

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值	王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)
2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征	张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用	邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征	高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)
2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析	王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)
北京市大气环境 PM _{2.5} 和 PM ₁ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析	樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)
南京春季北郊地区大气 PM _{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征	周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物	马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系	王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO _x 排放特征	杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选	李奇峰, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征	宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)
脱甲河水系 N ₂ O 关键产生过程及氮素来源探讨	赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响	王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复	史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析	丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化	范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征	林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)
基于δ ¹⁵ N和δ ¹⁸ O的农业区地下河硝酸盐污染来源	盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征	彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)
铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为	梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制	张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性	李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除	李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响	刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能	杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)
低温下 A ² /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性	黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)
O ₃ -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析	张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析	吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)
3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响	温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制	张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析	杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析	尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价	马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响	黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)
不同肥料施用对设施蔬菜地 NH ₃ 挥发和 N ₂ O 排放的影响	山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响	田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响	王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征	陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制	陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果	刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响	万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌	杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合 As(Ⅲ) 的氧化作用	李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制	杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性	白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17β-雌二醇的降解特性	吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响	李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析	任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤	平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)
生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布	李建陶, 曾鸣 (4834)
《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)	

秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响

黄容, 高明*, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 采用静态箱/气相色谱法, 2016年11月至2017年9月通过田间原位试验, 设置了无物料还田(CK)、常规化肥(F)、秸秆还田配施100%化肥(100FS)、秸秆还田配施70%化肥(70FS)、秸秆还田配施60%化肥(60FS)、秸秆还田配施50%化肥(50FS), 对比分析了在化肥减量的基础上, 配施秸秆处理的菜地(莴笋-卷心菜-辣椒轮作)土壤CO₂、CH₄、N₂O动态变化特征及温室效应, 研究秸秆与化肥减量配施对菜地温室气体排放的影响。结果表明, 土壤CO₂、CH₄、N₂O排放具有一定的季节变化规律, 排放高峰主要集中在4~8月, 且在施肥灌水后均会出现气体的排放峰。秸秆与化肥配施较常规施肥(F)处理提高了土壤N₂O排放量, 累积排放量及其排放系数, 其中100FS处理的效果最为明显, 辣椒季的累积排放通量明显高于莴笋季和卷心菜季, 高达60.76 kg·hm⁻² (P<0.05), N₂O的排放系数(以N₂O-N/N计)为0.138 kg·kg⁻¹, 而秸秆与化肥减量配施较100FS处理可以降低氮肥的N₂O排放系数。与对照CK和F处理相比, 70FS处理降低了土壤CO₂排放量和累积排放量, 分别为55.28~1 831.62 mg·(m²·h)⁻¹和7 502.13~25 988.55 kg·hm⁻², 而其他秸秆与化肥配施处理均增加了CO₂累积排放通量, 尤其是60FS和50FS处理。对土壤CH₄排放而言, 辣椒季的排放波动较大, 除CK外, 各处理的土壤CH₄累积排放量多为负值, 表现为大气中CH₄汇; 秸秆与化肥减量30%~50%配施处理均降低了辣椒季的土壤CH₄排放量和累积排放通量, 而100FS处理提高了CH₄排放量和累积排放通量。与CK和F处理相比, 除70FS外, 100FS、60FS和50FS均显著提高了GWP。总体上, 从温室气体排放角度, 在常规化肥施用的基础上减量30%再与秸秆配施可以降低土壤CO₂和CH₄排放, 缓解温室气体的增温潜势, 而对土壤N₂O减排效果不显著。

关键词: 秸秆; 化肥; 温室气体; 增温潜势; 减排

中图分类号: X16; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4694-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802087

Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field

HUANG Rong, GAO Ming*, LI Jia-cheng, XU Guo-xin, LÜ Sheng, LUO Mei

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Greenhouse gases mainly come from farmland soils. Re-spreading chaff (straw returning) is an effective ecological management in China. Quantitative analysis of straw residues together with reduced fertilization rates can provide a scientific basis for reducing greenhouse gas emissions. A field experiment with six different fertilizer amounts combined with straw residues was carried out in a vegetable field (lettuce-cabbage-chili rotation), including the control (CK), conventional fertilizing (F), straw returning with 100% conventional fertilizing (100FS), straw returning with 70% conventional fertilizing (70FS), straw returning with 60% conventional fertilizing (60FS), and straw returning with 50% conventional fertilizing (50FS). The dynamic characteristics and emission factors of CO₂, CH₄ and N₂O in the soil were analyzed using an in-situ, closed chamber, gas chromatography-based system, from November 2016 to September 2017. The results showed that the emission of CO₂, CH₄ and N₂O has seasonal variation characteristics. The peak value mainly occurred in April to August, and the gas emission peak would appear after fertilizing and irrigating. Compared with F treatment, straw returning with fertilizing treatments reduced the N₂O emission fluxes, cumulative emission and emission factor, especially in the 100FS treatment. The N₂O cumulative emission and emission factor was 60.76 kg·hm⁻², 0.138 kg·kg⁻¹ (N₂O-N/N) respectively in 100FS treatment during planting chili was more than that during planting lettuce and cabbage. Moreover, straw returning with reducing conventional fertilizing could reduce the N₂O emission factor compared with 100FS treatment. The CO₂ emission fluxes 55.28-1 831.62 [mg·(m²·h)⁻¹] and cumulative emission (7 502.13-25 988.55 kg·hm⁻²) in 70FS treatment were lower than that in CK and F treatments, while other treatments increased the CO₂ emission fluxes and cumulative emission, especially in 60FS and 50FS treatments. During planting lettuce and cabbage, the CH₄ cumulative emission mainly showed negative values in treatments except for CK, indicating that soil could adsorb CH₄. Moreover, straw returning with 30%-50% conventional fertilizing treatment could reduce CH₄ emission fluxes and cumulative emission during planting chili, but increased in 100FS. Compared with CK and F treatment, generally, straw returning with conventional fertilizing could significantly increase the global warming potential (GWP) in the study, except for 70FS treatment. 70FS could reduce the CO₂, CH₄ emission and the GWP of

收稿日期: 2018-02-10; 修订日期: 2018-03-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)

作者简介: 黄容(1989~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: 277840241@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

greenhouse gases, but could not significantly affect N_2O emission reduction.

Key words: straw; chemical fertilizer; greenhouse gas; global warming potential (GWP); emission reduction

温室气体作为全球气候变化的主要驱动因子, 因其浓度的增加而引起的全球气候变暖是当今世界所面临的重要挑战^[1]. 农田生态系统是全球温室气体排放的重要排放源, IPCC 报告指出, 2005 年全球温室气体总排放的 12% 来自于农业生产活动所引起的温室气体的排放^[2]. 目前, 蔬菜消费量日益增加, 促使人们长期大量施用化肥, 导致菜园土壤质量下降, 极高的水肥的投入, 会促进 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的排放, 加剧全球气候变暖^[3]. Wang 等^[4]的研究表明, 蔬菜土壤因施肥产生的 N_2O 直接排放量高达 6.7 万 t. 据国家统计局 2014 年的调查我国氮肥施用量高达 3.2×10^7 t, 但氮肥利用率只有 30%. 有研究表明, 在施用大量氮肥的情况下, 仅 5% ~ 15% 的氮肥会作用于作物产量, 其余的氮肥或转化为温室气体, 或转为污染源^[5]. 因此, 在蔬菜土壤开展有机肥料替代部分化肥的研究, 对改善因施用化肥(尤其是氮肥)多带来的生态环境问题, 控制化肥投入以减少农田土壤温室气体具有重要的意义.

