

不同氮素水平下有机物料添加对陇中黄土高原旱作农田 N_2O 排放特征的影响

王泳斌^{1,2}, 武均^{1,2}, 吕锦慧^{1,2}, 蔡立群^{1,2,3}, 张军^{1,2,3}, 张仁陟^{1,2,3}

(1.甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃兰州730070;2.甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室,甘肃兰州730070;
3.甘肃省节水农业工程技术研究中心,甘肃兰州730070)

摘要:为了探究不同用量氮肥配施生物质炭或小麦秸秆对旱作农田 N_2O 排放通量的影响,在陇中黄土高原半干旱区连续进行4年不同氮素水平配施不同有机物料的田间定位试验,试验以3种施氮用量(不施氮肥、50 kg(N)·hm⁻²氮肥、100 kg(N)·hm⁻²氮肥)配施2种有机物料(小麦秸秆S、生物质炭B)及无有机物料(C)共组成9个处理,于2016年11月—2017年10月,采用静态箱-气相色谱法,对 N_2O 通量进行全年内连续观测。研究结果表明:观测期内,各处理 N_2O 年平均通量大小排序 SN100>CN100>SN50>CN50>BN100>SN0>BN50>CN0>BN0,各处理 N_2O 排放通量变化趋势一致;相较N0处理(CN0、SN0、BN0)的年平均排放通量,N50(CN50、SN50、BN50)和N100(CN100、SN100、BN100)处理分别增加了6.92%和10.03%。相较CN0、CN50和CN100,与其相同氮素水平配施生物质炭后, N_2O 年平均排放通量分别降低了0.49%、3.15%和4.67%;配施秸秆后, N_2O 年平均排放通量分别增加了6.37%、3.44%和2.73%。单施氮肥或小麦秸秆配施氮肥均增加了 N_2O 排放的增温潜势,生物质炭配施氮肥减少了 N_2O 排放的增温潜势。主效应分析表明,氮素、秸秆均对提升 N_2O 排放通量发挥显著效应,而生物质炭具有降低效应。相关分析表明,土壤温度与 N_2O 通量表现为显著正相关关系,土壤含水量与 N_2O 通量表现为显著负相关关系($P<5\%$)。通径分析表明,土壤温度对 N_2O 通量的增大作用远大于土壤含水量对 N_2O 通量的减小作用。秸秆或生物质炭与氮素无交互效应, N_2O 排放通量随氮素水平的增加而增大,秸秆还田促进了 N_2O 排放而生物质炭抑制了 N_2O 排放。因此,添加生物质炭对旱作农田固氮减排具有较大的潜力。

关键词:旱作农田; N_2O 排放; 生物质炭; 秸秆还田; 氮素水平

中图分类号:S153; S147.2 **文献标志码:**A

Effect of organic materials on N_2O emission under different N-fertilizer levels in dryland of the Loess Plateau of central Gansu Province

WANG Yong-bin^{1,2}, WU Jun^{1,2}, LÜ Jin-hui^{1,2}, CAI Li-qun^{1,2,3}, ZHANG Jun^{1,2,3}, ZHANG Ren-zhi^{1,2,3}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Gansu Engineering Research Center for Agriculture Water-saving, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to explore the effect of application of biochar and straw on N_2O emission under different N-fertilizer levels in dryland of the Loess Plateau in central Gansu Province, a field trail with different organic materials combining with different N-fertilizer levels was studied for 4 years. Experiment included the following treatments: the straw combined with three N fertilizer rates (0, 50, and 100 kg · hm⁻²), coded as SN0, SN50, and SN100, respectively; The biochar applied alone or combined with N fertilizer (50 and 100 kg · hm⁻²), coded as BN0, BN50, and BN100, respectively; N fertilizer (0, 50 and 100 kg · hm⁻²) alone coded as CN0, CN50, and CN100, respectively. Collection of N_2O flux was conducted with a static chamber-gas chromatography method from

收稿日期:2017-12-11

修回日期:2018-03-12

基金项目:国家自然科学基金(31571594,41661049);“十二·五”循环农业科技工程项目(2012BAD14B03);甘肃省干旱生境作物学重点实验室省部共建国家重点实验室培育基地开放基金(GSCS-2012-13);甘肃省自然科学基金(1606RJZA076)

作者简介:王泳斌(1991-),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,研究方向为土壤生态学。E-mail:334293228@qq.com

通信作者:张仁陟(1961-),男,甘肃静宁人,博士,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作、节水农业及土壤生态学方面的研究。E-mail:zhangrz@gsau.edu.cn

