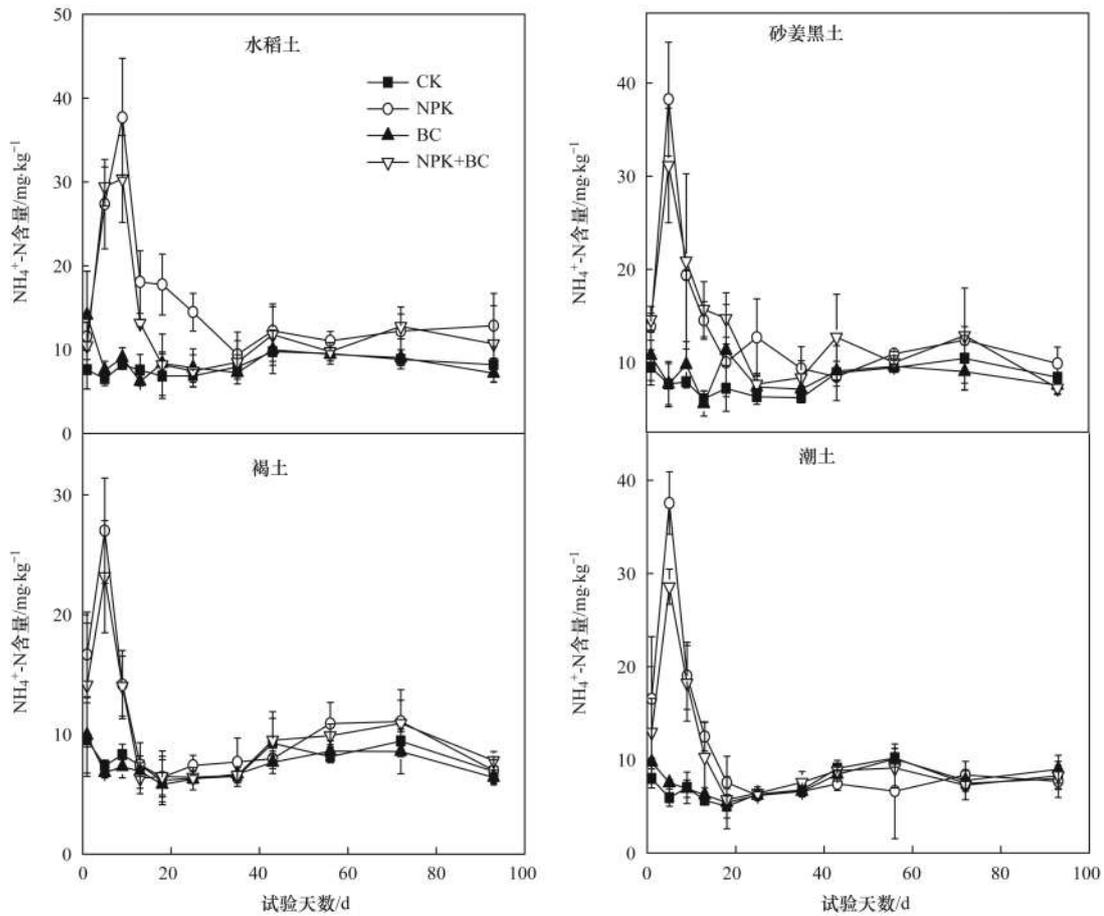


图 4 4 种土壤NH₄⁺-N含量的动态变化

Fig. 4 Temporal dynamics of NH₄⁺-N contents in four soils

NPK 处理相比, 生物质炭与化肥混施降低了NH₄⁺-N 平均含量, 增加了NO₃⁻-N平均含量, 但不显著($P > 0.05$, 表 4).