秸秆是重要的农业资源, 其直接还田是目前秸秆利用的重要渠道, 实现秸秆还田不仅可以减轻因焚烧而产生的大气污染, 同时也是提高土壤肥力的重要措施^[6], 但也会影响温室气体排放等问题. 有学者认为秸秆还田虽然会增加农田固碳, 但也会促进温室气体的排放^[7]. Zhu 等^[8]的研究表明, 秸秆还田促进了菜地土壤的 N_2O 排放, 但张翰林等^[9]通过研究秸秆还田年限对稻麦轮作系统温室气体排放的影响表明, 秸秆还田 1 a 和 5 a 均降低了 N_2O 排放, 分别降低了 30% 和 43%; 而 Shan 等^[10]利用 Meta 分析认为, 秸秆还田不会显著影响 N_2O 排放. 秸秆直接还田可以显著提高土壤 CO_2 排放量, 刘四义等^[11]的研究表明, 玉米秸秆对土壤 CO_2 排放的激发效应值为 $216.53 \sim 335.17 \mu mol \cdot g^{-1}$, 而 Naser 等^[12]得到了相反结论, 表明秸秆还田对 CO_2 排放具有减排效果. 秸秆还田会增加土壤有机质含量, 而有机质是产生 CH_4 的重要底物, 因此大多数学者认为秸秆还田为产甲烷菌提供了有效碳基质, 从而增加了 CH_4 排放^[13,14], 但也有研究认为秸秆还田会在表层土壤中进行有氧降解, 其降解产物在土壤氧化层中还原产生 CH_4 的可能性较小, 主要以 CO_2 的形式排放, 从而减低 CH_4 排放量^[15]. 目前国内

外关于秸秆还田对温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)排放的影响仍存在争议, 因此, 开展秸秆还田对菜地土壤温室气体排放特征影响, 有助于揭示秸秆还田的温室效应. 本研究采用静态箱/气相色谱法, 原位对莴笋-卷心菜-辣椒轮作菜地进行了秸秆与减量化肥配施处理下的土壤温室气体排放观测分析, 以期通过控制化肥投入以减少农田温室气体排放提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究概况及试验材料

试验地点位于重庆市北碚区“国家紫色土土壤肥力与肥料效益长期监测基地”, 海拔 266.3 m, 年平均气温 $18.3^\circ C$. 最高和最低气温平均为 $28.7^\circ C$ 和 $7.7^\circ C$, $\geq 10^\circ C$ 积温 $6006^\circ C$, 年降雨量 1086.6 mm, 年日照时数 1276.7 h, 属于亚热带季风气候. 试验土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥页岩发育形成的紫色土, 中性紫色土亚类, 灰棕紫泥土属, 是重庆四川紫色土区分布最广的一种土壤. 其基本理化性质为: 有机碳含量 $11.12 g \cdot kg^{-1}$, 碱解氮 $83.02 mg \cdot kg^{-1}$, 速效磷 $44.10 mg \cdot kg^{-1}$, 速效钾 $208.75 mg \cdot kg^{-1}$, pH 为 5.8. 试验中所用秸秆为玉米秸秆, 取自试验基地农田, 其有机碳含量为 $338.8 g \cdot kg^{-1}$, C/N 为 33.9, 经晒干后粉碎机粉碎成 5 ~ 10 cm 左右, 备用.

1.2 试验设计

试验共设置 6 个处理: 无物料还田(CK)、常规化肥(F)、秸秆还田配施 100% 化肥(100FS)、秸秆还田配施 70% 化肥(70FS)、秸秆还田配施 60% 化肥(60FS)、秸秆还田配施 50% 化肥(50FS). 每个处理 3 个重复, 采用随机区组排列在 18 个 $2 m \times 1 m$ 能独立排灌的微区内, 各个微区的水肥管理均相同. 在种植蔬菜前将秸秆均匀撒覆在土壤表面进行翻耕, 深度为 30 ~ 40 cm.

本试验于 2016 年 11 月开始, 共种植 3 季蔬菜(2016 年 10 月 27 日移栽莴笋苗, 2017 年 1 月 10 日收获莴笋; 2017 年 1 月 11 日移栽卷心菜苗, 2017 年 5 月 4 日收获卷心菜; 2017 年 5 月 11 日移栽辣椒苗, 2017 年 9 月 14 日移除辣椒树, 期间收获 3 次辣椒), 施用两次秸秆, 分别在种植蔬菜(莴笋, 辣椒)前将秸秆均匀撒覆在土壤表面进行翻耕

(每次施用量为 $12\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 翻耕深度为 $30\sim 40\text{ cm}$, 为保持相对一致性, 对照 CK 和 F 处理也进行同样翻耕. 各作物的氮、磷、钾肥的常规施用量按文献[16]的化肥施用量, 化肥减量处理在常规使用量的基础上减少相应的百分比, 各季作物栽培方式和灌溉、除草等田间管理按照当地习惯进行, 灌溉时间通常在施肥和追肥后, 以及土壤含水量较低的时候, 每个处理均进行灌溉. 磷、钾作基肥一次施用; 氮肥基肥占 60% , 追肥占 40% ; 氮、磷、钾肥品种分别为尿素($\text{N}46\%$)、过磷酸钙($\text{P}_2\text{O}_5 12\%$)、氯化钾($\text{K}_2\text{O } 60\%$).

1.3 试验方法

采用静态箱/气相色谱法测定菜地土壤温室气体排放通量, 采样箱材质为不锈钢材料, 由底座和顶箱这2部分组成, 底座(横截面为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$)

长期固定于田间, 底壁插入土中约 10 cm , 底座顶端有深、宽均为 3 cm 的密封水槽, 采样前往槽内注水以防底座和顶箱结合处漏气. 顶箱($50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$)外覆绝热材料以减少采样箱内温度随外界气温升高对试验结果的影响, 同时, 顶箱内部安装2个小风扇, 用于混合箱内气体. 顶箱侧面安装电源插头、温度探头(JM624型便携式测温计)和采样管. 试验期间, 采样频率为每周1次, 每次控制在当天 $09:00\sim 11:00$ 间进行, 采样时用 60 mL 注射器采集第1次样品, 之后每间隔 10 min 采样1次, 罩箱时间为 30 min , 共采集4个气体样品. 在气体样品采集的同时, 记下开始和结束时的气温和 5 cm 深土壤温度(如图1), 并采集表层土样, 测定含水量. 遇到下雨及施肥情况, 采样频率增加, 为每2 d一次, 持续一周.