November 2016 to October 2017. The results showed that the average N₂O flux from all treatments ranked as SN100 > CN100 > SN50 > CN50 > BN100 > SNO > BN50 > CN0 > BN0, and N₂O fluxes represented the generally same trend throughout the observed period under different treatments. Compared with N0 (CN0, SNO, BN0) treated plots, N50 (CN50, SN50, BN50) and N100 (CN100, SN100, BN100) treatments increased the annual average N₂O fluxes by 6.92% and 10.03%, respectively. Compared with CN0, CN50, and CN100, the same N-fertilizer level combined with the biochar reduced the annual average N₂O fluxes by 0.49%, 3.15%, and 4.67%, respectively. In comparison with CN0, CN50, and CN100 treatments, the same N-fertilizer level combined with the straw increased the annual average N₂O fluxes by 6.37%, 3.44%, and 2.73%, respectively. Both N fertilizer applied alone treatments and straw combined with N fertilizer treatments boosted N₂O fluxes, biochar combined with N fertilizer treatments reduced N₂O fluxes. Both N-fertilizer and straw significantly promoted the effect of the GWP of N₂O fluxes, the biochar, however, had a reducing effect. The correlation analysis indicated that soil temperature and N₂O flux had a significant positive correlation but the soil water content and N₂O flux had a significant negative correlation ($P<5\%$)。The path analysis showed that the impact of soil temperature on N₂O flux was greater than soil water content. Interaction analysis exhibited that no interaction effect between straw and N, biochar and N. N₂O flux increased with increasing N application levels. Straw application enhanced N₂O emission but biochar repressed N₂O emission. Therefore, the biochar use had a great effect on the reduction of N₂O emission in dryland.

Keywords: dry farmland; N₂O emission; biochar; straw returning; N fertilizer level

目前,全球气候变暖问题备受关注,而温室气体浓度的大量增加是气候变暖的主要原因。N₂O是三大温室气体之一,是仅次于CO₂、CH₄的又一温室气体,与其他温室气体相比,N₂O增温潜势大,滞留大气时间长^[1]。据估计,大气中每年有80%~90%的N₂O来源于土壤农田,土壤是温室气体的重要排放源^[2]。而旱作农田在我国农业生产中占据重要地位,土地资源丰富,是大气中N₂O的重要来源,而且土壤干湿交替能激发N₂O形成与排放^[3]。因此,研究旱作农田土壤N₂O的排放特征及如何降低温室气体的排放量显得尤为重要。

氮肥的施用是农业土壤中产生N₂O的最大来源,土壤N₂O的排放量与氮肥施用量呈线性关系^[4]。在采取施氮措施提高产量的同时,土壤中长期残留的氮素会引起土壤环境和大气环境变化^[5],所以研究氮肥施用量引起的农田土壤N₂O气体通量变化是非常必要的。生物质炭(Biochar)是指生物质在完全或部分缺氧的条件下经高温热解炭化产生的一类难熔的、高度芳香化的固态物质^[6]。研究表明,将生物质炭施用于土壤中,能明显改变土壤的理化性质和微生物活性,进而影响N₂O的排放^[7]。目前,大量研究表明,添加生物质炭可减少N₂O的排放^[8-10],但由于试验区的气候类型、土壤类型等差异,生物质炭的施用对N₂O的排放影响研究结果也有很大的差异,生物质炭施入氮素缺乏、有机质较低的土壤降低N₂O的排放^[11],而生物质炭施入有机碳含量高的土壤增加了N₂O排放^[12]。秸秆还田

会改变农田土壤N状况及N循环速率、生物(微生物、细根、土壤动物等)量,以及NO₃⁻-N和NH₄⁺-N的含量,进而影响N₂O通量^[13]。关于秸秆还田对N₂O排放的影响研究很多但结果不一,有研究^[14-15]表明秸秆还田可明显降低N₂O排放,但也有部分研究^[14-15]表明秸秆还田能够增加N₂O的排放量。

目前,对于生物质炭与秸秆还田对N₂O排放影响的研究结果尚存在争议^[9,11,14-15],还有待进一步验证,而且关于不同氮水平分别配施生物质炭与秸秆还田对温室气体N₂O通量变化的综合影响研究甚少。本文在陇中黄土高原半干旱地区,以连续进行4年不同氮素水平配施不同有机物料的田间定位试验为基础,探究不同量氮肥配施生物质炭及秸秆对旱作农田N₂O排放的影响,旨在为该区农业可持续发展和筛选环境友好型种植模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区的甘肃省定西市李家堡镇麻子川村(35°28'N, 104°44'E)。该区海拔2 000 m左右,年均太阳辐射594.7 kJ·cm⁻²,日照时数2 476.6 h,年均气温6.4℃,≥0℃积温2 933.5℃,≥10℃积温2 239.1℃,无霜期140 d,多年平均降水390.9 mm,年蒸发量1 531 mm,干燥度2.53 g·m⁻³,80%保证率的降水量为365 mm,变异系数为24.3%,是典型的旱作农业区。土壤为典型的黄绵土,土质绵软,土层深厚,质地均匀,储水

性能良好。0~200 cm 土壤容重平均为 1.17 g·cm⁻³, 调萎含水率 7.3%, 饱和含水率 21.9%。

1.2 试验设计

试验以春小麦田为研究对象, 设 3 个氮水平(不施氮肥、50 kg(N)·hm⁻²、100 kg(N)·hm⁻²)和 3 个有机物料水平(无有机物料、小麦秸秆、生物质炭)共组成 9 个处理(详见表 1), 3 次重复, 随机区组排列, 小区面积 3 m×6 m=18 m², 共计 27 个小区。

