

# 有机物料等氮量施用对紫色土氮形态及温室气体排放的影响

黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 王富华, 李娇, 陈仕奇

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 【目的】在等氮施用的条件下, 研究几种农业有机物料与化肥配合施用对蔬菜连作种植模式的菜地土壤氮形态及温室气体的动态变化的影响, 为菜地化肥减量施用及绿色环保提供科学依据。并从温室气体减排角度, 为旱地土壤的培肥提供理论参考。【方法】通过田间原位试验, 设置了对照即不添加化肥和物料 (CK)、常规化肥 (F)、秸秆+化肥 (SF)、菌渣+化肥 (MF)、生物质炭+化肥 (BF)、牛粪+化肥 (CF) 等处理, 分析土壤铵态氮、硝态氮、碱解氮和全氮分布特征。同时采用静态箱-气相色谱法, 对比分析在化肥减量的基础上, 添加物料处理的紫色土 (莴笋-卷心菜-辣椒轮作)  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  动态变化和温室效应。【结果】等养分投入的条件下, 有机物料的添加改变土壤氮形态分布, SF 和 MF 处理主要在料还田前期能增加土壤铵态氮含量, CF 处理能提高莴笋和卷心菜季的土壤铵态氮含量, BF 处理则提高了辣椒季硝态氮和碱解氮含量。在整个试验观测期内,  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  3 种气体的排放具有一定的季节变化规律, 各气体均在夏季出现了排放高峰, 且在施肥灌水后也会出现气体的排放峰。与 F 处理相比, 试验期内 BF 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  平均排放量降低了 7.5%, 而 CF 处理则显著增加了 233.5%。有机物料与化肥配施较 CK 和 F 处理增加了  $\text{CO}_2$  排放, 其中 MF 和 CF 处理最为明显, 平均排放通量较 F 处理分别提高了 35.6% 和 31.3%, BF 处理则推迟  $\text{CO}_2$  排放峰, 且在高温多雨的夏季增加  $\text{CO}_2$  排放量。各处理的  $\text{CH}_4$  排放多为负值, 表现为大气中  $\text{CH}_4$  汇, 且在辣椒季波动较为明显, 其中 BF 处理在高温多雨的短期内可达到  $\text{CH}_4$  排放峰值 ( $668.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ); SF、MF 和 BF 较 F 处理的  $\text{CH}_4$  平均排放通量分别显著下降了 104.85%、175.2% 和 77.5%, 其中 SF 和 MF 处理分别为  $-0.1$  和  $-1.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 较其他处理能促进  $\text{CH}_4$  吸收, 减少  $\text{CH}_4$  产生和排放。但有机物料与化肥配施处理的温室气体的增温潜势较 CK 和 F 处理分别增加了 26.7%—52.4% 和 18.1%—42.0%, 其中 SF 处理的增温潜势最低, 其次为 BF 处理。【结论】不同的有机物料对土壤氮形态分布及  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  排放的影响各不相同。几种有机物料中, 生物质炭、秸秆与化肥配施还田相较于其他处理能增加有效氮含量, 减少温室气体的排放, 而牛粪与化肥配施则会增加温室气体排放。

**关键词:** 紫色土; 有机物料; 氮形态; 温室气体; 增温潜势

## Effects of Combined Application of Various Organic Materials and Chemical Fertilizer on Soil Nitrogen Formation and Greenhouse Gas Emission Under Equal Nitrogen Rates from Purple Soil

HUANG Rong, GAO Ming, LI JiaCheng, XU GuoXin, WANG FuHua, LI Jiao, CHEN ShiQi

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

**Abstract:** 【Objective】In this study, the effects of agricultural organic materials combined with chemical fertilizer on soil nitrogen species (ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, available nitrogen and total nitrogen) and greenhouse gases (carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), methane ( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ )) emission were investigated to provide knowledge for chemical fertilizer reduction and friendly environment according to the same nitrogen rate addition. From the aspect of greenhouse gases mitigation, theoretical

收稿日期: 2018-04-02; 接受日期: 2018-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0800101)

联系方式: 黄容, E-mail: 277840241@qq.com. 通信作者高明, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

suggestions were also provided for dry land fertilization strategy. 【Method】 A vegetable rotation cropping experiment (lettuce-cabbage-chili rotation) with six treatments was carried out on purple soil in the field, and the treatments were control without any chemical fertilizer and organic material (CK), conventional fertilizing (F), straw returning with chemical fertilizing (SF), mushroom dregs returning with chemical fertilizing (MF), biochar returning with chemical fertilizing (BF), and cow dung returning with chemical fertilizing (CF). The variations of mineral nitrogen, available nitrogen and total nitrogen contents and the emissions of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  from soil were monitored from November 2016 to September 2017. 【Result】 In the condition of equal nitrogen rates, organic materials could change the formation of soil nitrogen. The contents of ammonium nitrogen increased after organic materials application in SF and MF treatments. CF treatment could increase the content of ammonium nitrogen during lettuce and cabbage growth seasons, and BF treatment increased the content of nitrate nitrogen and available nitrogen during chili growth season. Seasonal dependent  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission was found and high emission mainly occurred during summer. Fertilization and irrigation events also increased  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission. Compared with F treatment,  $\text{N}_2\text{O}$  emission reduced by 7.5% under BF treatment, but significantly increased by 233.5% under CF treatment. Combined application of organic materials and chemical fertilizer could increase the  $\text{CO}_2$  emission. Significant increases of  $\text{CO}_2$  emission were found under MF and CF treatments, which increased the mean  $\text{CO}_2$  emission flux of 35.6% and 31.3% compared with F treatment, respectively. However, biochar returning delayed the emission peak of  $\text{CO}_2$  and increased the  $\text{CO}_2$  emission during summer. Negative  $\text{CH}_4$  emission was found in most treatments, indicating a  $\text{CH}_4$  adsorption by soil itself. Moreover, the emission of  $\text{CH}_4$  fluctuated during the chili growth season and the highest  $\text{CH}_4$  emission ( $668.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) appeared under BF treatment with the condition of high temperature and intensive precipitation. However, the mean  $\text{CH}_4$  emission flux under SF, MF and BF increased significantly by 104.85%, 175.2% and 77.5%, respectively. Moreover, SF and MF treatment could promote  $\text{CH}_4$  consumption and reduce mean  $\text{CH}_4$  emission flux of  $-0.1$  and  $-1.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , respectively. Compared with CK and F treatment, organic materials combined with chemical fertilizer application could increase the global warming potential (GWP) by 26.7%-52.4% and 18.1%-42.0% respectively. The lowest GWP was found under SF treatment. 【Conclusion】 Combined application of organic materials and chemical fertilizer had different greenhouse gases emission characters and soil nitrogen speciation. Biochar and straw returning combined with chemical fertilizer could reduce the greenhouse gases emission and increase available nitrogen content. However, cow dung returning with chemical fertilizing increased greenhouse gases emission.

**Key words:** purple soil; organic materials; nitrogen speciation; greenhouse gases; global warming potential

## 0 引言

【研究意义】全球气候变暖是当今世界面临的重要挑战,  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体 (GHG) 浓度的变化是影响气候变暖的重要驱动因子<sup>[1]</sup>。农田生态系统是温室气体重要的排放源。我国土壤施肥 (尤其是氮肥) 量大, 菜地土壤的氮肥施用量是其他农作物土壤的 4 倍多<sup>[2]</sup>, 但氮肥利用率约 30%, 剩余的氮肥或转为温室气体, 或转为硝态氮等进入水体成为污染源<sup>[3]</sup>; 同时过多的氮投入会限制未来农田的碳封存<sup>[4]</sup>。据估算, 菜地土壤因施肥产生的  $\text{N}_2\text{O}$  直接排放量高达 6.7 万吨<sup>[5]</sup>。作物可以择优吸收土壤中不同的氮组分, 其中矿质氮是作物吸收的最主要氮源, 可以被作物直接吸收利用<sup>[6]</sup>。我国每年的农业废弃物产量大且品种多, 包括秸秆、菇渣、牛粪等; 但大部分以焚烧、直接丢弃或流入水体的形式流失, 不仅污染环境而且也造成 GHG 排放<sup>[7]</sup>。农业废弃物富含氮、磷、钾等营养元素<sup>[8]</sup>, 将其归还到田间, 不仅可以替代部分化肥, 减少化肥的施用, 提高氮素利用率, 而且对改善因施

用化肥 (尤其是氮肥) 和农业废弃物处理所带来的生态环境问题, 控制化肥投入以缓解农田土壤温室气体排放具有重要的意义。【前人研究进展】秸秆、菌渣、生物质炭、畜禽粪便是重要的农业资源, 其还田虽能增加农田固碳, 提高土壤质量, 但有机物料成分不同会影响其施用到农田后的温室气体排放<sup>[9]</sup>。有研究表明, 秸秆与化肥减量 30% 配施处理能降低土壤  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  排放, 缓解温室气体的增温潜势, 但对土壤  $\text{N}_2\text{O}$  减排效果不显著<sup>[10]</sup>; 秸秆配施 70%—80% 的化肥, 可以有效提高土壤碱解氮含量<sup>[11]</sup>。段鹏鹏等<sup>[12]</sup>研究表明, 氮肥与有机肥配合施用能显著提高矿质氮的含量。菌渣作为农业加工系统的产物, 其富含营养物质, 石生伟等<sup>[13]</sup>研究表明, 腐熟的菌渣配施化肥后, 不仅可以大幅度降低稻田的整体温室效应, 而且能够替代部分化肥, 保持高产。而李栢锦等<sup>[7]</sup>对比几种有机物料还田发现, 菌渣+无机肥处理较无机肥处理增加了土壤温室气体排放, 且全球增温潜势高于秸秆处理。张斌等<sup>[14]</sup>连续两年观测了生物质炭配施氮肥的管理对温室气体排放影响发现, 高量施用生物质炭可以增加