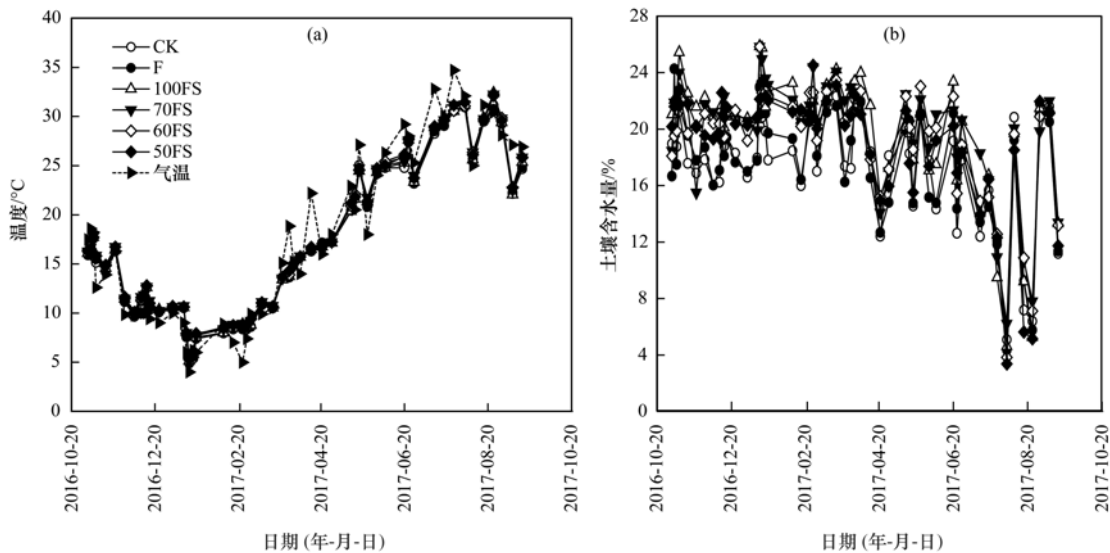


图1 各处理5cm土壤温度、气温及含水量变化

Fig. 1 Variation characteristics of 5 cm soil temperature, air temperature and soil moisture content under different treatments

1.4 数据处理

采用气相色谱(Agilent 7890A气相色谱仪)测定温室气体 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 浓度. 高纯氮气(N_2)与氩甲烷(ArCH_4)分别作为 CH_4 和 N_2O 的载气. N_2O 检测器为ECD(电子俘获检测器), 检测温度 300°C ; CO_2 和 CH_4 检测器为FID(火焰离子化检测器), 检测温度为 300°C , 柱温 50°C , 气体排放速率由4个气样浓度值经线性回归分析得出具体工作条件详见文献[17].

温室气体排放通量(F)的计算公式^[18]为:

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

式中, F 表示 CO_2 排放通量 $[\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$ 及 N_2O 和

CH_4 排放通量 $[\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$; ρ 表示标准状态下 CO_2 -C、 CH_4 -C和 N_2O -N的密度; V 为采样箱体积(m^3); A 为采样底座内土壤表面积(m^2); $\Delta c/\Delta t$ 表示气体的排放速率, 即通过每个小区每次采集的4个样品的气体浓度与时间进行一次线性回归, 回归方程的系数就是 $\Delta c/\Delta t$; T 为采样箱内温度($^\circ\text{C}$).

各处理每次排放通量用各重复平均值表示; 作物季节平均排放通量则以每次采样时间间隔为权重进行加权平均求得; 生长季累积排放量以每次排放通量的加权和表示.

增温潜势(global warming potential, GWP): 表示不同温室气体排放的综合指标, 一般以 CO_2 为标准, 用 CO_2 当量表示. 计算公式为^[19]:

$$\text{GWP} = \text{CO}_2 + 25 \times R(\text{CH}_4) + 298 \times R(\text{N}_2\text{O}) \quad (2)$$

式中, GWP 为作物生长季温室气体排放的综合温室效应(以 $\text{CO}_2\text{-e}$ 计, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), $R(\text{CH}_4)$ 和 $R(\text{N}_2\text{O})$ 分别为作物生长季 CH_4 和 N_2O 的排放总量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

化肥 N 的 N_2O 排放系数(EF, emission factor)计算公式为^[20]:

$$\text{EF} = (E_N - E_{N_0}) / [N] \quad (3)$$

式中, EF 为化肥氮的 N_2O 排放系数(以 $\text{N}_2\text{O-N/N}$ 计) $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, E_N 和 E_{N_0} 分别为试验中氮肥处理和不施氮肥处理的 N_2O 排放量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), $[N]$ 为当季作物氮肥施用量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

土壤基本理化性质测定: 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定; 土壤速效钾采用 pH 7, $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵浸提-火焰光度计法; 土壤速效磷采用 pH 8.5, $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 浸提-钼蓝比色法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定; 土样具体测定详

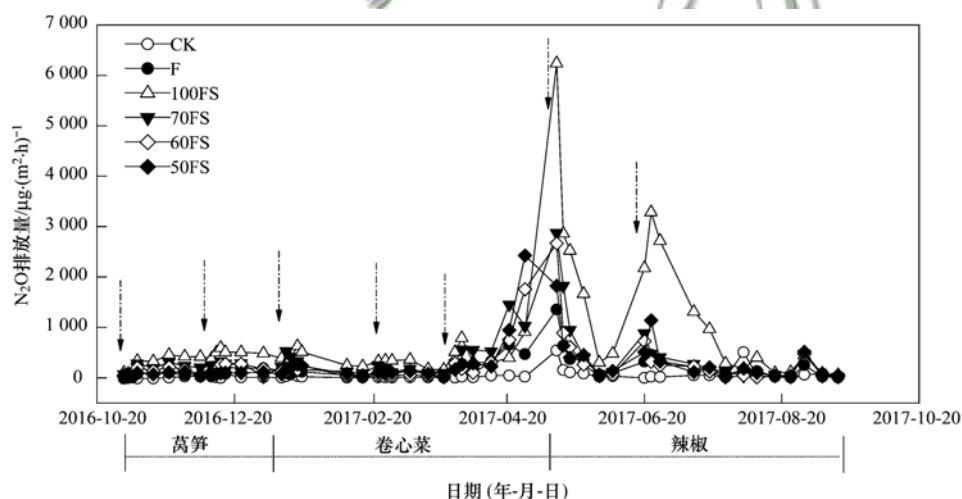
细步骤参见文献[21].

采用 SPSS20.0、Origin 8.5 和 Excel 2010 软件进行数据处理、绘图制表. 所有的结果均用 3 次测定结果的平均值表示. 不同处理之间的多重比较采用 LSD 最小显著差数法($P < 0.05$; $P < 0.01$).

2 结果与分析

2.1 秸秆与化肥施用对土壤 N_2O 排放的影响

如图 2 所示, 在整个监测期, 各处理的土壤 N_2O 排放量存在明显的季节变化规律, 表现为冬季较低, 夏季较高. 与 CK 相比, 秸秆与化肥配施均提高了土壤 N_2O 排放量, 且随着时间的增加, 各处理的土壤 N_2O 排放量分别在 2017 年 5 月 12 日和 2017 年 6 月 23 日出现了峰值. 其中 100FS 处理的 N_2O 排放量最高, 为 $57.59 \sim 6238.02 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 其次为 70FS 处理, 而 F 处理的 N_2O 排放量较低, 可见秸秆与化肥配施处理较常规施肥处理提高了土壤 N_2O 排放量.