表 4 4 种土壤不同处理的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N平均含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 4 Average contents of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in four soils under different treatments/mg·kg⁻¹

土壤	处理	NH ₄ ⁺ -N平均含量	NO ₃ ⁻ -N平均含量
水稻土	CK	7.984 ± 1.554 b	7.063 ± 2.244 b
	NPK	16.786 ± 3.372 a	13.035 ± 5.095 ab
	BC	8.719 ± 1.417 b	7.645 ± 1.983 b
	NPK + BC	13.870 ± 2.704 a	16.033 ± 3.182 a
砂姜黑土	CK	7.993 ± 1.477 b	7.148 ± 1.610 b
	NPK	14.505 ± 2.071 a	25.386 ± 7.816 a
	BC	8.604 ± 1.800 b	8.688 ± 1.957 b
	NPK + BC	14.165 ± 3.273 a	31.190 ± 7.465 a
褐土	CK	7.759 ± 1.283 c	11.191 ± 3.557 b
	NPK	11.250 ± 1.890 a	28.169 ± 9.919 a
	BC	7.360 ± 0.991 c	10.951 ± 3.211 b
	NPK + BC	10.487 ± 2.164 ab	37.154 ± 8.609 a
潮土	CK	7.213 ± 0.780 b	4.422 ± 0.996 b
	NPK	12.361 ± 2.532 a	16.165 ± 5.015 a
	BC	7.625 ± 0.884 b	5.494 ± 0.931 b
	NPK + BC	11.206 ± 2.064 a	20.061 ± 6.051 a

1) 不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平($P < 0.05$)

2.5 N₂O排放与矿质氮含量之间的关系

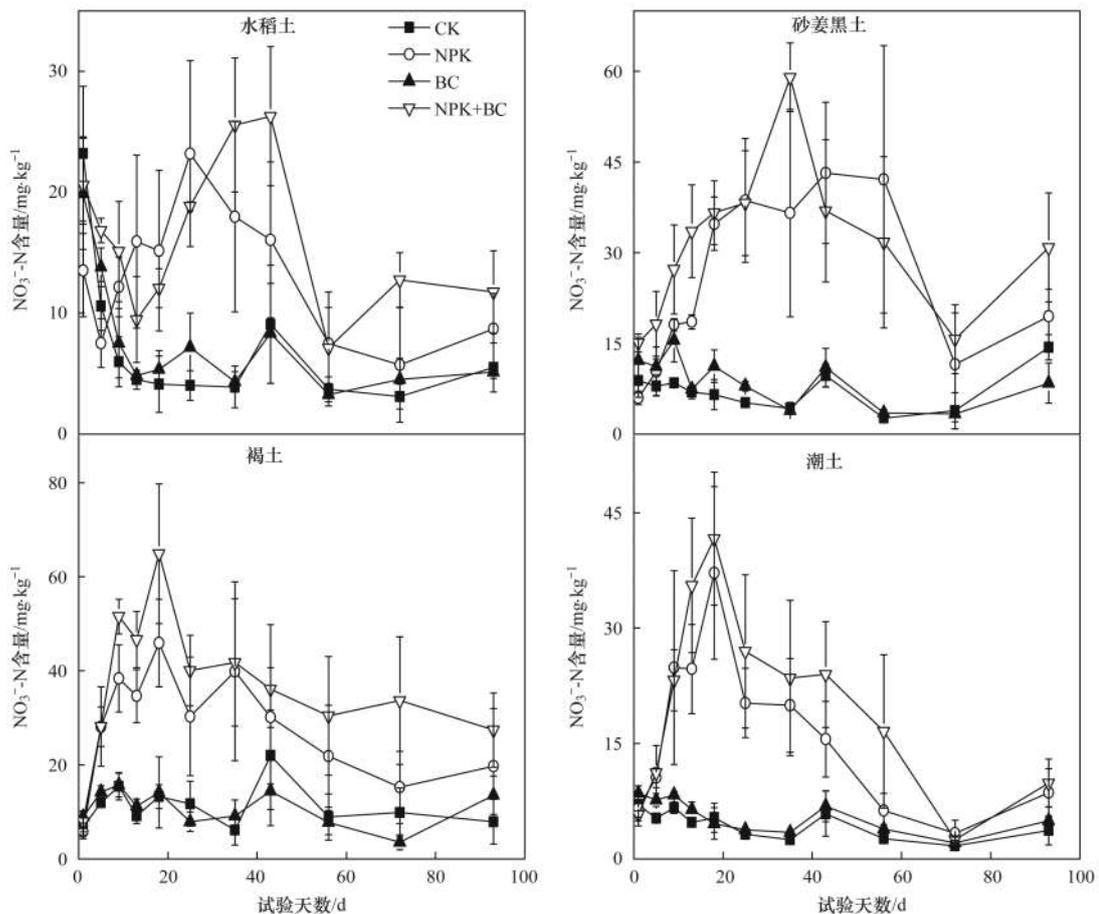
土壤N₂O排放通量与土壤矿质氮含量之间的关系在不同处理中表现存在差异(表 5)。施肥处理的土壤铵态氮对N₂O排放有促进作用, 砂姜黑土、褐土