土壤氮素, 显著降低稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  痕量温室气体排放的综合温室效应; 同时范靖尉等<sup>[15]</sup>研究表明在集约化农田减氮 20%, 不仅对作物的产量无显著影响, 而且能降低农田土壤温室气体排放, 但生物质炭对温室气体的排放与气候条件、土壤类型、生物质炭种类及其施用年限等因素密切相关<sup>[15-17]</sup>。张旭博等<sup>[18]</sup>研究表明, 秸秆的可溶性碳含量高, 能较快被微生物利用, 增强土壤呼吸, 因此动物类有机肥(猪粪、牛粪等)较秸秆类有机物料能较快提高土壤碳、氮源的有效性, 增强微生物活性, 促进养分转化和释放, 显著降低了  $\text{CO}_2$  排放量。【本研究切入点】尽管, 有机物料还田可以替代部分化肥, 减少化肥的施用量, 但是有机物料还田对农田土壤温室气体排放的研究结果存在不完全一致性<sup>[19-22]</sup>, 且研究对象主要集中在水田, 对旱地土壤尤其是菜地土壤的研究较少。不同有机物料(如秸秆、动物有机肥等)还田后, 对土壤氮形态的影响也不同; 且施入不同有机物料后的温室气体排放量尚不明确<sup>[18]</sup>。【拟解决的关键问题】本文拟通过田间试验, 对蔬菜连作种植模式的菜地进行了不同有机物料等氮量施用处理下的土壤氮形态分布及土壤温室气体排放观测研究, 以期为合理利用农业资源, 且通过控制化肥投入以减少旱地农田温室气体排放提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及试验材料

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  $18.3^\circ\text{C}$ 。最高和最低气温平均为  $28.7^\circ\text{C}$  和  $7.7^\circ\text{C}$ ,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的积温  $6\ 006^\circ\text{C}$ , 年降雨量 1 086.6 mm, 年日照时数 1 276.7 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  $11.12\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $83.02\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $44.10\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $208.75\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , pH 为 5.8。试验用秸秆为玉米秸秆, 取自试验基地农田, 其有机碳含量  $338.8\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 氮含量  $10.1\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , C/N=33.9, 磷含量  $2.2\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 钾含量  $1.3\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 经晒干后粉碎机粉碎成 5—10 cm 颗粒, 备用。试验用菌渣取自重庆梨木食用菌专业合作社, 为收获金针菇后的废弃菌棒, 经晒干粉碎后还田, 其有机碳含量  $391.2\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 氮含量  $11.2\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , C/N=34.9, 磷含量  $1.9\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 钾含量  $0.5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验用生物质炭以油菜秸秆为原料,  $500^\circ\text{C}$  高温厌氧条

件下热解 2 h 烧制, 由四川省久晟农业有限公司提供, 其有机碳含量  $625.8\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 氮含量  $4.4\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , C/N=142.2, 磷含量  $1.0\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 钾含量  $10.4\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验用牛粪采自重庆北碚澄江上马台村天友乳业, 经晒干粉碎后还田, 其有机碳含量  $428.8\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 氮含量  $21.2\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , C/N=20.2, 磷含量  $5.9\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 钾含量  $1.2\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

试验共设置 6 个处理: 对照即不添加化肥和物料(CK)、常规化肥(F)、 $12\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  秸秆配施化肥(SF)、 $9\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  菌渣配施化肥(MF)、 $10\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  生物质炭配施化肥(BF)、 $20\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  牛粪配施化肥(CF)。每个处理 3 次重复, 采用随机区组排列在 18 个  $2\ \text{m}\times 1\ \text{m}$  能独立排灌的微区内, 各个微区的水肥管理均相同。

试验于 2016 年 10 月开始, 共种植 3 季蔬菜(莴笋、卷心菜、辣椒), 施用两次有机物料, 分别在种植莴笋和辣椒前将秸秆、菌渣、生物质炭、牛粪均匀撒覆在土壤表面并进行翻耕, 深度为 30—40 cm, 同时对照 CK 和常规处理 F 也进行同样的翻耕。各作物(莴笋、卷心菜、辣椒)的氮、磷、钾肥的常规施用量按《中国主要作物施肥指南》<sup>[23]</sup>化肥施用量, 有机物料与化肥配施处理按照《中国主要作物施肥指南》的常规使用量的基础上减去有机物料中的含氮、磷、钾量, 再补施一定量的化肥, 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。氮、磷、钾化肥品种分别为尿素(N46%)、过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$  12%)、氯化钾( $\text{K}_2\text{O}$  60%)。具体种植及施肥方式见表 1。

### 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<sup>[24]</sup>。采样箱材质为不锈钢材料, 由底座和顶箱两部分组成, 底座(横截面为  $50\ \text{cm}\times 50\ \text{cm}$ )长期固定于田间, 翻耕时将底座取出, 翻耕结束后重新将底座安置回原处, 底壁插入土中约 10 cm, 底座内种植作物。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 9:00—11:00 间进行, 采样时用 60 mL 注射

表 1 种植及施肥情况  
Table 1 Planting and fertilization

蔬菜 Vegetable	常规需氮(N)量 Conventional nitrogen requirement (kg·hm <sup>-2</sup> )	常规需磷(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )量 Conventional phosphate requirement (kg·hm <sup>-2</sup> )	常规需钾(K <sub>2</sub> O)量 Conventional potassium requirement (kg·hm <sup>-2</sup> )	种植及施肥情况 Planting and fertilization
莴笋 Lettuce	300	90	150	2016 年 10 月 20 日施入有机物料并翻耕, 10 月 27 日移栽莴笋苗, 10 月 30 日施基肥(氮肥 60%, 磷肥和钾肥一次性施入), 12 月 9 日追肥(氮肥 40%), 2017 年 1 月 9 日收获莴笋 Organic material was incorporated into soil and plowed on 20 October 2016. The lettuce was transplanted on 27 October 2016. A total of P and K fertilizers were applied as basis along with 60% of N fertilizer on 30 October 2016, and 40% of N fertilizer was applied on 9 December 2016. The lettuce was harvested on 9 January 2017
卷心菜 Cabbage	300	70	300	2017 年 1 月 10 日施基肥(氮肥 40%, 钾肥 40%, 磷肥一次性施入), 1 月 11 日移栽卷心菜苗, 2 月 21 日第一次追肥(氮肥 30%, 钾肥 30%), 3 月 27 日第二次追肥(氮肥 30%, 钾肥 30%), 5 月 4 日收获卷心菜 A total of P fertilizer, 40% of N fertilizer and 40% of K fertilizer was applied as basis on 10 January 2017. The cabbage was transplanted on 1 January 2017. The remaining N and K fertilizers were split into two parts of the same amount and top-dressed on 21 February and 27 March 2017, respectively. The cabbage was harvested on 4 May 2017
辣椒 Chili	300	80	150	2017 年 5 月 5 日施入有机物料并翻耕, 5 月 10 日施基肥(氮肥 50%, 钾肥 50%, 磷肥一次性施入), 5 月 11 日移栽辣椒苗, 6 月 19 日追肥(氮肥 50%, 钾肥 50%), 7 月 20 日、8 月 18 日、9 月 14 日收获辣椒 Organic material was incorporated into soil and plowed on 5 May 2017. A total of P fertilizer, 50% of N fertilizer and 50% of K fertilizer was applied as basis on 10 May 2017. The chili was transplanted on 11 May 2017. The remaining of N and K fertilizers were applied on 19 June 2017. The chili was harvested on 20 July, 18 August and 14 September 2017, respectively

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, 并采集表层土样测定土壤含水量、铵态氮及硝态氮含量, 于每个月采集土样测定土壤碱解氮含量, 待作物收获后采集表层土壤测定土壤总氮含量。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。

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<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 浓度。高纯氮气(N<sub>2</sub>)与氩甲烷(ArCH<sub>4</sub>)分别作为 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的载气。N<sub>2</sub>O 检测器为 ECD(电子俘获检测器), 检测温度 300℃; CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>检测器为 FID(火焰离子化检测器), 检测温度为 300℃, 柱温 50℃, 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[16]。

温室气体排放量( $f$ )的计算公式<sup>[10]</sup>为:

$$f = \rho \times (V/A) \times (\Delta C/\Delta t) \times [273/(273+T)] \tag{1}$$

式中,  $f$  表示 CO<sub>2</sub>排放量 (mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)、N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>排放量 (μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>);  $\rho$  表示标准状态下 CO<sub>2</sub>-C、CH<sub>4</sub>-C 和 N<sub>2</sub>O-N 的密度;  $V$  为采样箱体积 (m<sup>3</sup>);  $A$  为采样底座内土壤表面积 (m<sup>2</sup>);  $\Delta C/\Delta t$  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 (℃)。

各处理每次排放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量的加权和表示。

全球增温潜势(Global Warming Potential, GWP): 表示不同温室气体排放的综合指标, 一般以  $\text{CO}_2$  为标准, 用  $\text{CO}_2$  当量表示。计算公式为<sup>[25]</sup>:

$$\text{GWP} = \text{CO}_2 + 28 \times \text{R}(\text{CH}_4) + 265 \times \text{R}(\text{N}_2\text{O}) \quad (2)$$