图中箭头表示施肥和追肥的时间

图 2 秸秆与化肥配施下的 N_2O 排放量变化

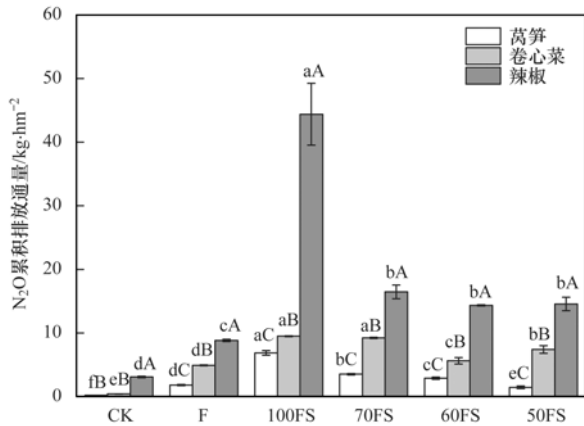
Fig. 2 Emission fluxes for N_2O under different treatments

如图 3 所示, 辣椒种植季的 N_2O 累积排放通量明显高于茼蒿和卷心菜($P < 0.01$), 其中秸秆配施全量化肥(100FS)处理的辣椒季 N_2O 累积排放通量最高, 为 $44.38 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 茼蒿季, 100FS 处理的 N_2O 排放通量最高, 分别较对照 CK 和常规施肥(F)处理明显提高了 $5.05 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $6.66 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($P < 0.05$), 50FS 处理较 F 处理明显降低了 $0.36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. 卷心菜季, 秸秆与化肥配施处理较 F 处理均显著提高了 N_2O 累积排放通量. 总体上, 2016 年 11 月至 2017 年 9 月, 与 CK 和 F 处理相比, 秸

秆与化肥配施处理增加了 N_2O 累积排放通量, 其中 100FS 处理的最大, 为 $60.76 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而 60FS 处理较低, 为 $22.85 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

2.2 秸秆与化肥施用对土壤 CO_2 排放的影响

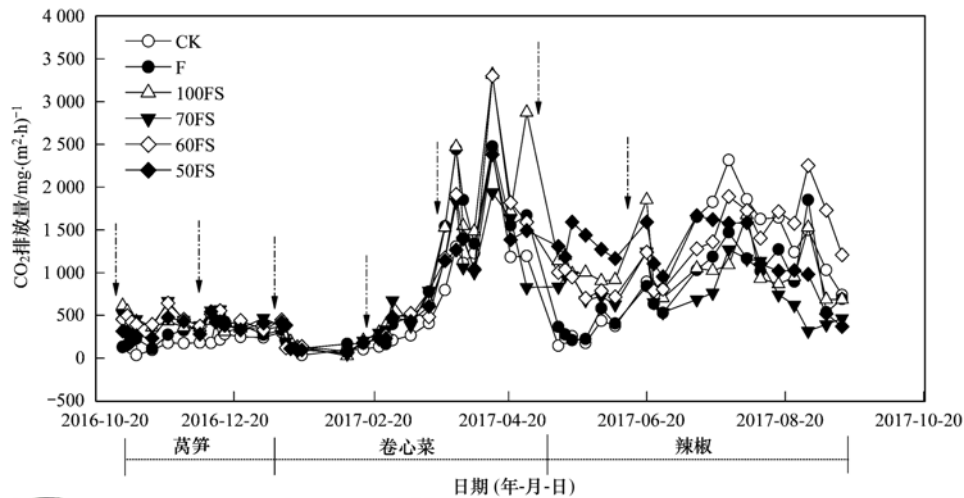
如图 4 所示, 与 CK 相比, 茼蒿季和卷心菜季, 秸秆与化肥配施均提高了土壤 CO_2 排放量, 且在 2017 年 4 月出现了 CO_2 排放高峰, 其中 100FS 处理的排放量最大, 最高可达 $3315.88 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. 在辣椒季(除两次追肥外), 70FS 处理的 CO_2 排放量低于 CK 和 F 处理, 但 60FS 和 50FS 处理较 CK



不同小写字母表示同一种植季下不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一处理在不同种植季间的差异显著 ($P < 0.01$)

图3 秸秆与化肥配施下的 N_2O 累积排放通量的变化

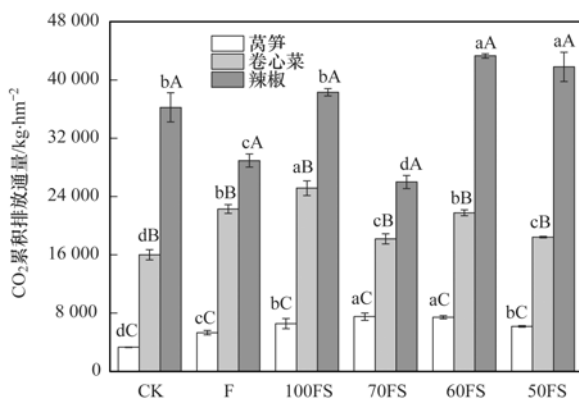
Fig. 3 Cumulative emission for N_2O under different treatments



图中箭头表示施肥和追肥的时间

图4 秸秆与化肥配施下的 CO_2 排放量变化

Fig. 4 Emission fluxes for CO_2 under different treatments



不同小写字母表示同一种植季下不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一处理在不同种植季间的差异显著 ($P < 0.01$)

图5 秸秆与化肥配施下的 CO_2 累积排放通量的变化

Fig. 5 Cumulative emission for CO_2 under different treatments

和 F 处理提高了土壤 CO_2 排放量, 其中 60FS 处理最高可达 $2254.29 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