所有处理均采用当地传统的三耕两耱耕作方式, 8 月份收获后进行第 1 次耕作, 8 月底和 9 月份分别进行第 2、3 次耕作, 耕深依次为 20、10 cm 和 5 cm。9 月份第 3 次耕后耱 1 次, 10 月份冻结前再耱 1 次。试验采用春小麦连作, 供试品种为‘定西 40 号’春小麦(*Triticum turgidum L.*), 自 2014 年开始, 于每年 3 月下旬进行播种, 播量为 187.5 kg·hm⁻², 行距 20 cm, 播深 7 cm, 7 月下旬收获。小麦秸秆打碾切碎(2~3 cm)均匀撒布于秸秆还田处理小区内(详见表 2)。供试生物质炭为金和福农业科技有限公司生产的玉米秸秆生物质炭, 生物质炭基本性质为 C 含量 53.28%, N 含量 1.04%, P 含量 0.26%, 灰分含量 35.64%; 小麦秸秆平均含碳量 38%, 氮素含量为 0.55%。各处理于每年播种前均施入 P₂O₅ 105

kg·hm⁻²(过磷酸钙, P₂O₅ 含量为 14%); 试验中所添加氮素为尿素(含 N 46%), 于每年播种前根据各处理所需用量施入小区。

1.3 气体样本的采集和测定

气体采样期为 2016 年 11 月 11 日至 2017 年 10 月 7 日。2016 年 11 月 11 日—2017 年 3 月 26 日为每 30 d 进行 1 次采样, 之后每隔 15 d 进行 1 次采样。采样时间为早晨 8:30—11:30 时段。采样箱高 35 cm, 直径为 38 cm, 箱体顶部有 1 个小孔, 用于插入温度计来读取箱内温度。箱内设有小风扇 1 个用于搅匀气体, 箱外包有保温膜, 防止太阳辐射使箱内温度改变^[16]。底座深 16 cm, 底座上端有密封水槽。每个处理中分别裁入 1 个底座。采样前, 将箱体嵌入底座中, 将温度计插入箱体顶部, 水槽中加水密封, 使箱内空气与外部彻底隔绝后立即用注射器分别采集 0, 10, 20 min 的气体样品, 分别注入 150 ml 密闭气袋中备用。

N₂O 气体浓度分析采用安捷伦 7890A 型气相色谱仪后检测器(u) ECD(检测温度 300℃, 柱温 45℃)进行分析。色谱柱: Park Q15 m×0.53 mm×25 μm, 载气为高纯 N₂。

表 1 试验处理描述

Table 1 Experiment description

代码 Code	氮素水平 N level/(kg·hm ⁻²)	有机物料 Organic material	描述 Description
CN0		无有机物料 No organic material	生物质炭于 2014 年 3 月上旬一次性施入 15 t·hm ⁻² , 稻秆还田处理于 2014 年 3 月上旬施入小麦秸秆 4.5 t·hm ⁻² , 之后每年收获后将各秸秆还田小区所生产的秸秆全部还田。各处理于每年播种前均施入 P ₂ O ₅ 105 kg·hm ⁻² (过磷酸钙, P ₂ O ₅ 含量为 14%); 试验中所添加氮素为尿素(含 N 量 46%), 于每年播种前根据各处理所需用量施入小区。
SN0	0	秸秆 Straw	In early March 2014, 15 t·hm ⁻² of biochar was applied to biochar treatments, and 4.5 t·hm ⁻² of wheat straw was applied to straw returning treatments. After harvesting each year, all the straw produced will be returned to the field. Each treatment was treated with 105 kg·hm ⁻² of P ₂ O ₅ (superphosphate, P ₂ O ₅ content 14%) before sowing every year, and urea (46% N content) was added in the experiment, which was applied to the plots according to the amount of each treatment before sowing every year.
BN0		生物质炭 Biochar	
CN50		无有机物料 No organic material	
SN50	50	秸秆 Straw	
BN50		生物质炭 Biochar	
CN100		无有机物料 No organic material	
SN100	100	秸秆 Straw	
BN100		生物质炭 Biochar	

表 2 稻秆还田量/(t·hm⁻²)

Table 2 The amount of straw returning

处理 Treatment	2014-03	2014-07	2015-07	2016-07
SN0	4.5	3.2	3.3	3.1
SN50	4.5	3.4	3.8	3.4
SN100	4.5	4.1	4.3	3.6

1.4 土壤含水量与土壤温度测定

每次采集气体时观测 1 次各层次土壤温度及土壤含水量。采用地温计, 同步观测记录 0~5、5~10、10~15、15~20、20~25 cm 5 个层次地温; 在采集气