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

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,  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{NaHCO}_3$  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; 土壤总氮采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消煮, 蒸馏滴定测定; 土壤铵态氮和硝态氮采用  $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  KCl 提取, 取滤液分别用靛酚蓝比色法和紫外分光光度计法测定; 土样具体测定详细步骤参见文献[26]。

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 ( $P < 0.05$ ), 采用重复测定方差分析方法比较不同蔬菜季、试验处理及其交互作用对温室气体累积排放量的影响 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果

### 2.1 有机物料等氮量施用对土壤氮形态的影响

2.1.1 铵态氮 如图 1-A 所示, 在每次施肥和追肥一周内, 各处理 (除 CK 外) 的土壤铵态氮含量均出现峰值, 随后呈下降趋势, 可见施肥在短期内可以有效提高土壤铵态氮含量。莴笋季, 施基肥一周内 (2016 年 10 月 30), MF 处理的铵态氮含量出现了最高值 ( $96.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 相较于 F 处理的最高值增加了 34.4%; 在追肥后 (2016 年 12 月 9 日), BF 处理的铵态氮含量达到最高值, 为  $160.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。卷心菜季, 第一追肥后 (2017 年 2 月 21 日), MF、BF 和 CF 处理的铵态氮含量在一周内出现峰值后呈下降趋势, 而 F 和 SF 处理的铵态氮含量均超过了  $95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 在第二次追肥后 (3 月 27 日), F 处理的铵态氮含量达到最高值 ( $114.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 而各有机物料处理的铵态氮含量均低于  $78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。辣椒季, CF 处理的铵态氮含量低于其他处理 (除 CK 外), 而 F 处理的土壤铵态氮含量普遍较高 ( $72.35\text{—}161.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

2.1.2 硝态氮 试验期内, 土壤硝态氮含量的动态变化类似于铵态氮, 主要表现为在施肥和追肥后, 各处理 (除 CK 外) 的硝态氮含量出现了峰值。如图 1-B

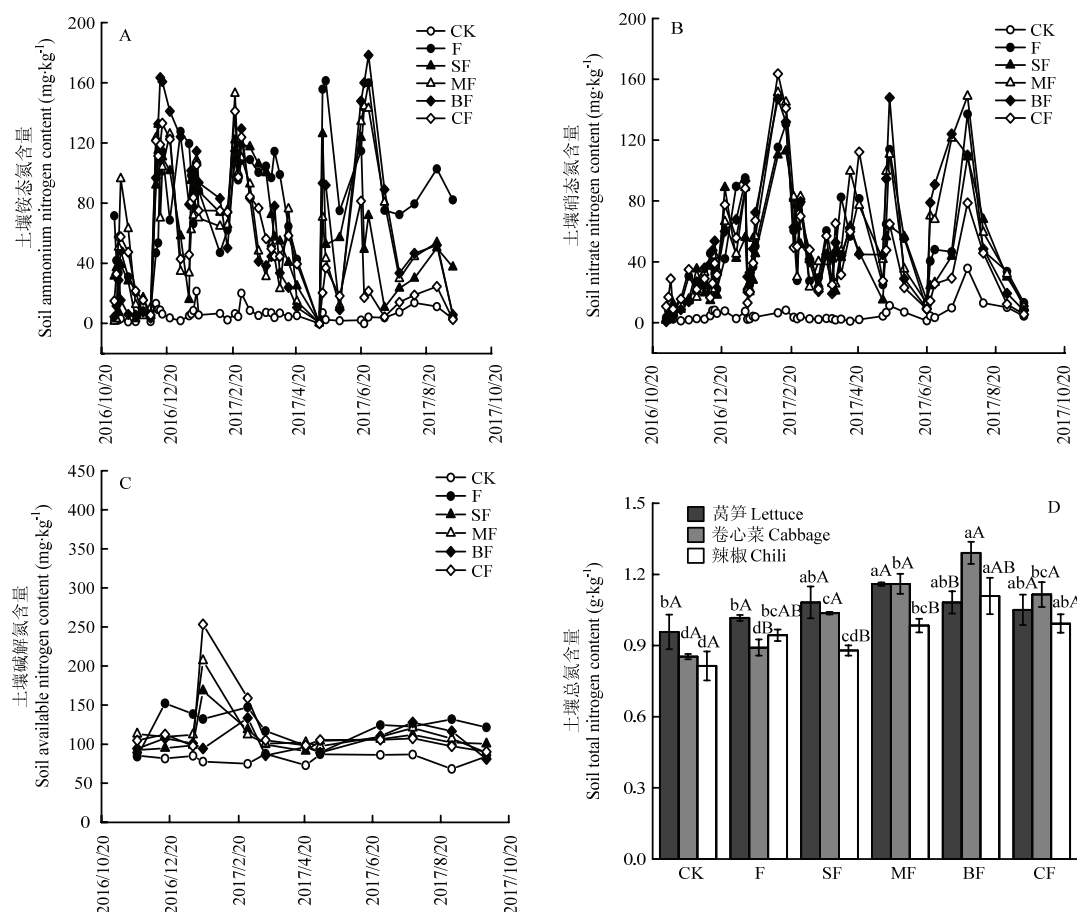
所示, 莴笋季, 基肥施用后, 各试验处理的硝态氮含量相比铵态氮而言峰值推迟, CF 处理的硝态氮在基肥施用一周内的含量变化 ( $8.91\text{—}28.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 高于其他处理。卷心菜季, 各试验处理的硝态氮含量的峰值仍约处在基肥施用一个月后 (2017 年 2 月 15 日), 其中 CF 处理土壤硝态氮含量最高, 较 F 处理提高了 41.9%。辣椒季, 各试验处理的硝态氮含量出现了两次明显的峰值, 第一次峰值为基肥施用一周后, 其中 BF 处理在出现了辣椒生育期的硝态氮含量的最高值 ( $147.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 比同期的 F 处理增加了 30.0%; 第二次峰值为追肥一个月后 (2017 年 7 月 26 日), 其中 MF 处理的硝态氮含量最高 ( $148.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 而 CF 处理最低 ( $78.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

2.1.3 碱解氮 如图 1-C 所示, 与 CK 相比, 各试验处理的土壤碱解氮含量均增高, 可见施肥可以增加土壤碱解氮的含量。莴笋季和辣椒季, F 处理的土壤碱解氮含量普遍高于有机物料还田处理, 最高可达  $152.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。卷心菜季, CF 处理的碱解氮含量的最高值, 较同期 F 处理增加了 91.6%, 其次为 MF 处理 (增加 56.5%)。总体上, 试验期内, F 处理的碱解氮含量的平均值最高 ( $115.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 其次为 CF 处理, 而 BF 处理的碱解氮含量的平均值较低 ( $99.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

2.1.4 总氮 从图 1-D 可以看出, 同一处理下, 不同作物生育期内土壤总氮含量存在差异, 其中对照 CK、CF 处理的三季作物间的土壤总氮含量差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 而 SF 和 MF 处理的总氮含量随着试验时间的增加呈下降趋势, 且辣椒季的土壤总氮明显低于前两季作物。在同一作物生物期内, 除辣椒季的 SF 处理外, 各有机物料处理的土壤总氮含量均高于对照 CK 和 F 处理; 其中莴笋季的 MF 处理较 F 处理明显提高了 14.0%, 卷心菜季的有机物料处理的土壤总氮含量比 F 处理显著增加了  $0.15\text{—}0.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 随着种植时间的增加, 辣椒季, 仅 BF 处理较 F 处理显著增加了  $0.17 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 有机物料等氮量施用对 $\text{N}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$ 及 $\text{CH}_4$ 排放量的影响

2.2.1  $\text{N}_2\text{O}$  排放量 如图 2-A 所示, 各处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放高峰主要集中在 4—7 月, 且每次化肥施用后均会提高  $\text{N}_2\text{O}$  排放量。与对照 CK 相比, 常规化肥施用和有机物料配施化肥处理均提高了  $\text{N}_2\text{O}$  排放量, 其中 CF 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量明显高于其他处理, 其次为 MF 和 SF 处理, 尤其是在牛粪刚施入的一周内 (2016 年 11 月 3



图中不同的小写字母表示处理间达到显著差异 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示季节间达到显著差异 ( $P < 0.01$ )

The different small letters indicate significant differences between treatments at  $P < 0.05$ . The different capital letters indicate significant differences between planting at  $P < 0.01$

图 1 不同处理下的土壤氮形态变化

Fig. 1 Changes of soil nitrogen formation under different treatments

日和 2017 年 5 月 15 日) 出现排放高峰, 分别为  $1\,239.8$  和  $3\,933.6\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。与 F 处理相比, SF、MF 和 CF 均提高了  $\text{N}_2\text{O}$  排放量, 而 BF 处理能降低  $\text{N}_2\text{O}$  排放量, 试验期内平均降低了 7.5%。

**2.2.2  $\text{CO}_2$  排放量** 如图 2-B 所示, 卷心菜季 (2017 年 1—5 月) 和辣椒季 (2017 年 5—9 月) 的  $\text{CO}_2$  排放量高于莴笋季 (2016 年 10 月—2017 年 1 月), 试验期内,  $\text{CO}_2$  排放出现了两次峰值, 分别出现在 2017 年 3—4 月和 8 月。莴笋季前期即第一次有机物料施用后, MF 处理的  $\text{CO}_2$  排放量明显高于其他处理, 最高可达  $1\,219.5\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 其次为 CF 处理。F、SF、MF 和 CF 处理在 2017 年 3 月 28 日前后出现了  $\text{CO}_2$  第一次排放峰值, BF 处理则推迟了  $\text{CO}_2$  第一次排放峰值 (2017 年 4 月 13 日)。试验期内, MF 处理的  $\text{CO}_2$  平均排放