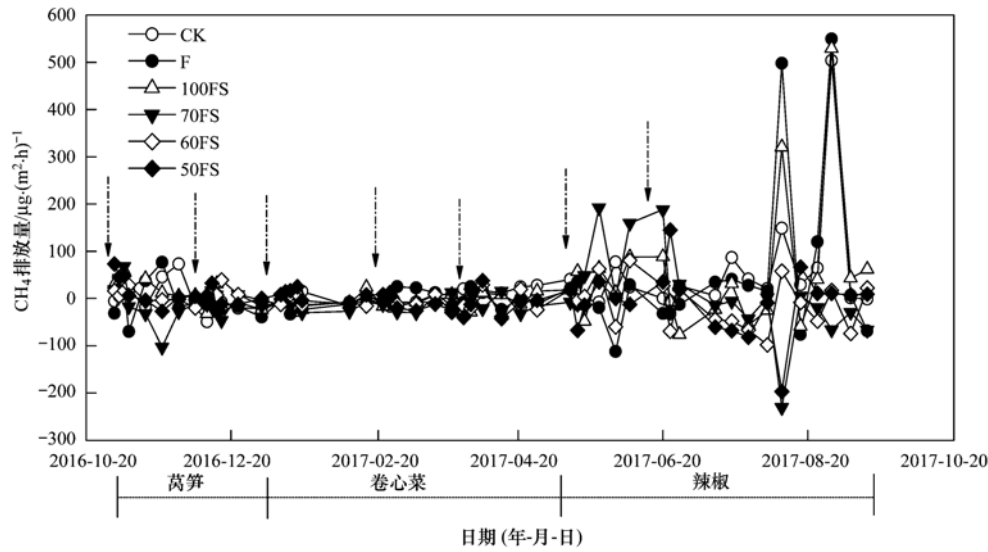
通过计算作物季节土壤 CO_2 累积排放通量发现 (图 5), 辣椒季 ($25988.55 \sim 46803.47 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 卷心菜季 ($16001.10 \sim 25149.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 蒜笋季 ($3300.90 \sim 11054.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) ($P < 0.01$). 与常规施肥 F 处理相比, 秸秆与化肥配施处理均明显增加了蒜笋季 CO_2 累积排放通量 ($P < 0.05$); 除 100FS 处理较 F 处理明显增加 12.8% 外, 秸秆与化肥减量配施处理均降低了卷心菜季 CO_2 累积排放通量; 辣椒季, 仅 70FS 处理明显降低 CO_2 累积排放通量, 而其他处理均显著增加了 32.3% ~ 49.6%, 其中 60FS 处理的最高. 总体上, 仅 70FS 处理较 CK 和 F 处理降低了 CO_2 累积排放通量 (2016 年 11 月至 2017 年 9 月), 而其

他秸秆与化肥配施处理均增加了 CO_2 累积排放通量.

2.3 秸秆与化肥施用对土壤 CH_4 排放的影响

各处理的 CH_4 排放量具有一定的季节变化规律, 在蒜笋季和卷心菜季波动不明显, 而在辣椒季波动较大, 且出现了排放峰值, 但在各季作物施肥后, 均出现了 CH_4 排放小峰值. 如图 6 所示, 最大排放峰值出现在 F 处理 [$549.13 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 其次为 100FS 处理 [$529.42 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 而 70FS 和 50FS 处理出现了 CH_4 排放量的最低值, 分别为 $-230.77 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $-196.82 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$.

如图 7 所示, 蒜笋季与 CK 相比, 70FS 处理的 CH_4 累积排放通量最低 ($-0.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),



图中箭头表示施肥和追肥的时间

图6 秸秆与化肥配施下的CH₄排放量变化

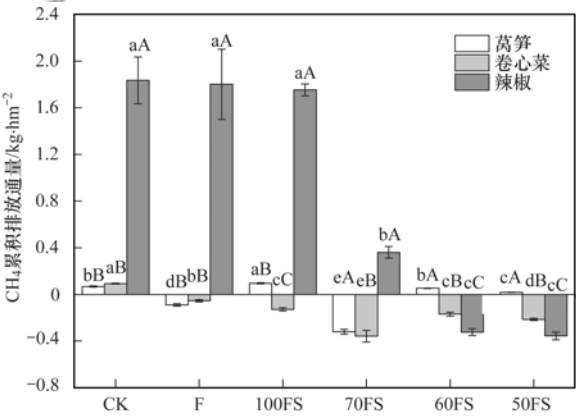
Fig. 6 Emission fluxes for CH₄ under different treatments

而100FS处理的CH₄累积排放通量最高(0.09 kg·hm⁻²).卷心菜季,除CK外,各处理的CH₄累积排放通量为负值,表现为F>100FS>60FS>50FS>70FS.辣椒季,各处理较CK均降低了CH₄累积排放通量,其中50FS处理的CH₄累积排放通量最低(-0.36 kg·hm⁻²),其次为60FS处理.总体上,2016年11月至2017年9月,与CK和F处理相比,100FS处理提高了CH₄排放通量,秸秆与化肥减量配施处理则降低了CH₄排放通量.

2.4 秸秆与化肥施用对化肥N₂O排放系数及温室气体增温潜势的影响

通过计算氮肥的N₂O排放系数(EF)发现(表1):各处理的EF表现为辣椒季>卷心菜>茭笋.与F处理相比,秸秆与化肥配施处理均显著增加了茭笋和辣椒季的EF值,其中秸秆与全量化肥配施(100FS)处理的EF最高,较常规施肥(F)处理显著增加了0.015~0.119 kg·kg⁻¹;秸秆与化肥减量配施处理较100FS处理可以降低氮肥的N₂O排放系数,其中60FS处理的效果较佳.

从表1可以看出,在整个试验过程中,秸秆与化肥配施明显增加了N₂O的平均排放通量,其中100FS处理的排放量最大,分别较CK和F处理显著增加了57.04 kg·hm⁻²和45.99 kg·hm⁻²;对CO₂的平均排放通量而言,仅70FS处理降低了排放量,而其他秸秆与化肥配施均增加了CO₂的平均排放通量,其中60FS分别较CK和F处理显著提高了28.2%和30.6%;除100FS较F处理增加了CH₄的平均排放通量外,秸秆与化肥减量配施处理均降低了整个试验季的CH₄的平均排放通量.进一步计算温室气体的增温潜势(GWP):与CK和F处理相比,除70FS外,100FS、60FS和50FS均显著提高了GWP,其中100FS的GWP最高,分别显著提高了55.4%和44.0%,可见70FS处理较其他处理能降低温室气体的增温潜势.



不同小写字母表示同一种植季下不同处理间的差异显著($P < 0.05$);不同大写字母表示同一处理在不同种植季间的差异显著($P < 0.01$)

图7 秸秆与化肥配施下的CH₄累积排放通量的变化

Fig. 7 Cumulative emission for CH₄ under different treatments

表 1 秸秆与化肥配施下的N₂O排放系数及温室气体增温潜势的变化¹⁾

处理	平均排放通量/kg·hm ⁻²			EF(N ₂ O-N/N)/kg·kg ⁻¹			GWP(CO ₂ -e) /kg·hm ⁻²
	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	茼蒿	卷心菜	辣椒	
CK	3.72 ± 0.14e	55 537 ± 2 735c	2.00 ± 0.21a				56 695 ± 2 699d
F	15.57 ± 0.34d	56 544 ± 1 803c	1.66 ± 0.28b	0.005 ± 0.000d	0.015 ± 0.000d	0.019 ± 0.001c	61 225 ± 1 911d
100FS	60.76 ± 5.31a	69 992 ± 2 203ab	1.72 ± 0.04b	0.022 ± 0.001a	0.030 ± 0.000c	0.138 ± 0.017a	88 142 ± 3 786a
70FS	29.20 ± 1.29b	51 674 ± 2 102d	-0.32 ± 0.02c	0.016 ± 0.001b	0.042 ± 0.001b	0.064 ± 0.006b	60 368 ± 2 486d
60FS	22.85 ± 0.76c	72 507 ± 933a	-0.44 ± 0.05c	0.015 ± 0.001bc	0.029 ± 0.003c	0.062 ± 0.001b	79 305 ± 1 158b
50FS	23.42 ± 1.89c	66 384 ± 2 202ab	-0.55 ± 0.04c	0.008 ± 0.002d	0.047 ± 0.004a	0.076 ± 0.008b	73 349 ± 2 764c