表 5 4 种土壤N₂O通量与土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量的相关性¹⁾

Table 5 Correlation between N₂O flux and contents of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in four soils

土壤	处理	pH	NH ₄ ⁺ -N含量	NO ₃ ⁻ -N含量
水稻土	CK	-0.847 *	-0.616	0.821 *
	NPK	-0.292	0.719	-0.297
	BC	0.117	0.736 *	0.940 **
	NPK + BC	0.738	0.622	0.247
砂姜黑土	CK	0.605	0.069	0.016
	NPK	0.813 *	0.871 *	-0.292
	BC	0.969 **	0.382	0.950 **
	NPK + BC	0.840 *	0.875 *	0.368
褐土	CK	0.630	0.380	-0.366
	NPK	0.615	0.955 **	0.067
	BC	0.517	0.356	-0.46
	NPK + BC	0.783	0.896 **	-0.645
潮土	CK	-0.425	-0.425	0.646
	NPK	0.946 **	0.975 **	-0.003
	BC	0.607	-0.270	0.673
	NPK + BC	0.747	0.908 **	-0.440

1) ** 表示极显著相关($P < 0.01$), * 表示显著相关($P < 0.05$)

图 5 4 种土壤 NO₃⁻-N 含量的动态变化Fig. 5 Temporal dynamics of NO₃⁻-N contents in four soils

土和潮土 NPK 和 NPK + BC 的 N₂O 排放通量与铵态氮含量均呈现显著的正相关 ($P < 0.05$)。单施生物质炭处理的水稻土和砂姜黑土 N₂O 通量与 NO₃⁻-N 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。仅砂姜黑土 4 种处理 (除 CK 外) 和潮土 NPK 处理的 N₂O 排放通量与土壤 pH 呈显著正相关, 表明了 pH 是影响砂姜黑土 N₂O 排放的又一重要原因。

3 讨论

添加生物质炭提高了土壤的 pH, 从图 3 可以看出 4 种土壤中添加生物质炭处理的 pH 均高于不加生物质炭的处理。这可能是由于生物质炭自身呈碱性, 表面带有可以与土壤中致酸离子结合的一COO—(—COOH) 和—O—(—OH) 等官能团^[23], 调节了土壤的酸碱度, 而水稻土相较于其他 3 种土壤原始 pH 较低, 生物质炭对其影响较显著, 添加生物质炭后第 1 d 的 pH 值相较于 CK 处理上升了 1 个单位。此外, 由于水稻土、砂姜黑土和褐土从其他采样地搬运到试验点后, 进行了灌溉压实, 其观测期第 1 d 的 pH 值相较于原土壤均升高。施肥降低了 4 种土壤 pH, 这与 Wrage 等^[24]的研究结果一