量最大 ( $962.9\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), 其次为 CF, BF 和 SF, 分别较 F 处理提高了 39.3%、28.9%、25.3% 和 16.5%。

**2.2.3  $\text{CH}_4$  排放量** 与  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放量相比, 各处理的  $\text{CH}_4$  排放量波动并不明显。如图 2-C 所示, 在有机物料第一还田后 (2016 年 10 月),  $\text{CH}_4$  排放量呈增加趋势, 其中 BF 和 CF 处理的  $\text{CH}_4$  排放量较高。在第二次有机物料还田后 (2017 年 5 月), 仅 CF 处理出现了  $\text{CH}_4$  排放峰 ( $146.7\text{—}186.7\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), 而 BF 则出现了  $\text{CH}_4$  排放负值 ( $-109.8\text{—}-19.4\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )。随着种植时间的增加, 辣椒季后期各处理的  $\text{CH}_4$  排放量波动较大, 其中 BF 处理于 2017 年 8 月 30 日均达到排放峰值 ( $668.7\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ), 而其他有机物料处理均为排放负值; SF 和 MF 处理于同月 9 日出现  $\text{CH}_4$  排放最低值, 分别为  $-312.4$  和  $-455.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。



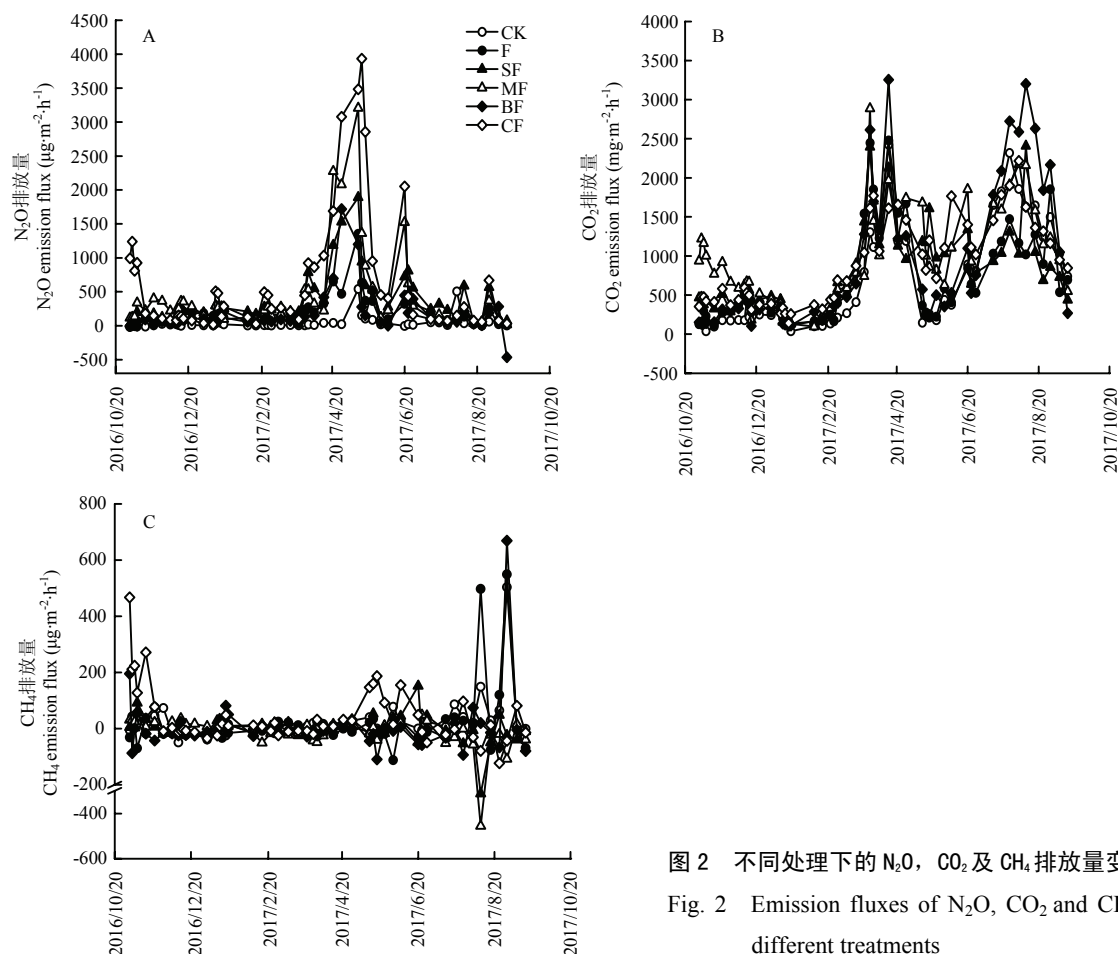
图2 不同处理下的  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  及  $\text{CH}_4$  排放量变化

Fig. 2 Emission fluxes of  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  under different treatments

### 2.3 有机物料等氮量施用对 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 累积排放量及增温潜势的影响

**2.3.1 累积排放量** 通过计算3种温室气体的累积排放量发现(图3), 辣椒季温室气体累积排放量明显高于卷心菜和茼蒿季( $P<0.01$ )。试验期内(图3-A), 各试验处理较对照CK均提高了 $\text{N}_2\text{O}$ 累积排放量, 与F处理相比, CF、MF和SF处理的 $\text{N}_2\text{O}$ 累积排放量均显著提高了92.7%—202.8%, 而BF明显降低了茼蒿季的 $\text{N}_2\text{O}$ 累积排放量( $P<0.05$ )。对 $\text{CO}_2$ 累积排放量而言(图3-B), 有机物料的添加增加了其排放量, 尤其是辣椒季的 $\text{CO}_2$ 累积排放量明显高于F处理; 而SF和MF处理较F处理明显降低了卷心菜季的 $\text{CO}_2$ 累积排放量; 除BF处理较F处理降低 $667.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 外, 其他3种有机物料处理均显著提高了茼蒿季的 $\text{CO}_2$ 累积排放量( $P<0.05$ )。如图3-C所示, CF处理的茼蒿季和卷心菜季的 $\text{CH}_4$ 累积排放量最高, 分别为0.2和 $0.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 各有机物料处理均降低了辣椒季 $\text{CH}_4$ 累积排放量, 除SF

和MF处理的 $\text{CH}_4$ 累积排放量为负值外, BF和CF处理较F处理显著降低了72.1%和44.9%( $P<0.05$ )。通过重复测定方差分析发现, 不同蔬菜季、试验处理对 $\text{N}_2\text{O}$  ( $F=152.088$ ,  $P=0.000<0.05$ ),  $\text{CO}_2$  ( $F=64.648$ ,  $P=0.000<0.05$ ),  $\text{CH}_4$  ( $F=151.072$ ,  $P=0.000<0.05$ )累积排放量存在显著的交互效应。

**2.3.2 增温潜势** 从表2可以看出, 试验期内, 各处理较CK均提高了 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{CO}_2$ 平均排放通量。CF处理较F处理显著增加了 $\text{N}_2\text{O}$ 平均排放通量, 增量可达 $31.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 其次为MF和SF处理( $P<0.05$ ), 而BF处理对 $\text{N}_2\text{O}$ 平均排放通量的影响相对于F处理而言并不显著。有机物料处理的 $\text{CO}_2$ 平均排放通量, 表现为 $\text{MF}\approx\text{BF}\approx\text{CF}>\text{SF}$ , 较F处理显著增加了12.8%—35.6%( $P<0.05$ )。对 $\text{CH}_4$ 平均排放通量而言, 除CF外, 其他有机物料处理均显著降低了 $\text{CH}_4$ 平均排放通量, 其中MF和SF处理均表现为负值。进一步计算增温潜势发现, 各有机物料均提高了增温潜势, 其中CF较F处理显著提高了42.0%, 其次为MF处理。