体时, 随机选取靠近底座一点, 分别取 0~5、5~10 cm 和 10~30 cm 土层的土壤, 用烘干法(105±2℃)测定土壤含水量。

1.5 指标计算

N₂O 通量计算公式^[17]:

$$F = \frac{C_2 \times V \times M_0 \times 273/T_2 - C_1 \times V \times M_0 \times 273/T_1}{A \times (t_2 - t_1) \times 22.4} \quad (1)$$

式中, F 为气体排放通量(mg·m⁻²·h⁻¹), A 为取样箱底面积(m²), V 为体积(m³), M₀ 为气体分子量,

C_1, C_2 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温室气体的体积浓度($\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) ; T_1, T_2 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温度(℃), t_1, t_2 为测定开始和结束的时间(h)。

温室气体累积排放量计算公式:

$$M = \sum_{i=1}^n (F_{i+1} + F_i)/2 \times (d_{i+1} - d_i) \times 24 \times 0.01 \quad (2)$$

式中, M 为气体累积排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), F 为温室气体排放通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), i 为第 i 次采样, $(d_{i+1} - d_i)$ 为相邻两次采样间隔天数, n 为采样次数($n = 19$)。24 × 0.01 为将单位 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 转换为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

N₂O 增温潜势的计算公式^[18]:

$$GWP = 265M(\text{N}_2\text{O}) \quad (3)$$

式中, GWP 为农田排放的温室气体增温潜势($\text{kg} \cdot$

hm^{-2}), $M(\text{N}_2\text{O})$ 为全年 N₂O 气体累积排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.6 数据整理与分析

文中数据、图表采用 Excel 2013 处理, 利用 SPSS 19.0 软件进行相关性分析、通径分析和方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮素水平下有机物料添加对旱作农田 N₂O 通量排放特征的影响

2.1.1 N₂O 通量排放动态特征 如图 1 所示, 全年内各处理间土壤 N₂O 排放通量变化趋势基本一致, 整体随季节的变化表现为降低→升高→降低的变化曲线, 各处理 N₂O 排放通量均呈现较为明显的“双峰型”。施肥前(3月 26 日前)N₂O 排放通量变化趋势平缓, 整体随温度先降低后升高, 从播种(3月