1) 不同小写字母表示同一指标在不同处理间的差异显著($P < 0.05$)；EF 表示氮肥的N₂O排放系数；GWP 表示土壤的增温潜势

3 讨论

3.1 土壤N₂O排放

土壤N₂O是硝化和反硝化的产物,土壤通气状况和反应底物浓度是影响农田N₂O排放的主要因素^[22]. 秸秆作为有机物料,它的施用可以向土壤提供外源碳、氮和改变土壤温度、水分等,从而影响土壤微生物的活性,进而影响硝化和反硝化作用. 但是,关于秸秆还田对土壤N₂O排放的研究结果仍存在争议. 有研究表明,秸秆的施用提高了土壤C/N,促使微生物争夺利用土壤中的无机氮,从而减少了硝化和反硝化的底物,最终降低了土壤N₂O排放^[23];而叶桂香等^[18]的研究表明,秸秆还田能显著增加N₂O排放,且周年内N₂O排放总量随着秸秆还田量的增加呈增加趋势. 本研究中,与对照(CK)和常规施肥(F)相比,秸秆与化肥配施均不同程度地增加了土壤N₂O排放量,其中秸秆与全量化肥配施(100FS)处理的土壤N₂O排放量,随着化肥施用量的减少,土壤N₂O排放量呈递减趋势. 这是因为秸秆施入土壤后,一方面可以为微生物提供硝化和反硝化作用的底物参与N₂O产生;另一方面秸秆还田后,会增加土壤碳素含量,为微生物参与下的N₂O排放的硝化和反硝化过程提供充足的营养元素^[8,24],因此秸秆与化肥配施处理相较于常规施肥

处理提高了土壤N₂O排放量. 土壤的水分和温度是影响硝化和反硝化作用的重要环境因子,有研究表明,硝化作用的最适土壤温度为15~35℃,反硝化作用的最适土壤温度为5~75℃,土壤表层温度与土壤N₂O排放速率存在显著的相关关系^[25,26]. 在本试验条件下,各处理的土壤N₂O排放高峰主要集中在夏季,且辣椒季(2107年5~9月)的土壤N₂O排放通量明显高于茼蒿季和卷心菜季;通过相关性分析(表2),土壤N₂O排放量与气温、5 cm 土温均存在显著的相关关系;可能是夏季高温多雨,土壤中水分含量较高,土壤通气性变差,促使反硝化作用增强,从而减少了土壤微生物的活性、氮素不可移动性,最终促进了N₂O的产生和排放^[27]. 另外,秸秆施入土壤后具有一定的保墒作用,一方面阻断了表层热量向下层土壤扩散,另一方面也降低了向空气中的扩散,使土壤和空气间形成保护层,提高土壤表层温度^[28],因此秸秆与化肥配施处理的每季土壤N₂O排放量均高于常规施肥和对照,但由于秸秆还田提高了土壤C/N,从而促进微生物对氮素的固持作用,减少了N₂O产生所需要的氮基质,最终抑制土壤N₂O排放^[29],所以相对于秸秆与全量化肥配施(100FS)处理而言,秸秆与化肥减量配施处理的供氮水平低,在不影响作物生长的情况下,秸秆与化肥减量配施处理在一定程度上可以降低土壤N₂O排放.

表 2 温室气体排放与温度、含水量相关分析¹⁾

	5 cm 土温	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	气温	土壤含水量
5 cm 土温	1	0.142 *	0.519 **	0.172 **	0.975 **	-0.632 **
N ₂ O	0.142 *	1	0.192 **	0.020	0.281 *	0.076
CO ₂	0.519 **	0.192 **	1	0.096	0.703 **	-0.338 **
CH ₄	0.172 **	0.020	0.096	1	0.341 *	0.098
气温	0.975 **	0.281 *	0.703 **	0.341 *	1	-0.554 **
土壤含水量	-0.632 **	0.076	-0.338 **	0.098	-0.554 **	1

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

3.2 土壤 CO₂ 排放

秸秆与化肥配施处理均提高了莴笋季和卷心菜季的土壤 CO₂ 排放量,且在施肥灌水后均出现了排放峰,这与刘杏认等^[27]的研究结果相一致,其原因是施肥灌水后,为微生物提供了所需的营养物质,从而加速了土壤微生物呼吸释放 CO₂^[30];同时秸秆作为一种碳源丰富的物料,还田后通过腐解作用释放了大量营养,改变了土壤 C/N 比值,增强了土壤孔隙度,提高了微生物数量和活性,进而促进了作物生长和产生大量根系分泌物,最终在微生物和作物的双生物因素的影响下增加了土壤呼吸释放 CO₂^[31]. 在辣椒季,在常规施肥的基础上减施 30% (70FS) 可以显著降低土壤 CO₂ 排放量,而化肥减量 40% ~ 50% 相对于常规施肥增加了土壤 CO₂ 排放量. 这是因为在相同秸秆还田量的情况下,化肥减量 40% ~ 50% 处理的供氮水平较低,从而提高了土壤 C/N 比值,促使作物和微生物相互竞争氮源,最终刺激了微生物利用活性有机碳,增加微生物呼吸作用,提高土壤 CO₂ 排放量^[32]. 另外,该时期的水热条件比较适宜,相比其他秸秆与化肥配施处理,60FS 和 50FS 处理的秸秆通过腐解产生的 CO₂ 较高. 因此,仅 70FS 处理较 CK 和 F 处理降低了 CO₂ 累积排放通量 (2016 年 11 月至 2017 年 9 月),而其他秸秆与化肥配施处理均增加了 CO₂ 累积排放通量. 温度和土壤水分共同决定了土壤 CO₂ 排放的季节特征,尤其是 5cm 土壤温度能够解释土壤呼吸变化 82% ~ 94%,但水分对土壤 CO₂ 排放的影响具有复杂性与不确定性^[31~33]. 在整个试验期,辣椒季的土壤 CO₂ 累积排放通量明显高于卷心菜季和莴笋季 ($P < 0.01$),这与 Zhang 等^[34]的研究结果类似. 这是由于辣椒整个生育期表层土温普遍较高,且高温多雨的环境适宜秸秆腐解产生 CO₂,另外辣椒季的生育期明显高于莴笋季和卷心菜季,从而导致辣椒季的 CO₂ 累积排放通量明显高于其他两季作物.