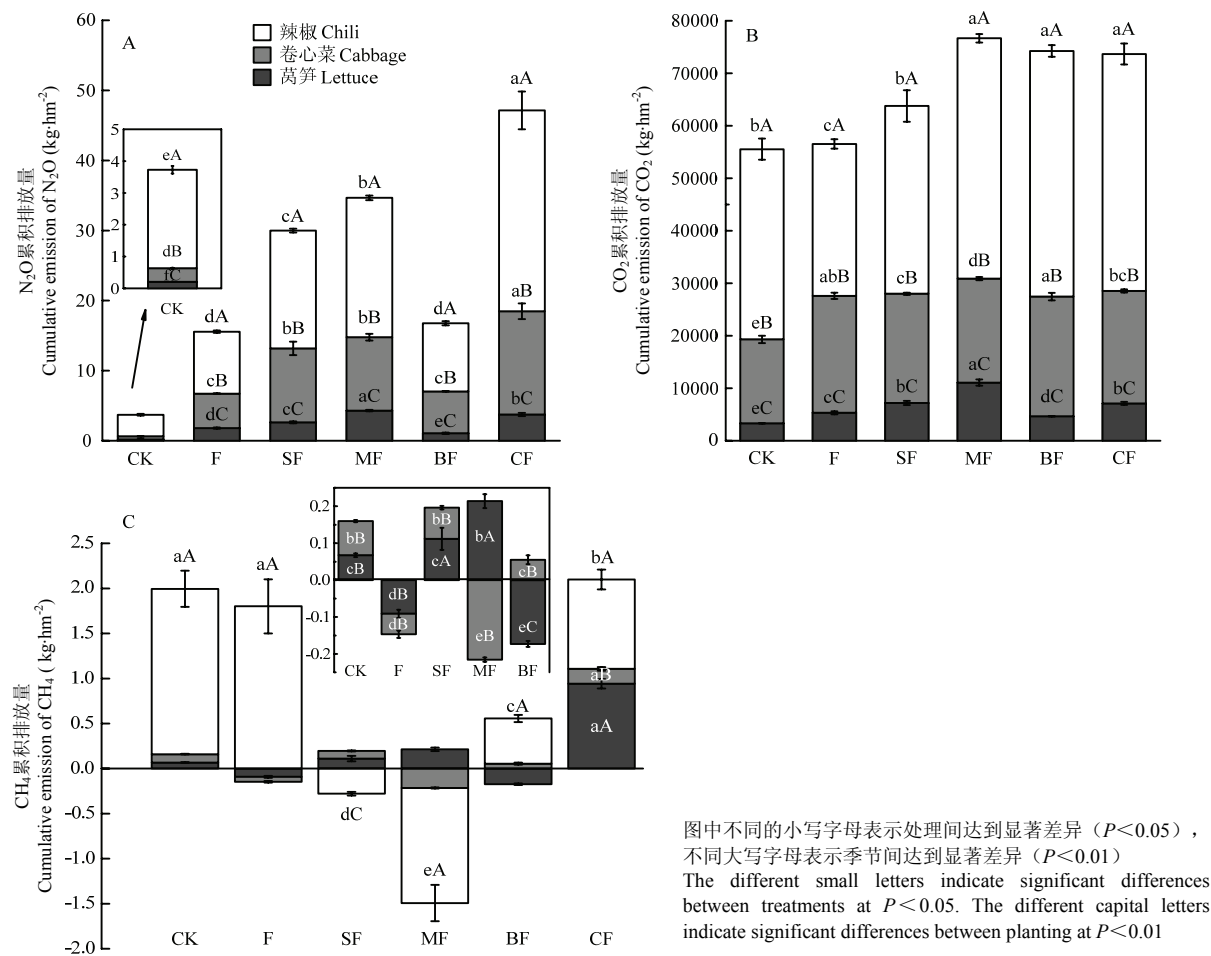


图 3 不同处理下的 N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 及 CH<sub>4</sub> 累积排放通变化

Fig. 3 Cumulative emission of N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> under different treatments

表 2 不同处理下的温室气体平均排放通量和增温潜势变化

Table 2 Changes of mean greenhouse gas emission flux and GWP under different treatments

处理 Treatment	平均排放通量 Mean greenhouse gas emission flux (kg·hm <sup>-2</sup> )			GWP (kg CO <sub>2</sub> -e·hm <sup>-2</sup> )
	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	
CK	3.7±0.1e	55537±2735c	2.0±0.21a	56578±2704d
F	15.6±0.3d	56544±1803c	1.7±0.28b	60716±1901d
SF	30.0±1.4c	63761±3623b	-0.1±0.0d	71697±3989c
MF	34.7±0.9b	76675±1720a	-1.3±0.2e	85828±1957a
BF	16.8±0.4d	75254±867a	0.4±0.0c	79709±883b
CF	47.1±4.0a	73665±2603a	2.1±0.2a	86216±3679a

同一列的数值后不同的小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

The values followed by different small letters in the same column indicate significant differences between treatments at  $P < 0.05$

2.4 环境因子与温室气体排放相关性分析

图 4 是试验期内, 各处理的土温、气温以及土壤

含水量变化。各处理的辣椒季温度 (包括 5 cm 土温和气温) 明显高于茼蒿季和卷心菜季, 且辣椒季的土壤



含水量波动较大。通过相关性分析发现（表 3）： $\text{N}_2\text{O}$  排放量与温度（包括 5 cm 土温和气温）存在显著的相关关系（ $P<0.05$ ）； $\text{CO}_2$  排放量与与温度（包括 5 cm 土温和气温）存在极显著的正相关，而与土壤含水量呈极显著的负相关（ $P<0.01$ ）； $\text{CH}_4$  排放量与土壤含水量呈显著正相关（ $P<0.05$ ），而与温度的相关性不大。

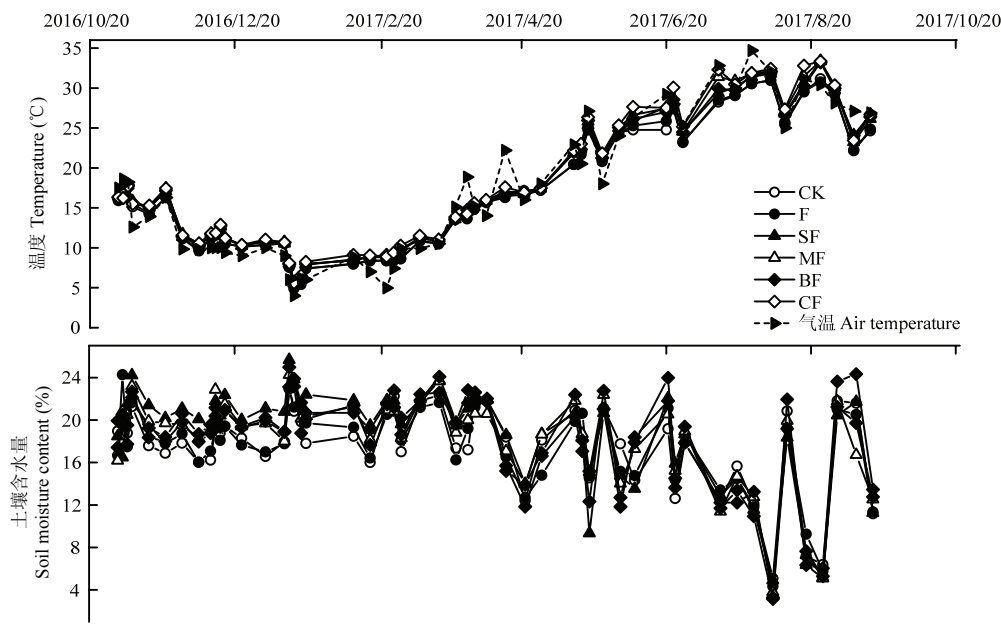


图 4 各处理 5 cm 土层温度、气温及含水量变化

Fig. 4 Variation characteristics of 5 cm soil temperature, air temperature and soil moisture content under different treatments

表 3 温室气体排放与温度、含水量相关分析

	$\text{N}_2\text{O}$ 排放量 $\text{N}_2\text{O}$ emission flux	$\text{CO}_2$ 排放量 $\text{CO}_2$ emission flux	$\text{CH}_4$ 排放量 $\text{CH}_4$ emission flux	5 cm 土温 5 cm soil temperature	气温 Air temperature	土壤含水量 Soil moisture content
$\text{N}_2\text{O}$ 排放量 $\text{N}_2\text{O}$ emission flux	1	0.207**	0.148**	0.127*	0.121*	0.074
$\text{CO}_2$ 排放量 $\text{CO}_2$ emission flux		1	0.020	0.563**	0.609**	-0.357**
$\text{CH}_4$ 排放量 $\text{CH}_4$ emission flux			1	.075	0.066	0.111*
5 cm 土温 5 cm soil temperature				1	0.975**	-0.637**
气温 Air temperature					1	-0.629**
土壤含水量 Soil moisture content						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

\*showed significant relation at  $P<0.05$ ; \*\* showed significant relation at  $P<0.01$

### 3 讨论

#### 3.1 施肥与土壤氮形态

本研究表明，施肥灌水后，各处理土壤铵态氮和硝态氮含量均出现峰值，随后呈下降趋势，这是由于

氮肥的施用促进了作物通过根系归还土壤有机物数量，从而增加了微生物活性和根系分泌，促进了有机质的矿化，增加土壤矿质氮的含量<sup>[27]</sup>，因此施肥在短期内可以有效提高土壤铵态氮和硝态氮的含量，为硝化和反硝化作用提供了底物，促进  $\text{N}_2\text{O}$  排放(图 2-A)。

同时土壤中的铵态氮和硝态氮存在“此消彼长”关系,一般温度较高,含水量较少的条件下,硝化作用比较强烈,铵态氮含量比较少,以硝态氮为主<sup>[28]</sup>,这与段鹏鹏等<sup>[12]</sup>研究结果一致。但是不同种植季度、不同处理对土壤氮形态含量的影响存在差异。这主要是因为不同种植季度的温度、水分含量存在差异,同时不同作物的生育期不同,最终导致土壤氮形态分布存在差异。HOPKINS 和 SHIEL<sup>[29]</sup>研究表明单施化肥对微生物有直接的毒害作用,从而减少了对土壤可溶性氮的吸收,因此本研究中 F 处理的土壤铵态氮、硝态氮及碱解氮含量并不低于甚至高于其他物料处理。相对于秸秆类有机物料,牛粪等有机肥还田后能较快地提高土壤微生物量和碳、氮的有效性,增强微生物活性,促进土壤养分的转化和释放<sup>[11]</sup>,故在温度低,含水量变化不大的莴笋季和卷心菜季下,因硝化和反硝化作用的强度不大,故因二者作用消耗的氮底物也较少,从而导致 CF 处理的硝态氮和碱解氮含量均都高于其他物料处理。辣椒季,于 6 月 19 日追肥后,常规施肥处理较有机物料处理的微生物活性低,故造成碱解氮盈余,同时高温多雨的环境,频繁的干湿交替使得土壤厌氧和氧化环境也频繁交替,但由于生物质炭能改善土壤的通气状况,增加阳离子交换量,同时较高 C/N 比促使土壤中氮的固定,减少氮素流失,提高氮素的供应能力<sup>[11,30]</sup>,因此 BF 处理的辣椒季的碱解氮含量高于其他物料处理。