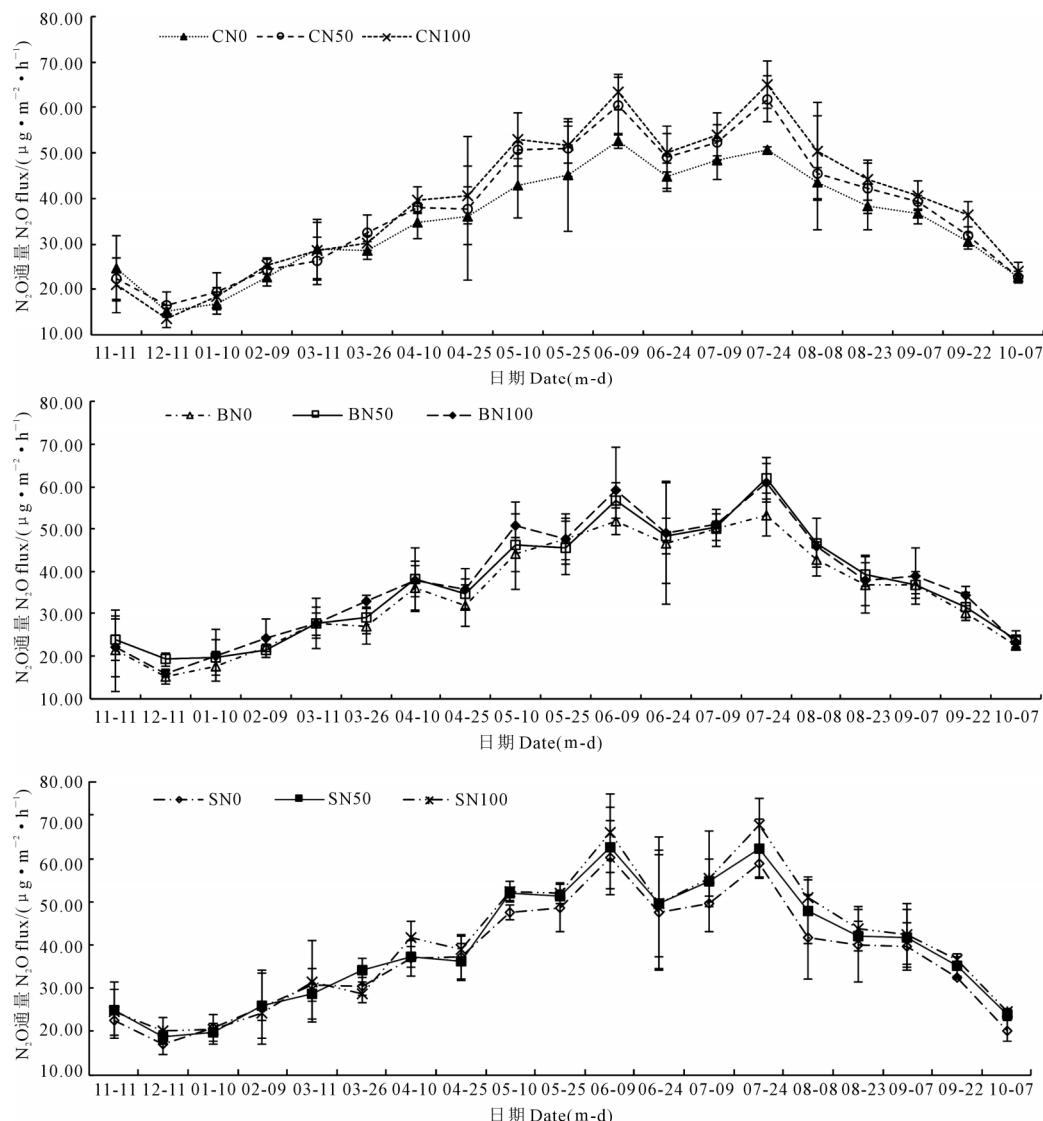


图 1 不同处理旱作农田全年 N₂O 通量动态特征

Fig.1 The dynamic characteristics of N₂O flux under different treatments

26日后)至分蘖期(5月10日前后)通量呈较快上升的态势,在5月10日形成高峰,之后有所下降,但从拔节期(5月25日前后)到抽穗期(6月9日前后)出现急剧增加现象,此时期各处理N₂O通量在整个观测期内达到第1个排放高峰,紧接着灌浆期至成熟期(6月24日前后至7月24日前后)进入新一轮的增长阶段,达到第2个排放高峰,收获后通量再一次回落。在观测期内各处理间N₂O排放通量的波动范围如图1所示,CN100波动范围最大,为13.76~65.01 μg·m⁻²·h⁻¹,BN0最小,为15.05~53.75 μg·m⁻²·h⁻¹。

2.1.2 N₂O季节平均通量排放特征由表3可知,各处理N₂O冬季平均排放通量为19.54 μg·m⁻²·h⁻¹,春季为31.68 μg·m⁻²·h⁻¹,夏季为53.24 μg·m⁻²·h⁻¹,秋季为38.25 μg·m⁻²·h⁻¹。在冬季,秸秆还田下N₂O排放通量SN0、SN50和SN100较CN0分别增加了11.05%、13.98%和17.77%;春季,CN100排放通量最大,BN0排放通量最小,除CN100和BN0外,各处理之间差异不显著($P>5\%$);夏季,SN100、CN100较CN0处理N₂O通量分别增加了15.11%和13.17%;秋季,SN100处理N₂O排放通量最高,BN0处理最低。

2.1.3 N₂O年平均通量排放特征如图2所示,不同处理间N₂O年平均通量差异达到显著水平,各处理N₂O年平均通量大小为SN100>CN100>SN50>CN50>BN100>SN0>BN50>CN0>BN0,其中,处理SN100、CN100和SN50的N₂O通量显著高于其他处

表3 旱作农田N₂O季节平均通量/(μg·m⁻²·h⁻¹)

Table 3 The seasonal average of N₂O flux

处理 Treatment	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
CN0	18.26Dbc	30.88Cab	49.67Ac	35.82Bc
CN50	19.72Dab	31.90Cab	54.18Aabc	38.16Babc
CN100	18.14Dbc	33.54Ca	56.21Aab	41.31Ba
BN0	17.58Dc	29.09Cb	50.29Abc	35.08Bc
BN50	19.66Dab	30.20Cab	51.51Aabc	37.20Bbc
BN100	19.88Dab	31.87Cab	53.07Aabc	37.80Babc
SN0	20.28Da	32.12Cab	52.45Aabc	37.16Bbc
SN50	20.81Da	32.48Cab	54.63Aabc	40.12Bab
SN100	21.50Da	33.01Cab	57.17Aa	41.59Ba

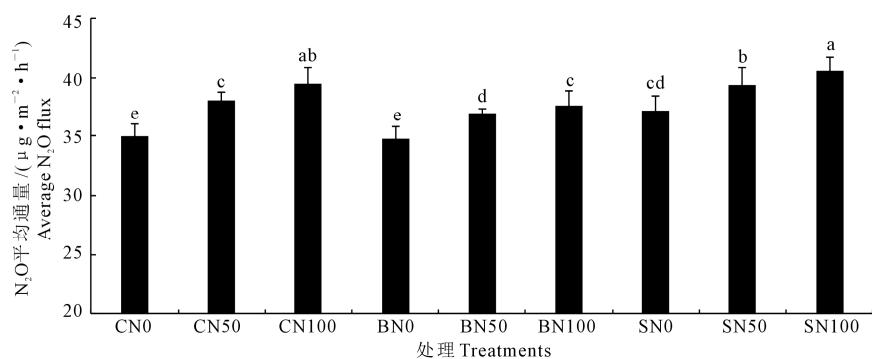
注:不同小写字母表示处理之间的差异性显著,不同大写字母表示季节之间的差异性显著($P<5\%$)。

Note: the different lowercase letters indicate the significant difference of the processing, and the different capital letters indicate the significant difference of quarter($P<5\%$).