3.3 土壤 CH₄ 排放

CH₄ 产生于严格的厌氧环境^[35],旱地土壤中,好氧的农田土壤环境有利于甲烷氧化菌生长,因此旱地土壤会氧化吸收地面大气的 CH₄,表现为大气 CH₄ 的汇^[36]. 本研究中,莴笋季和卷心菜季的土壤 CH₄ 排放量波动不明显,同时除 CK 外,各处理的土壤 CH₄ 累积排放量多为负值,表现为大气中 CH₄ 汇,与田慎重等^[37]的研究结果一致,这是因为产甲

烷菌的最适温度在 30 ~ 40℃,甲烷氧化菌的最佳温度为 20 ~ 30℃,温度过低时,产甲烷菌和甲烷氧化菌的活动会受到抑制^[36],由于莴笋季和卷心菜季的温度较低,与 CH₄ 有关的微生物活性不高,使得该种植时期的土壤 CH₄ 排放量波动不明显,另外秸秆还田后会降低土壤氧化还原电位,提高了 CH₄ 氧化潜势,从而秸秆与化肥配施处理的土壤 CH₄ 累积排放量多为负值^[38]. 辣椒季土壤 CH₄ 排放量波动大,并出现了排放峰值,且与对照 CK 和常规施肥 (F) 处理相比,秸秆与化肥减量 30% ~ 50% 配施处理均降低了辣椒季的土壤 CH₄ 排放量和累积排放通量,而 100FS 处理提高了 CH₄ 排放量和累积排放通量. 一方面是因为辣椒季高温多雨使得土壤干湿频繁交替,土壤的厌氧和氧化环境也频繁交替,从而导致甲烷氧化菌和产甲烷菌活性变化,最终使得辣椒季的土壤 CH₄ 排放量波动大;另一方面,施肥 (尤其是氮肥) 会增加土壤中硝态氮和铵态氮含量,由于铵态氮和甲烷的分子结构类似,均可以被甲烷单氧化酶所氧化,从而铵态氮的存在会抑制土壤对 CH₄ 的吸收^[39,40],因此在本研究中,在常规化肥减量 30% ~ 50% 基础上,与秸秆还田配施可以降低土壤 CH₄ 排放量和累积排放通量.

3.4 秸秆与化肥施用对化肥 N₂O 排放系数及温室气体增温潜势的影响

蔬菜生产中化学氮肥的投入量大,氮素循环强度高,损失途径多,损失量大,菜地通常被认为是 N₂O 的主要排放源^[41]. 利用不施肥对照处理的 N₂O 累积排放量作为 N₂O 背景排放,在三季作物种植过程中,秸秆与化肥配施处理的 N₂O 排放系数 (EF, 以 N₂O-N/N 计) 比常规施肥处理增加了 0.003 ~ 0.119 kg·kg⁻¹,这是由于与 F 处理相比,秸秆与化肥配施处理为微生物提供了丰富的营养物质,促进了土壤 N₂O 的排放,但在常规化肥减量 30% ~ 40% 基础上,可以缓解 N₂O 排放系数. 在整个观测期内,秸秆与化肥配施提高了 N₂O 和 CO₂ 的平均排放通量,尤其是秸秆与全量化肥配施 (100FS) 处理的效果最为显著;而秸秆与化肥减量配施可以明显减少 CH₄ 的平均排放通量. 由于不同温室气体 (N₂O、CO₂、CH₄) 的增温潜势不同,为定量衡量不同温室气体对全球变暖的相对影响,本研究采用 IPCC 确定的因素来评价 100a 尺度上秸秆与化肥配施处理的整个观测期内的温室气体的综合增温效应 (GWP)^[42]. 本研究中,对照 CK 的 GWP 低于其他处理,这与李路等^[43]的研究结果类似,这可能是因

为本研究中的 N_2O 对 GWP 的贡献率高于 CH_4 对 GWP 的贡献率,同时各处理(除 70FS 外)的 CO_2 平均排放通量高于 CK,所以各试验处理较 CK 均提高了综合增温效应。但与常规施肥(F)处理相比而言,仅 70FS 处理降低了 GWP,100FS、60FS 和 50FS 均显著提高了 GWP,特别是 100FS 处理明显提高了 GWP($P < 0.05$)。这是由于秸秆与化肥全量配施处理的 N_2O 、 CO_2 、 CH_4 的平均排放通量均高于其他处理,虽然 70FS 处理的 N_2O 平均排放通量较高,但 CO_2 和 CH_4 的平均排放通量明显低于其他处理。因此,化肥减量 30% 的基础上配施秸秆可以缓解温室气体的增温潜势。

4 结论

在整个试验观测期内,温室气体(N_2O 、 CO_2 、 CH_4)的排放具有一定的季节变化规律,3 种气体的排放高峰主要集中在 4~8 月,且在施肥灌水后均会出现气体的排放峰。秸秆与化肥配施较常规处理提高了土壤 N_2O 排放量,累积排放量以及 N_2O 排放系数,其中 100FS 处理的效果最为明显。70FS 处理较 CK 和 F 处理降低了土壤 CO_2 排放量和累积排放量,分别为 $55.28 \sim 1\,831.62 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $7\,502.13 \sim 25\,988.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而其他秸秆与化肥配施处理均增加了 CO_2 累积排放通量。对土壤 CH_4 排放而言,除 CK 外,各处理的土壤 CH_4 累积排放量多为负值,表现为大气中 CH_4 汇;秸秆与化肥减量 30%~50% 配施处理均降低了辣椒季的土壤 CH_4 排放量和累积排放通量,而 100FS 处理提高了 CH_4 排放量和累积排放通量。与 CK 和 F 处理相比,除 70FS 降低了 GWP 外,其他处理均显著提高了 GWP,其中 100FS 的 GWP 最高。总体上,从温室气体排放角度,在常规化肥施用的基础上减量 30% 再与秸秆配施可以减地土壤 CO_2 和 CH_4 排放,缓解温室气体的增温潜势,而对土壤 N_2O 减排效果不显著。

参考文献:

- [1] 祁乐,高明,郭晓敏,等. 生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2351-2359.
Qi L, Gao M, Guo X M, *et al.* Effects of biochar application rates on greenhouse gas emission in the purple paddy soil[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2351-2359.
- [2] Metz B, Davidson O R, Bosch P R, *et al.* Climate change 2007: mitigation. contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Ti C P, Luo Y X, Yan X Y. Characteristics of nitrogen balance in open-air and greenhouse vegetable cropping systems of China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(23): 18508-18518.
- [4] Wang J Y, Xiong Z Q, Yan X Y. Fertilizer-induced emission factors and background emissions of N_2O from vegetable fields in China[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(38): 6923-6929.
- [5] Huang Y, Tang Y H. An estimate of greenhouse gas (N_2O and CO_2) mitigation potential under various scenarios of nitrogen use efficiency in Chinese croplands[J]. Global Change Biology, 2010, **16**(11): 2958-2970.
- [6] Huang R, Lan M L, Liu J, *et al.* Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(36): 27942-27952.
- [7] 逯非,王效科,韩冰,等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(1): 99-108.
Lu F, Wang X K, Han B, *et al.* Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, **21**(1): 99-108.
- [8] Zhu T B, Zhang J B, Yang W Y, *et al.* Effects of organic material amendment and water content on NO , N_2O , and N_2 emissions in a nitrate-rich vegetable soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, **49**(2): 153-163.
- [9] 张翰林,吕卫光,郑宪清,等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作系统温室气体排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(3): 302-308.
Zhang H L, Lyu W G, Zheng X Q, *et al.* Effects of years of straw return to soil on greenhouse gas emission in rice/wheat rotation systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, **23**(3): 302-308.
- [10] Shan J, Yan X Y. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils[J]. Atmospheric Environment, 2013, **71**: 170-175.
- [11] 刘四义,梁爱珍,杨学明,等. 不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO_2 排放和微生物量的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2686-2694.
Liu S Y, Liang A Z, Yang X M, *et al.* Effects of different residue part inputs of corn straws on CO_2 efflux and microbial biomass in clay loam and sandy loam black soils[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2686-2694.
- [12] Naser H M, Nagata O, Tamura S, *et al.* Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, **53**(1): 95-101.
- [13] Liu C, Lu M, Cui J, *et al.* Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2014, **20**(5): 1366-1381.
- [14] Khosa M K, Sidhu B S, Benbi D K. Effect of organic materials and rice cultivars on methane emission from rice field[J]. Journal of Environmental Biology, 2010, **31**(3): 281-285.
- [15] 陈苇,卢婉芳,段彬伍,等. 稻草还田对晚稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 2002, **39**(2): 170-176.
Chen W, Lu W F, Duan B W, *et al.* Effect of rice straw manure on methane emission in late-rice paddy fields[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, **39**(2): 170-176.
- [16] 张福锁,陈新平,陈青,等. 中国主要作物施肥指南[M].