致, 施肥增加了硝化作用的底物, 促进了硝化作用释放出 H⁺, 降低了土壤 pH。有研究表明添加生物质炭导致土壤 pH 升高, 增强了 N₂O 还原酶活性, 从而促进反硝化作用进行, 使得更多的 N₂O 还原为 N₂, 减少了 N₂O 排放^[25~29]。

本次试验中施肥显著增加了 4 种土壤 N₂O 的排放, 而生物质炭的添加降低了施肥后土壤 N₂O 的排放 (图 2 和表 2)。土壤 N₂O 的产生主要有两种途径, 一是硝化作用下 NH₄⁺ 被氧化为 NO₃⁻ 过程中有 N₂O 产生, 二是部分 NO₃⁻ 经反硝化作用生成 N₂O 或 N₂^[24], 生物质炭降低 N₂O 排放的机理与其影响土壤硝化与反硝化作用密切相关。土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的变化可以反映 N₂O 产生的途径。与 NPK 处理相比, 生物质炭与化肥混施土壤铵态氮含量最大值降低而硝态氮含量增加 (图 4 和图 5), 这与生物质炭与化肥相互作用会促进土壤硝化作用有关^[30], 而 N₂O 排放通量与施肥后铵态氮含量呈显著正相关 (表 5), 因此, 土壤 N₂O 排放降低。也有研究表明生物质炭具有较大的比表面积和较强的养分吸附能力, 施入农田土壤后增强了对 NH₄⁺-N 等的吸附, 降低了 NO₃⁻-N 含量, 抑制了土壤氮的矿化, 减

少了 N_2O 的产生^[31,32]。大量研究表明施肥对土壤 N_2O 排放有短期的促进作用^[33,34], Clay 等^[35]的研究认为, 施肥后通常伴随降雨, 促进了尿素水解, NH_4^+ -N含量升高, 增加了土壤硝化和反硝化作用的底物, 提高了 N_2O 的排放. 与 NPK 处理相比, 生物质炭与化肥混施显著降低了土壤 N_2O 的排放(表 2), 这可能由于生物质炭的添加提高了氧气含量, 抑制了厌氧反硝化酶的活性, 进而减少了反硝化过程 N_2O 的产生^[36~40]. 从表 3 看出, 生物质炭和肥料只对水稻土、褐土和潮土 N_2O 排放有显著的交互作用($P < 0.05$), 可能由于相比其他 3 种土壤, 砂姜黑土 N_2O 排放通量与土壤 pH 呈显著正相关(表 5), 施肥降低了土壤 pH 而生物质炭添加增加了土壤 pH, 因此, 生物质炭和肥料交互作用对砂姜黑土 N_2O 排放影响不显著($P > 0.05$). 本试验 4 种土壤的 CK 和 BC 处理土壤 N_2O 排放通量均处于较低的水平, 主要是受到土壤中矿质氮浓度的限制^[41], 所产生的 N_2O 较少, 生物质炭的作用效果不显著. 潮土的 NPK 和 NPK + BC 处理 N_2O 排放通量达到最大值后没有迅速降低, 造成 N_2O 累积排放量最高, 这可能与它初始的 pH 较高有关, 生物质炭对它影响较弱. 与 CK 相比, 单施生物质炭显著提高了水稻土和褐土 N_2O 累积排放量(表 2), 可能是生物质炭中含有部分氮素, 增加了 N_2O 产生的底物, 在土壤氮素底物受到限制的条件下, 氮素的增加掩盖了生物质炭对 N_2O 产生的抑制效应^[41]. 也有研究认为水稻土初始 pH 较低, 添加生物质炭对其 pH 影响较显著, 提高了与硝化作用有关的氨氧化细菌和氨氧化古菌的活性, 促进了 N_2O 的产生^[42,43].