理,SN100处理N最高为40.57 μg·m⁻²·h⁻¹,BN0处理最低为34.81 μg·m⁻²·h⁻¹。单施氮肥处理(CN100、CN50、CN0)N₂O年平均通量大小为CN100>CN50>CN0,CN100、CN50处理较CN0处理N₂O气体通量分别增加了12.92%和8.91%;氮肥配施生物质炭的处理下N₂O通量大小为BN100>BN50>BN0,BN100和BN50处理较BN0处理气体通量分别增加了8.17%和5.99%;氮肥配施秸秆N₂O通量大小为SN100>SN50>SN0,SN100和SN50处理较SN0处理气体通量分别增加了9.06%和5.91%。N0水平下,N₂O平均排放通量大小为BN0<CN0<SN0,BN0和SN0处理较CN0处理N₂O排放通量分别减少0.49%和增加了6.37%;N50水平下,N₂O排放通量为BN50<CN50<SN50,BN50和SN50处理较CN50处理N₂O排放通量分别减少3.15%和增加了3.44%;N100水平下,N₂O排放通量为BN100<CN100<SN100,BN100和SN100处理较CN100处理N₂O排放通量分别减少4.67%和增加2.73%。氮素、秸秆还田和生物质炭分别对N₂O年均通量效应在 $P<0.1\%$ 、 $P<1\%$ 和 $P<5\%$ 达到显著水平。

2.2 不同处理对N₂O增温潜势的影响

图3表明,不同处理间N₂O增温潜势差异达到显著水平,其中,SN100处理N₂O增温潜势最高,为847.18 kg·hm⁻²,BN0处理最低,为727.45 kg·hm⁻²。单施氮肥处理(CN100、CN50、CN0)N₂O增温潜势大小为CN100>CN50>CN0,处理CN50、CN100较CN0处理GWP分别增加7.93%和11.05%;氮肥配施生物质炭处理(BN100、BN50、BN0)N₂O增温潜势大小为BN100>BN50>BN0,BN100和BN50处理较BN0处理GWP分别增加了7.98%和6.36%;氮肥配施秸秆处理(SN100、SN50、SN0)N₂O增温潜势大小为SN100>SN50>SN0,SN100和SN50处理较SN0处理GWP分别增加了8.56%和5.65%。N0水平下,N₂O增温潜势大小为BN0<CN0<SN0,BN0和SN0处理较CN0处理N₂O增温潜势分别减少1.00%和增加了6.22%;N50水平下,N₂O增温潜势为BN50<CN50<SN50,BN50和SN50处理较CN50处理N₂O增温潜势分别减少2.42%和增加了4.00%;N100水平下,N₂O增温潜势大小为BN100<CN100<SN100,BN100和SN100处理较CN100处理N₂O增温潜势分别减少3.72%和增加3.94%。



注: 不同小写字母表示处理之间的差异性显著($P<5\%$), 下同。

Note: The different lowercase letters indicate the significant difference ($P<5\%$), the same below.

图 2 不同处理旱作农田全年 N_2O 平均通量

Fig.2 The annual average N_2O flux under different treatments

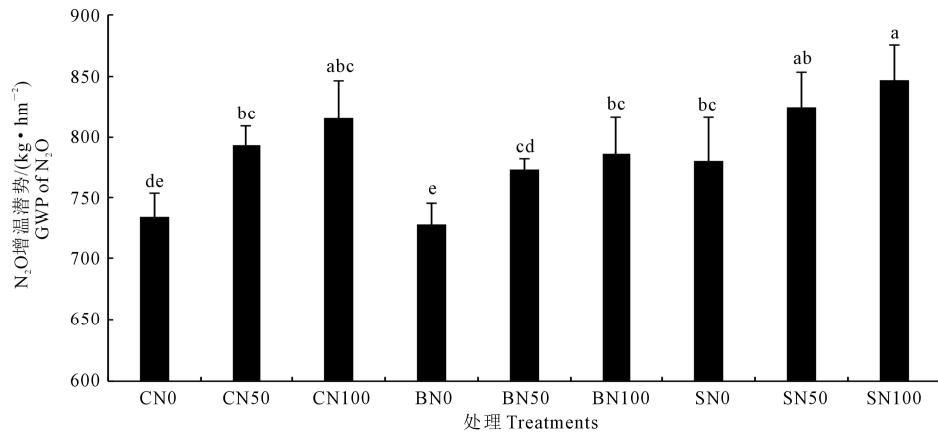


图 3 不同处理 N_2O 的增温潜势

Fig.3 GWP of N_2O under different treatments

2.3 不同处理土壤平均含水量、土壤平均温度动态特征

由图 4 所示, 观测期内, 冬、春季节(2016-11-11—2017-04-25), 土壤平均含水量较高, 整体变化趋势比较平缓(10.22%~11.89%)。夏、秋两季(2017-05-10—2017-10-07), 土壤含水量变化剧烈(5.71%~13.92%)。