### 3.2 施肥与 N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 及 CH<sub>4</sub> 排放

农业对温室气体(N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>)的排放具有重要的作用,其中旱地农田是 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的重要排放源<sup>[31]</sup>。施肥是影响 N<sub>2</sub>O 排放的主要因素,肥料的类型对农田 N<sub>2</sub>O 排放的影响仍存在争议<sup>[32-33]</sup>。本研究中,牛粪、菌渣、秸秆有机物料与化肥配施处理的农田 N<sub>2</sub>O 平均排放量为 362.8—630.1 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,超过对照 CK (44.0 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 和常规化肥施用处理(F, 189.0 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>),尤其牛粪与化肥配施(CF, 630.1 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 处理,而生物质炭配施化肥(BF, 174.8 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 处理降低了 N<sub>2</sub>O 排放量。这是因为有机物料的施用提高了土壤碳素含量,为微生物参与下的 N<sub>2</sub>O 排放的硝化和反硝化过程提供充足的营养元素<sup>[21,34-35]</sup>,因此相较于对照 CK 和常规施肥处理而言,有机物料与化肥配施处理提高了 N<sub>2</sub>O 排放;与秸秆、菌渣有机物料相比,牛粪的 C/N 较低(C/N=20.2),还田后会刺激土壤中氮分解,增加 N<sub>2</sub>O 排放,因此牛粪与化肥配施处理的 N<sub>2</sub>O 排放量最大。但是由于生物质炭一方面具有

吸附性,在土壤中添加生物质炭可以提高阳离子交换量,增加了土壤对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 的吸附,减少了参与硝化过程的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 浓度,从而减少了 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[30]</sup>;另一方面生物质炭 C/N 较高,加之生物质炭能改善土壤的通气性,进而限制硝化作用及不利于在厌氧条件下氮素微生物的反硝化作用,加速氮素固定,从而减少 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[36]</sup>。此外本试验中生物质炭增加了土壤硝态氮含量而减少了 N<sub>2</sub>O 排放量,可能是因为生物质炭的类型、施用量、土壤均会影响生物质炭的效果,因此生物质炭还田后会改变土壤性质以及硝化微生物活性,有利于形成硝化作用的最终产物(硝态氮),不利于形成中间产物(N<sub>2</sub>O),从而降低了土壤硝化作用中 N<sub>2</sub>O 产生比例<sup>[16]</sup>。

在莴笋和卷心菜种植季,无论是常规化肥还是有有机物料与化肥配施处理较对照 CK 均提高了 CO<sub>2</sub> 的排放;但是随着种植时间的进行,部分施用化肥处理的 CO<sub>2</sub> 排放量低于 CK,早期研究认为长时间施用化肥(尤其氮肥)可以减弱土壤呼吸,从而促进了土壤中碳的贮存<sup>[37-38]</sup>,但目前具体机理有待进一步研究。试验期内, MF 处理的 CO<sub>2</sub> 平均排放量最大(962.9 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>),尤其是菌渣还田后的前期,与栗方亮等<sup>[39]</sup>研究结果类似。这是因为分解前期菌渣中可溶性有机物较多,同时菌渣中富含蛋白质,中微量元素以及灰分、粗脂肪、粗纤维等,其还田后为微生物提供了营养物质和能源物质,从而促进了土壤呼吸<sup>[39]</sup>,增加了 CO<sub>2</sub> 排放。因此本试验中,菌渣还田的前期 CO<sub>2</sub> 排放量较大。但随着种植时间的延长,易分解组分被微生物分解利用殆尽,开始转向利用较难分解组分,有机碳分解量下降,从而导致 CO<sub>2</sub> 排放量减少<sup>[38]</sup>。夏季(7—9 月)高温多雨使得土壤环境变化频繁,而生物质炭由于自身疏松多孔特点和吸附性能,能改善土壤的通气性、提高土壤的保水性和保持土壤养分,因此在变化频繁的土壤环境下,生物质炭与化肥配施处理较其他处理为微生物提供了较好的土壤环境,提高了土壤微生物量和酶活性<sup>[40-41]</sup>,同时生物质炭的“正激发效应”即生物质炭中不稳定性碳组分的微生物的降解作用会促进土壤表观呼吸速率<sup>[42-43]</sup>,因此在整个试验的夏季(7—9 月),BF 处理的 CO<sub>2</sub> 排放量高于其他处理。此外,施肥灌水亦能增加各试验处理的 CO<sub>2</sub> 排放量,均出现了的 CO<sub>2</sub> 排放峰,这是因为施肥灌水一方面为土壤微生物提供营养物质,加速土壤微生物呼吸释放 CO<sub>2</sub>;另一方面追施氮肥(尿素),通过改变 C/N,加速土壤有机物矿化,从而增加 CO<sub>2</sub> 排放<sup>[39]</sup>。

旱地土壤通透性较好, 不易产生厌氧环境, 在旱地土壤中  $\text{CH}_4$  排放量较低, 因此认为旱地是大气中  $\text{CH}_4$  重要的吸收汇<sup>[44]</sup>。本研究中, 在等养分条件下, 各处理的  $\text{CH}_4$  排放的特点多表现为大气中  $\text{CH}_4$  汇, 这与韩园园等<sup>[45]</sup>研究结果类似。其中在第一次物料还田后, 外源有机物料的添加, 较对照 CK 和 F 处理为微生物提供了营养物质和能源物质, 因此各有机物料添加前期的  $\text{CH}_4$  排放量均呈增加趋势。牛粪的 C/N 比较低, 还田后可以促进氮素的矿化生成铵态氮和硝态氮, 但是由于铵态氮的分子结构类似于甲烷, 同样会被甲烷单氧化酶氧化, 从而铵态氮的存在会抑制土壤对  $\text{CH}_4$  的吸收<sup>[46-47]</sup>, 因此试验期内, 牛粪与化肥处理  $\text{CH}_4$  平均排放量最大 ( $39.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )。张凯莉等<sup>[44]</sup>研究表明温度过低时, 会抑制产甲烷菌和甲烷氧化菌的活动, 因此本研究莴笋季和卷心菜季的温度较低, 与  $\text{CH}_4$  有关的微生物活性不高, 使得该种植时期的土壤  $\text{CH}_4$  排放量波动不明显; 而辣椒季土壤  $\text{CH}_4$  排放量波动大, 并出现了排放峰值, 且各处理的  $\text{CH}_4$  排放量差别较大, 尤其是 8 月 BF 处理达到排放峰, 而其他有机物料处理多为排放负值, 其中秸秆、菌渣与化肥配施处理的  $\text{CH}_4$  排放量最低。这是因为 8 月高温多雨使得土壤干湿交替频繁, 土壤的厌氧和氧化环境也交替频繁, 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  $\text{CH}_4$  排放量波动大。但是由于生物质炭的吸水性强, 短期内较其他处理更能涵养水分, 为产甲烷菌提供厌氧环境, 促进了  $\text{CH}_4$  排放, 而且通过相关性分析 (表 3):  $\text{CH}_4$  排放量与土壤的含水量呈显著的相关关系, 同时辣椒季的温度多为  $30^\circ\text{C}$  以上, 为产甲烷菌的适合温度 ( $30\text{—}40^\circ\text{C}$ )<sup>[44]</sup>, 因此在高温多水的短期内, 生物质炭与化肥配施会促进  $\text{CH}_4$  排放。

### 3.3 施肥与 $\text{N}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$ 及 $\text{CH}_4$ 累积排放量和增温潜势

水热条件是影响温室气体排放重要环境因子, 有研究表明硝化作用的最适土壤温度为  $15\text{—}35^\circ\text{C}$ , 反硝化作用的最适土壤温度为  $5\text{—}75^\circ\text{C}$ , 土壤表层温度与土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放速率存在显著的相关关系<sup>[48-49]</sup>。在本研究中, 辣椒季的  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量明显高于莴笋季和卷心菜季, 通过相关性分析发现 (表 3):  $\text{N}_2\text{O}$  排放量与温度 (包括  $5\text{ cm}$  土温和气温) 存在显著的相关关系; 这可能是由于辣椒生育期集中在夏季, 高温多雨的环境, 土壤中含水量较高, 土壤通气性变差, 有利于反硝化过程的发生, 最终促进了  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[17]</sup>。肥料 (尤其氮肥) 的施用会增加硝化和反硝化作用的底物, 提高  $\text{N}_2\text{O}$  的产生和排放, 故各试验处理的  $\text{N}_2\text{O}$  平均排