- 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- Zhang F S, Chen X P, Chen Q, *et al.* The guidelines of fertilization in China's major crops [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.
- [17] 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3393-3400.
- Guo Y L, Wang D D, Zheng J Y, *et al.* Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in Semi-arid region[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3393-3400.
- [18] 叶桂香, 史永晖, 王良, 等. 秸秆还田的小麦-玉米农田 N_2O 周年排放的量化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(3): 589-596.
- Ye G X, Shi Y H, Wang L, *et al.* Quantitative analysis of straw returning on annual soil N_2O emission in the wheat-maize rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(3): 589-596.
- [19] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [20] 林峰. 有机肥和化肥施用对大棚菜地 N_2O 和 NO 排放影响的观测研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- Lin F. Effect of chemical and organic fertilizer on N_2O and NO emissions from greenhouse vegetable fields [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [21] 杨剑虹, 王成林, 代淳林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- Yang J H, Wang C L, Dai H L. Agrochemical soil analysis and environmental monitoring [M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [22] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 792-800.
- Zhu Y G, Wang X H, Yang X R, *et al.* Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 792-800.
- [23] Li P, Lang M, Li C L, *et al.* Nitrous oxide and carbon dioxide emissions from soils amended with compost and manure from cattle fed diets containing wheat dried distillers' grains with solubles[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2017, **97**(3): 522-531.
- [24] Yang H S, Xu M M, Koide R T, *et al.* Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, **96**(4): 1141-1149.
- [25] Laville P, Lehuger S, Loubet B, *et al.* Effect of management, climate and soil conditions on N_2O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, **151**(2): 228-240.
- [26] Kurganova I N, de Gerenyu V O L. Effect of the temperature and moisture on the N_2O emission from some arable soils [J]. Eurasian Soil Science, 2010, **43**(8): 919-928.
- [27] 刘杏认, 张星, 张晴雯, 等. 施用生物炭和秸秆还田对华北农田 CO_2 、 N_2O 排放的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(20): 6700-6711.
- Liu X R, Zhang X, Zhang Q W, *et al.* Effects of biochar and straw return on CO_2 and N_2O emissions from farmland in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(20): 6700-6711.
- [28] 蒋向, 任洪志, 贺德先. 玉米秸秆还田对土壤理化性状与小麦生长发育和产量的影响研究进展[J]. 麦类作物学报, 2011, **31**(3): 569-574.
- Jiang X, Ren H Z, He D X. Research progress on effects of returning maize straws into soil on soil physical & chemical characters and on development and yield of wheat as succeeding crop[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, **31**(3): 569-574.
- [29] 宋贺, 王成雨, 陈清, 等. 长期秸秆还田对设施菜田土壤反硝化特征和 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业气象, 2014, **35**(6): 628-634.
- Song H, Wang C Y, Chen Q, *et al.* Effects of long-term amendment of residue on denitrification characteristics and N_2O emissions in greenhouse soil [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, **35**(6): 628-634.
- [30] 贺美, 王立刚, 王迎春, 等. 长期定位施肥下黑土呼吸的变化特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2018, **34**(4): 151-161.
- He M, Wang L G, Wang Y C, *et al.* Characteristic of black soil respiration and its influencing factors under long-term fertilization regimes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, **34**(4): 151-161.
- [31] 田冬, 高明, 黄容, 等. 油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- Tian D, Gao M, Huang R, *et al.* Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2988-2999.
- [32] Schulze E D, Luyssaert S, Ciais P, *et al.* Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance [J]. Nature Geoscience, 2009, **2**: 842-850.
- [33] Knorr W, Prentice I C, House J I, *et al.* Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming[J]. Nature, 2005, **433**(7023): 298-301.
- [34] Zhang Y J, Lin F, Jin Y G, *et al.* Response of nitric and nitrous oxide fluxes to N fertilizer application in greenhouse vegetable cropping systems in southeast China [J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 20700.
- [35] 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 等. 地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4790-4799.
- Shi J L, Hao Q J, Feng D, *et al.* Effects of plastic film mulching on methane and nitrous oxide emissions from a rice-rape seed crop rotation [J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4790-4799.
- [36] 张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 等. 地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3451-3462.
- Zhang K L, Hao Q J, Feng D, *et al.* Effect of plastic film mulching on methane emission from a vegetable field [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3451-3462.
- [37] 田慎重, 宁堂原, 李增嘉. 不同耕作措施对华北地区麦田 CH_4 吸收通量的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(2): 541-

- 548.
- Tian S Z, Ning T Y, Li Z J. Effect of CH₄ uptake flux under different tillage systems in wheat field in the North China Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(2): 541-548.
- [38] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 秸秆不同还田模式对玉米田温室气体排放和碳固定的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(11): 2228-2235.
- Li X H, Zhu Z L, Dong H Y. *et al.* Effects of different return modes of wheat straws on greenhouse gas emissions and carbon sequestration of maize fields [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(11): 2228-2235.
- [39] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(3): 297-307.
- Song L N, Zhang Y M, Hu C S, *et al.* Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(3): 297-307.
- [40] Chan A S K, Steudler P A. Carbon monoxide uptake kinetics in unamended and long-term nitrogen-amended temperate forest soils [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, **57**(3): 343-354.
- [41] Zhu T B, Zhang J B, Cai Z C. The contribution of nitrogen transformation processes to total N₂O emissions from soils used for intensive vegetable cultivation [J]. *Plant and Soil*, 2011, **343**(1-2): 313-327.
- [42] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis: working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [43] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 不同时期施用生物炭对稻田 N₂O 和 CH₄ 排放的影响[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(4): 839-848.
- Li L, Zhou Z Q, Pan X J, *et al.* Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(4): 839-848.



CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamnox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(Comammox <i>Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)