观测期内, 土壤平均温度呈现降低→升高→降低的趋势。进入 11 月, 地温开始迅速下降, 直到 1 月 10 日达到最低点, 随后开始缓慢上升, 到 7 月 24 日地温达到最高点, 10 月 7 日, 地温变化出现反常, 可能是冷空气来袭, 造成 10 月 6 日温度迅速降低。

2.4 旱作农田 N_2O 排放通量与土壤水分、土壤温度的关系

如表 4 所示, 观测期内旱作农田 N_2O 排放通量与各土层土壤含水量呈现显著的负相关关系($P<0.01$), 与各土层土壤温度呈现显著性正相关关系。

土壤平均含水量主要通过土壤平均温度对 N_2O

通量进行间接影响(-0.347), 而直接影响较小(-0.163); 土壤平均温度对 N_2O 通量的影响主要是直接影响(0.792), 而间接影响较小(0.071)。

3 讨论

本研究结果表明: 氮肥的施用显著增加 N_2O 排放通量且 N_2O 通量随着施氮量的增加明显增大。可能是因为氮肥进入土壤后增加土壤氮含量水平, 降低了土壤 C:N, 为硝化反硝化过程提供充足底物 NO_3^- 和 NH_4^+ , 提高了土壤微生物活性, 导致硝化与反硝化过程增加了土壤中 N_2O 气体产生^[13,19]。王旭燕等^[20]研究发现 5 种施氮水平下, N_2O 通量随施氮量的增加而增大。

大量研究表明, 生物质炭的施用降低了 N_2O 的排放^[8,10]。由于土壤类型不同, 研究结果也存在差异, Cheng 等^[11]研究发现在氮素缺乏、有机质较低的土壤, 生物质炭更易吸附 NH_4^+-N 、 $NO_3^- - N$, 减少了

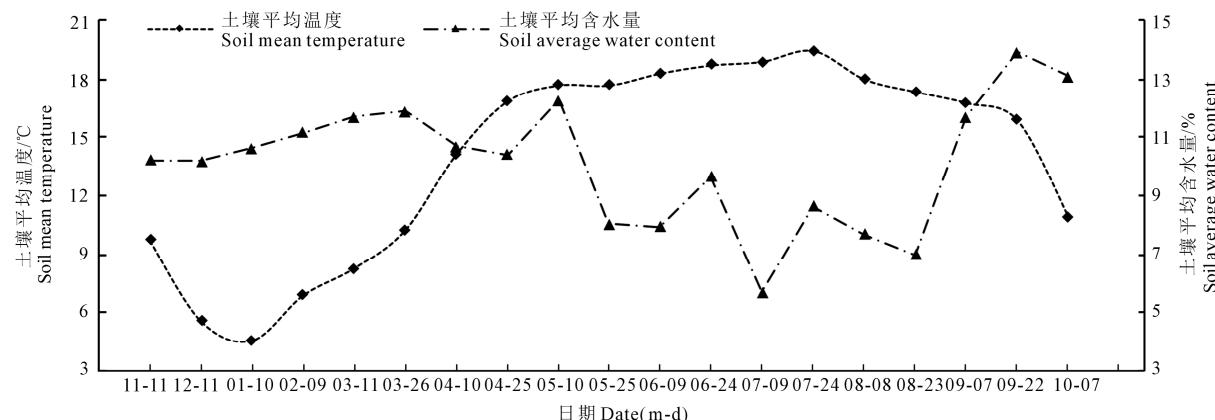


图4 土壤平均温度与土壤平均含水量的动态特征

Fig.4 Dynamic characteristics of average soil temperature and soil water content

表4 土壤含水量与土壤温度对N₂O通量的相互作用Table 4 Interaction between soil water content and soil temperature on N₂O flux

自变量 Argument	土层/cm Soil layer	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient	
				土壤含水量 Soil water content	土壤温度 Soil temperature
土壤含水量 Soil water content	0~5	-0.242 **	-0.095 **		-0.147
	5~10	-0.545 **	-0.154 **		-0.391
	10~30	-0.498 **	-0.143 **		-0.355
	平均 Average	-0.510 **	-0.163 **		-0.347
土壤温度 Soil temperature	0~5	0.886 **	0.868 **	0.018	
	5~10	0.867 **	0.792 **	0.075	
	10~25	0.860 **	0.796 **	0.064	
	平均 Average	0.863 **	0.792 **	0.071	

注: ** 代表该因子在 $P<1\%$ 下达到显著水平。 Note: ** significant level at $P<1\%$.