放通量均显著高于对照 CK; 此外有机物料的添加能提高土壤的碳素含量, 为微生物提供营养物质, 提高了微生物活性<sup>[21,34]</sup>, 因此与 F 处理相比, 其他物料处理的  $\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量均提高。而 BF 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量的增加量较少, 这是由于生物质炭的自身特点会吸附  $\text{NH}_4^+$ , 同时改善土壤的通气状况, 最终减少了  $\text{N}_2\text{O}$  的产生和排放。较低 C/N 的牛粪还田后, 会刺激土壤中氮分解, 增加  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 因此 CF 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量最大。温度和土壤水分共同决定了土壤  $\text{CO}_2$  排放的季节特征, 尤其是  $5\text{ cm}$  土层温度能够解释土壤呼吸变化的  $82\%\text{—}94\%$ , 但水分对土壤  $\text{CO}_2$  排放的影响具有复杂性与不确定性<sup>[50-52]</sup>。通过相关分析发现, 本试验中的  $\text{CO}_2$  排放量与温度存在极显著的正相关关系, 而与土壤含水量呈极显著的负相关关系。由于辣椒季生育期的表层土温较高, 且生育期长于莴笋季和卷心菜季, 从而导致辣椒季的  $\text{CO}_2$  累积排放量明显高于其他两季作物。物料的添加, 为土壤带入碳源, 故有机物料的添加均显著增加了试验期内  $\text{CO}_2$  平均排放通量; 与其他物料相比, 秸秆有机碳含量较低, 还田后可供微生物利用的碳源较少, 因此 SF 处理的  $\text{CO}_2$  平均排放通量低于其他物料处理。旱地的含水量相较于水田少, 在整个试验观测期内,  $\text{CH}_4$  排放与土壤含水量存在显著的正相关关系 (表 3), 因此含水量成为  $\text{CH}_4$  排放的重要决定因素。辣椒季高温多雨导致了该种植季的土壤环境变化频繁, 故辣椒季, 各处理的  $\text{CH}_4$  “源”或“汇”特征较含水量变化不大的莴笋和卷心菜季的明显。与对照 CK 和常规施肥处理相比, CF 处理增加了  $\text{CH}_4$  平均排放通量, 而其他物料与化肥配施均显著降低  $\text{CH}_4$  平均排放通量, 促进了  $\text{CH}_4$  累积吸收量。这可能是牛粪的 C/N 比较低, 还田后可以促进有机氮矿化生成铵态氮和硝态氮, 但是铵态氮的存在会抑制土壤对  $\text{CH}_4$  的吸收<sup>[46-47]</sup>, 因此牛粪与化肥处理增加了  $\text{CH}_4$  平均排放通量。

由于  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  的增温潜势不同, 为定量分析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 100 年尺度上不同处理的温室气体的综合增温效应 (GWP)<sup>[53]</sup>。本研究中, 物料处理的 GWP 均显著高于对照 CK 和常规化肥处理, 这与李露等<sup>[54]</sup>研究结果类似, 这可能是因为本试验条件下,  $\text{N}_2\text{O}$  对 GWP 的贡献率高于  $\text{CH}_4$ , 同时物料处理的  $\text{CO}_2$  平均排放通量高于 CK 和 F 处理, 所以各物料处理均提高了综合增温效益。但是 4 种物料相比, SF 和 BF 处理的 GWP 相对较低, 这是因为虽然 BF

处理增加了 CO<sub>2</sub> 平均排放通量,但是明显降低了 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 平均排放通量,而 SF 处理主要表现在降低 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 平均排放通量,可见不同物料处理对 3 种温室气体的减排效果存在差异。

## 4 结论

牛粪配施化肥提高了莴笋和卷心菜季的铵态氮含量,生物质炭配施化肥则提高了辣椒季硝态氮和碱解氮含量。N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放高峰主要集中在夏季,且施肥灌水后会出现排放峰。与常规施肥相比,生物质炭配施化肥降低了 N<sub>2</sub>O 排放,牛粪配施化肥显著增加了 N<sub>2</sub>O 排放,但各处理均促进了 CO<sub>2</sub> 排放,生物质炭则推迟了 CO<sub>2</sub> 排放峰。秸秆、菌渣配施化肥减少了 CH<sub>4</sub> 排放,牛粪则显著增加了 CH<sub>4</sub> 平均排放通量。有机物料配施化肥提高了温室气体的综合增温效应,秸秆、生物质炭处理的增温潜势低于菌渣、牛粪处理。

总体上,等养分投入下,有机物料配施化肥对蔬菜连作模式下的紫色土氮形态分布和温室气体的影响各异,与水热条件密切相关;生物质炭、秸秆与化肥配施处理能增加有效氮含量,减少温室气体的排放,缓解温室效应;而牛粪与化肥配施会增加温室气体排放。

## References

- [1] 王斌,李玉娥,万运帆,秦晓波,高清竹. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价. 中国农业科学, 2014, 47(2): 314-323.  
WANG B, LI Y E, WAN Y F, QIN X B, GAO Q Z. Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gases emission from a double rice field. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 314-323. (in Chinese)
- [2] ZHENG X H, HAN S H, HUANG Y, WANG Y S, WANG M X. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N<sub>2</sub>O emission from Chinese croplands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18. GB2018. doi: 10.1029/2003GB002167.
- [3] HUANG Y, TANG Y H. An estimate of greenhouse gas (N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>) mitigation potential under various scenarios of nitrogen use efficiency in Chinese croplands. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 2958-2970.
- [4] ZHAO Y C, WANG M Y, HU S J, ZHANG X D, OUYANG Z, ZHANG G L, HUANG B, ZHAO S W, WU J S, XIE D T, ZHU B, YU D S, PAN G X, XU S X, SHI X Z. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands. *PNAS*, 2018, 115: 4045-4050.
- [5] WANG J Y, XIONG Z Q, YAN X Y. Fertilizer-induced emission factors and background emissions of N<sub>2</sub>O from vegetable fields in China. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 6923-6929.
- [6] JAMTGARD S, NASHOLM T, HUSS-DANELL K. Nitrogen compounds in soil solutions of agricultural land. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(12): 2325-2330.
- [7] 李栢锦, 隋鹏, 龙攀, 严玲玲, 王彬彬, 陈源泉. 不同有机物料还田对农田系统净温室气体排放的影响. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 111-116.  
LI Z J, SUI P, LONG P, YAN L L, WANG B B, CHEN Y Q. Effects of different organic wastes application on net greenhouse gas emission in farmland system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 111-116. (in Chinese)
- [8] 黄容, 高明, 吕盛, 徐国鑫, 黎嘉成. 锯木灰渣改良退化菜园紫色土壤的效果研究. 土壤学报, 2018, 55(3): 710-720.  
HUANG R, GAO M, LV S, XU G X, LI J C. Effect of saw dust ash ameliorating degraded vegetable garden purple soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3): 710-720. (in Chinese)
- [9] KEMMITT S J, LANYON C V, WAITE I S, WEN Q, ADDISCOTT T M, BIRD N R A, O'Donnell A G, BROOKES P C. Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass-a new perspective. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40: 61-73.
- [10] 黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅. 秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响. 环境科学, 2018, 39(10): 1-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.201802087>.  
HUANG R, GAO M, LI J C, XU G X, LV S, LUO M. Effect of straw residues in combination with reducing fertilization rate on greenhouse gas emission in vegetable field. *Environmental Science*, 2018, 39(10): 1-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.201802087>. (in Chinese)
- [11] 黄容, 高明, 万毅林, 田冬, 陶睿, 王芳丽. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响. 环境科学, 2016, 37(11): 4446-4456.  
HUANG R, GAO M, WAN Y L, TIAN D, TAO R, WANG F L. Effects of straw in combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils. *Environmental Science*, 2016, 37(11): 4446-4456. (in Chinese)
- [12] 段鹏鹏, 丛耀辉, 徐文静, 张玉玲, 虞娜, 张玉龙. 氮肥与有机肥配施对设施土壤可溶性氮动态变化的影响. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4717-4727.  
DUAN P P, CONG Y H, XU W J, ZHANG Y L, YU N, ZHANG Y L. Effect of combined application of nitrogen fertilizer and manure on the dynamic of soil soluble N in greenhouse cultivation. *Scientia*

- Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4717-4727. (in Chinese)
- [13] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 万运帆, 高清竹, 彭华, 秦晓波. 不同施肥处理下双季稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的全年观测研究. *大气科学*, 2011(4): 707-720.
- SHI S W, LI Y E, LI M D, WAN Y F, GAO Q Z, PENG H, QIN X B. Annual  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from double rice cropping systems under various fertilizer regimes in Hunan Province, China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011(4): 707-720. (in Chinese)
- [14] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 郑聚锋, 池忠志, 李恋卿, 张旭辉, 郑金伟. 施用生物炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化. *中国农业科学*, 2012, 45(23): 4844-4853.
- ZHANG B, LIU X Y, PAN G X, ZHENG J F, CHI Z Z, LI L Q, ZHANG X H, ZHENG J W. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4844-4853. (in Chinese)
- [15] 范靖尉, 白晋华, 任寰宇, 韩雪, 刁田田, 郭李萍. 减氮和施生物炭对华北夏玉米-冬小麦土壤  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响. *中国农业气象*, 2016, 37(2): 121-130.
- FAN J W, BAI J H, REN H Y, HAN X, DIAO T T, GUO L P. Effects of reducing nitrogen and biochar application on  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from summer maize-winter wheat field in North China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(2): 121-130. (in Chinese)
- [16] 潘凤娥, 胡俊鹏, 索龙, 王小淇, 季雅岚, 孟磊. 添加玉米秸秆及其生物炭对砖红壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 396-402.
- PAN F E, HU J P, SUO L, WANG X Q, JI Y L, MENG L. Effect of corn stalk and its biochar on  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from latosol soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 396-402. (in Chinese)
- [17] 刘杏认, 张星, 张晴雯, 李贵春, 张庆忠. 施用生物炭和秸秆还田对华北农田  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响. *生态学报*, 2017, 37(20): 6700-6711.
- LIU X R, ZHANG X, ZHANG Q W, LI G C, ZHANG Q Z. Effects of biochar and straw return on  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from farmland in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(20): 6700-6711. (in Chinese)
- [18] 张旭博, 徐明岗, 张文菊, 林昌虎, 段英华, 蔡泽江, 张崇玉. 添加有机物料后红壤  $\text{CO}_2$  释放特征与微生物生物量动态. *中国农业科学*, 2011, 44(24): 5013-5020.
- ZHANG X B, XU M G, ZHANG W J, LIN C H, DUAN Y H, CAI Z J, ZHANG C Y. Characteristics of  $\text{CO}_2$  emission and microbial biomass dynamics after adding various organic materials in red soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(24): 5013-5020. (in Chinese)
- [19] 刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙. 不同部位玉米秸秆对两种质地黑土  $\text{CO}_2$  排放和微生物量的影响. *环境科学*, 2015, 36(7): 2686-2694.
- LIU S Y, LIANG A Z, YANG X M, JIA S X, CHEN X W, ZHANG S X, SUN B J, CHEN S L. Effects of different residue part inputs of corn straws on  $\text{CO}_2$  efflux and microbial biomass in clay loam and sandy loam black soils. *Environmental Science*, 2015, 36(7): 2686-2694. (in Chinese)
- [20] KHOSA M K, SIDHU B S, BENBI D K. Effect of organic materials and rice cultivars on methane emission from rice field. *Journal of Environmental Biology*, 2010, 31(3): 281-285.
- [21] ZHU T B, ZHANG J B, YANG W Y, CAI Z C. Effects of organic material amendment and water content on  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , and  $\text{N}_2$  emissions in a nitrate-rich vegetable soil. *Biology & Fertility of Soils*, 2013, 49(2): 153-163.
- [22] SHAN J, YAN X. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils. *Atmospheric Environment*, 2013, 71(3): 170-175.
- [23] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- ZHANG F S, CHEN X P, CHEN Q. *Guide to Fertilization of Major Crops in China*. Beijing: China Agricultural University Press, 2009. (in Chinese)
- [24] HUTCHINSON G L, LIVINGSTON G P. Vents and seals in non-steady-state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52, 675-682.
- [25] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis[R]. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [26] 杨剑虹. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- YANG J H. *Agricultural Soil Analysis and Environmental Monitoring*. Beijing: China Land Press, 2008. (in Chinese)
- [27] LEMKE R, VANDEN B A, CAMPBELL C, LAFOND G, GRANT B. Crop residue removal and fertilizer N: Effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on audicboroll. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1): 42-51.
- [28] CHEN Q H, FENG Y, ZHANG Y P, ZHANG Q C, SHAMSI I H, ZHANG Y S, LIN X Y. Short-term responses of nitrogen mineralization and microbial community to moisture regimes in greenhouse vegetable soils. *Pedosphere*, 2012, 22(2): 263-272.

- [29] HOPKINS D W, SHIEL R S. Size and activity of soil microbial communities in long-term experimental grassland plots treated with manure and inorganic fertilizers. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 22(1/2): 66-70.
- [30] 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 唐镒豪. 生物炭施用量对紫色水稻土温室气体排放的影响. *环境科学*, 2018, 36(5): 1-11.
- QI L, GAO M, GUO X M, NIU H D, LI T, SUN T, CAO Q L, TANG J H. Effects of biochar application rates on greenhouse gas emission in the purple paddy soil. *Environmental Science*, 2018, 36(5): 1-11. (in Chinese)
- [31] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 温延臣, 孙文彦, 赵秉强. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米  $N_2O$  和  $CO_2$  排放的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(21): 4381-4389.
- LI Y Q, TANG J W, CHE S G, WEN Y C, SUN W Y, ZHAO B Q. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of  $CO_2$  and  $N_2O$  from the summer maize field in the North China Plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(21): 4381-4389. (in Chinese)
- [32] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 徐会娟, 贾炎. 农田土壤  $N_2O$  产生的关键微生物过程及减排措施. *环境科学*, 2014, 35(2): 792-800.
- ZHU Y G, WANG X H, YANG X R, XU H J, JIA Y. Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 792-800. (in Chinese)
- [33] ZHANG M Y, WANG F J, CHEN F, MALEMELA M P, ZHAN H L. Comparison of three tillage systems in the wheat-maize system on carbon sequestration in the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 54: 101-107.
- [34] YANG H S, XU M M, KOIDE R T, LIU Q, DAI Y J, LIU L, BIAN X M. Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2015, 96(4): 1141-1149.
- [35] LI H, QIU J, WANG L, TANG H, LI C, RANST E V. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 135(1): 24-33.
- [36] CASE S D C, MCNAMARA N P, REAY D S, WHITAKER J. The effect of biochar addition on  $N_2O$  and  $CO_2$  emissions from a sandy loam soil-The role of soil aeration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 51: 125-134.
- [37] NADELHOFFER K J, EMMETT B A, GUNDERSEN P, KJØNAAS O J, KOOPMANS C J, SCHLEPPI P, WRIGHT R F. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature*, 1999, 398(6723): 145-148.
- [38] BOWDEN R D, DAVIDSON E, SAVAGE K, ARABIA C, STEUDLER P. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 43-56.
- [39] 栗方亮, 王煌平, 张青, 王利民, 安梦鱼, 罗涛. 室内恒温条件下稻田土壤中菌渣的分解过程及  $CO_2$  释放特征. *中国生态学报*, 2017, 25(2): 267-275.
- LI F L, WANG H P, ZHANG Q, WANG L M, AN M Y, LUO T. Decomposition process and  $CO_2$  release characteristics of spent mushroom substrate in paddy soils. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 267-275. (in Chinese)
- [40] KEILUWEIT M, NICO P S, JOHNSON M G, KLEBER M. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1247-1253.
- [41] 王娟, 张丽君, 姚槐应. 添加秸秆和黑炭对水稻土碳氮转化及土壤微生物代谢图谱的影响. *中国水稻科学*, 2013, 27(1): 97-104.
- WANG J, ZHANG L J, YAO H Y. Effects of straw and black carbon addition on C-N transformation and microbial metabolism profile in paddy soil. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(1): 97-104. (in Chinese)
- [42] LU W W, DING W X, ZHANG J H, LI Y, LUO J F, BOLAN N, XIE Z B. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: A negative priming effect. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 76: 12-21.
- [43] CROSS A, SOHI S P. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(10): 2127-2134.
- [44] 张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜. 地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响. *环境科学*, 2017, 38(8): 3451-3462.
- ZHANG K L, HAO Q J, FENG D, SHI J L, SHI X J, JIANG C S. Effect of plastic film mulching on methane emission from a vegetable field. *Environmental Science*, 2017, 38(8): 3451-3462. (in Chinese)
- [45] 韩圆圆, 曹国军, 耿玉辉, 叶青, 王振华, 黄岩. 农业废弃物还田对黑土温室气体排放及全球增温潜力的影响. *华南农业大学学报*, 2017, 38(5): 36-42.
- HAN Y Y, CAO G J, GENG Y H, YE Q, WANG Z H, HUANG Y. Effects of agricultural wastes on greenhouse gas emission and global warming potential in black soil. *Journal of South China Agricultural University*, 2017, 38(5): 36-42. (in Chinese)
- [46] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 张喜英, 董文旭, 王玉英, 秦树平. 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. *中国生态农业学报*, 2013(3): 297-307.
- SONG L N, ZHANG Y M, HU C S, ZHANG X Y, DONG W X,

- WANG Y Y, QIN S P. 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. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013(3): 297-307. (in Chinese)
- [47] CHAN A S K, STEUDLER P A. Carbon monoxide uptake kinetics in unamended and long-term nitrogen-amended temperate forest soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, 57(3): 343-354.
- [48] LAVILLE P, LEHUGER S, LOUBET B, CHAUMARTIN F, CELLIER P. Effect of management, climate and soil conditions on N<sub>2</sub>O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2011, 151(2): 228-240.
- [49] KURGANOVA I N, GERENYU V O L D. Effect of the temperature and moisture on the N<sub>2</sub>O emission from some arable soils. *Eurasian Soil Science*, 2010, 43(8): 919-928.
- [50] 田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅. 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. *环境科学*, 2017, 38(7): 2988-2999.
- TIAN D, GAO M, HUANG R, LV S, XU C. Response of soil respiration and heterotrophic respiration to returning of straw and biochar in rape-maize rotation systems. *Environmental Science*, 2017, 38(7): 2988-2999. (in Chinese)
- [51] SCHULZE E D, LUYSSAERT S, CIAIS P. Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience*, 2009(2): 842-850.
- [52] KNORR W, PRENTICE I C, HOUSE J I, HOLLAND E A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 2005, 433(7023): 298-301.
- [53] SOLOMON S. *Climate Change 2007-The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [54] 李露, 周自强, 潘晓健, 熊正琴. 不同时期施用生物炭对稻田 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放的影响. *土壤学报*, 2015, 52(4): 839-848.
- LI L, ZHOU Z Q, PAN X J, XIONG Z Q. Effects of biochar on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 839-848. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)