4 结论

添加生物质炭和化肥对 4 种土壤 N_2O 的排放影响存在差异. 施肥显著增加了 4 种土壤 N_2O 排放, 而生物质炭与化肥混施降低了 4 种土壤 N_2O 排放, 生物质炭与化肥对水稻土、褐土和潮土 N_2O 排放具有显著的交互作用. 单施生物质炭显著增加了水稻土和褐土的 N_2O 排放, 而对砂姜黑土和潮土 N_2O 排放无显著影响. 添加生物质炭提高了 4 种土壤 pH, 其中, 初始 pH 最低的水稻土, 受生物质炭影响较显著, 施肥则降低了 4 种土壤 pH. 因此, 在华北平原 4 种典型土壤中, 生物质炭与化肥混合施用是缓解土壤 N_2O 排放的有效措施.

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. London, England: Cambridge University Press, 2013. 159-254.

[2] Meng Q F, Yue S C, Hou P, *et al.* Improving yield and nitrogen use efficiency simultaneously for maize and wheat in China: A review[J]. *Pedosphere*, 2016, **26**(2): 137-147.

[3] Ding W X, Yu H Y, Cai Z C. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **47**(1): 91-99.

[4] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, *et al.* On-farm estimation of indigenous nitrogen supply for site-specific nitrogen management in the North China plain [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, **81**(1): 37-47.

[5] Mueller N D, West P C, Gerber J S, *et al.* A tradeoff frontier for global nitrogen use and cereal production [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, **9**(5): 054002.

[6] 罗晓琦, 冯浩, 刘晶晶, 等. 生物质炭施用下中国农田土壤 N_2O 排放的 Meta 分析[J]. *中国生态农业学报*, 2017, **25**(9): 1254-1265.

Luo X Q, Feng H, Liu J J, *et al.* Meta-analysis on farmland soil N_2O emissions under biochar application in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(9): 1254-1265.

[7] 王宁, 侯艳伟, 彭静静, 等. 生物质炭吸附有机污染物的研究进展[J]. *环境化学*, 2012, **31**(3): 287-295.

Wang N, Hou Y W, Peng J J, *et al.* Research progress on sorption of organic contaminants to biochar [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(3): 287-295.

[8] 袁金华, 徐仁扣. 稻壳制备的生物质炭对红壤和黄棕壤酸度的改良效果[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(5): 472-476.

Yuan J H, Xu R K. Effects of rice-hull-based biochar regulating acidity of red soil and yellow brown soil [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, **26**(5): 472-476.

[9] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(5): 1719-1730.

[10] 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 等. 生物质炭对华北农田土壤 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.

[11] Yoo G, Lee Y O, Won T J, *et al.* Variable effects of biochar application to soils on nitrification-mediated N_2O emissions [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **626**: 603.

[12] He T H, Liu D Y, Yuan J J, *et al.* Effects of application of inhibitors and biochar to fertilizer on gaseous nitrogen emissions from an intensively managed wheat field [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 121-130.

[13] Woldetsadik D, Drechsel P, Marschner B, *et al.* Effect of biochar derived from faecal matter on yield and nutrient content of lettuce (*Lactuca sativa*) in two contrasting soils [J]. *Environmental Systems Research*, 2018, **6**: 2.

[14] Wu D, Senbayram M, Zang H D, *et al.* Effect of biochar origin and soil pH on greenhouse gas emissions from sandy and clay soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, **129**: 121-127.

[15] Liu X Y, Qu J J, Li L Q, *et al.* Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N_2O emission in rice paddies? —A cross site field experiment from South China [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **42**: 168-173.

[16] Shen J L, Tang H, Liu J Y, *et al.* Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas

- emissions within double rice cropping systems [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **188**: 264-274.
- [17] Lin Y X, Ding W X, Liu D Y, *et al.* Wheat straw-derived biochar amendment stimulated N₂O emissions from rice paddy soils by regulating the *amoA* genes of ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **113**: 89-98.
- [18] Farquharson R, Baldock J. Erratum to: Concepts in modelling N₂O emissions from land use [J]. *Plant and Soil*, 2009, **325**(1/2): 353-353.
- [19] Kim S D, Dale B E. Effects of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions and economics of corn production [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(16): 6028-6033.
- [20] 李玉, 康晓明, 郝彦宾, 等. 黄河三角洲芦苇湿地生态系统碳、水热通量特征 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(15): 4400-4411.
- Li Y, Kang X M, Hao Y B, *et al.* Carbon, water and heat fluxes of a reed (*Phragmites australis*) wetland in the Yellow River Delta, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(15): 4400-4411.
- [21] 孙贇, 何志龙, 林杉, 等. 不同生物质炭对酸化茶园土壤 N₂O 和 CO₂ 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(12): 2544-2552.
- Sun Y, He Z L, Lin S, *et al.* Effects of different biochars on N₂O and CO₂ emission from acidified tea field soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(12): 2544-2552.
- [22] 石书静, 高志岭. 不同通量计算方法对静态箱法测定农田 N₂O 排放通量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(10): 2060-2065.
- Shi S J, Gao Z L. Impact of different flux-calculation methods on the N₂O fluxes from cropland measured with static chamber technique [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(10): 2060-2065.
- [23] Kastner J R, Miller J, Das K C. Pyrolysis conditions and ozone oxidation effects on ammonia adsorption in biomass generated chars [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **164**(2-3): 1420-1427.
- [24] Wrage N, Velthof G L, Van Beusichem M L, *et al.* Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(12-13): 1723-1732.
- [25] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, **53**(2): 181-188.
- [26] Feng Y Z, Xu Y P, Yu Y C, *et al.* Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **46**: 80-88.
- [27] Xu H J, Wang X H, Li H, *et al.* Biochar impacts soil microbial community composition and nitrogen cycling in an acidic soil planted with rape [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(16): 9391-9399.
- [28] Wang C, Lu H H, Dong D, *et al.* Insight into the effects of biochar on manure composting: evidence supporting the relationship between N₂O emission and denitrifying community [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(13): 7341-7349.
- [29] Harter J, Krause H M, Schuettler S, *et al.* Linking N₂O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community [J]. *The ISME Journal*, 2014, **8**(3): 660-674.
- [30] Clough T J, Condon L M, Kammann C, *et al.* A review of biochar and soil nitrogen dynamics [J]. *Agronomy*, 2013, **3**(2): 275-293.
- [31] Taghizadeh-Toosi A, Clough T J, Condon L M, *et al.* Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, **40**(2): 468-476.
- [32] Berglund L M, Deluca T H, Zackrisson O. Activated carbon amendments to soil alters nitrification rates in Scots pine forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(12): 2067-2073.
- [33] 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.
- [34] Fuß R, Ruth B, Schilling R, *et al.* Pulse emissions of N₂O and CO₂ from an arable field depending on fertilization and tillage practice [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, **144**(1): 61-68.
- [35] Clay D E, Malzer G L, Anderson J L. Ammonia volatilization from urea as influenced by soil temperature, soil water content, and nitrification and hydrolysis inhibitors [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, **54**(1): 263-266.
- [36] 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.
- [37] 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 N₂O 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 N₂O Emission in the north China plain [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5333-5343.
- [38] Rogovska N, Laird D, Cruse R, *et al.* Impact of biochar on manure carbon stabilization and greenhouse gas emissions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, **75**(3): 871-879.
- [39] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, *et al.* Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **139**(4): 469-475.
- [40] Pal Singh B, Hatton B J, Singh B, *et al.* Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. *Journal of Environment Quality*, 2010, **39**(4): 1224-1235.
- [41] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(4): 28-1-28-9.
- [42] De Gannes V, Eudoxie G, Hickey W J. Impacts of edaphic factors on communities of ammonia-oxidizing archaea, ammonia-oxidizing bacteria and nitrification in tropical soils [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(2): e89568.
- [43] Liu J Y, Shen J L, Li Y, *et al.* Effects of biochar amendment on the net greenhouse gas emission and greenhouse gas intensity in a Chinese double rice cropping system [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **65**: 30-39.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-ru, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)