N₂O 排放。Troy 等^[12]研究表明施用生物质炭增加了 N₂O 的排放是由于土壤有机碳含量高和 WFPS 较高增加反硝化速率导致的。本研究结果显示,在氮肥配施生物质炭后, N₂O 排放通量降低,而单施生物质炭这种效应不明显。可能是添加生物质炭,增加了 N₂O 还原酶的活性,使得 N₂O 被 N₂O 还原酶转化为 N₂^[21]。也可能是由于生物质炭自身具有较高 C:N,而且不易被微生物分解^[6],并能够吸附和保持水分,改善土壤的通气性,不利于微生物的反硝化作用,加速氮素固定,从而减少 N₂O 排放^[9]。由于试验区位于半干旱区,降雨量少,土壤贫瘠,反硝化作用底物 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 不充足,可能导致单施生物质炭时 N₂O 降低不明显,而生物质炭配施氮肥后,降低了 N₂O 排放通量。

秸秆还田对 N₂O 排放通量影响的观点不一致,邹建文等^[14]通过施用不同有机物料对稻田温室气体排放的研究表明小麦秸秆还田减少了 N₂O 排放。一般认为,旱地秸秆还田通常会对土壤微环境的温度和水分都有一定的保持效果,使缺氧的微小区域增多,加强了反硝化作用使旱地 N₂O 排放增加^[13]。本研究结果表明:在不施氮肥或施减量氮肥水平下

配施秸秆还田增加了 N₂O 排放;高量氮肥配施秸秆还田对 N₂O 排放通量影响不明显。这可能是氮肥施用使土壤 C:N 降低,而秸秆还田提高了土壤 C:N 水平并增加了土壤硝化、反硝化所需的能量使 N₂O 排放增加^[22]。张冉等^[23]试验结果表明随着施氮量的增加,秸秆还田对土壤 N₂O 排放的影响逐渐由负效应变为正效应,当施氮量超过一定范围后,秸秆还田对土壤 N₂O 排放再次表现为降低效应。也有研究表明单施氮肥或者只有秸秆还田时其 N₂O 排放均小于氮肥与秸秆同时施用的情况^[24]。

本研究结果表明氮肥的施用显著增加了 N₂O 排放的增温潜势;施氮肥情况下,添加生物质炭显著减小了 N₂O 排放的增温潜势;无氮肥和少量氮肥施用情况下,添加秸秆还田显著增加了 N₂O 排放的增温潜势。这与刘杏仁等^[25]研究结果有差异,可能是 2 个试验区管理措施和气候条件有所差异造成的。

观测期内, N₂O 排放通量与土壤含水量显著负相关关系,与土壤温度显著正相关关系,土壤温度对 N₂O 排放通量的直接影响占主要作用。可能由于 N₂O 的产生与排放对温度的变化非常敏感,当土壤温度分别在 15℃~35℃ 和 5℃~75℃ 范围时,硝化作用和反硝化作用的微生物活性均会随着土壤温度

的升高而增强,N₂O的排放量也随之增加^[26]。土壤水分可以改变土壤的透气性、微生物的活性等来影响N₂O的产生和排放^[3],随着土壤水分含量的增加,硝化过程受到抑制,反硝化过程以生成N₂为主,N₂O在土壤中的扩散也受到严重阻碍,排放量减少^[9]。

4 结 论

1)秸秆或生物质炭与氮肥配施对N₂O排放通量的影响无交互效应。

2)全年内,各处理N₂O排放通量随时间的变化趋势一致。施用氮肥显著增加了N₂O排放通量,且随施氮量的增加,N₂O通量显著增大;氮肥配施生物质炭显著降低了N₂O排放通量,单施生物质炭对N₂O排放通量减小不显著;无氮肥或施用少量氮肥配施小麦秸秆,显著增加了N₂O排放通量,而高量氮肥配施秸秆还田对N₂O排放通量增大不显著。

3)氮肥的施用显著增加了N₂O排放的增温潜势;氮肥施用情况下,添加生物质炭显著减小了N₂O排放的增温潜势;无氮肥和少量氮肥配施小麦秸秆显著增加了N₂O排放的增温潜势。

4)N₂O排放通量与土壤温度呈显著正相关关系,与土壤含水量呈显著负相关关系。土壤温度对N₂O排放通量的直接影响占主要作用。

参 考 文 献:

- [1] IPCC. Global Change 1995: The Science of Climate Chang. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [2] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. Science, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [3] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等.农田土壤主要温室气体(CO₂,CH₄,N₂O)的源/汇强度及其温室效应研究进展 [J].中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
- [4] Qin S, Wang Y, Hu C, et al. Yield-scaled N₂O emissions in a winter wheat-summer corn double-cropping system [J]. Atmospheric environment, 2012, 55(3): 240-244.
- [5] Song C, Zhang J. Effects of soil moisture, temperature, and nitrogen fertilization on soil respiration and nitrous oxide emission during maize growth period in northeast China [J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science, 2009, 59(2): 97-106.
- [6] Liu Y, Yang M, Wu Y, et al. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar [J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(6): 930-939.
- [7] Van Zwieten L, Singh B, Joseph S, et al. Biochar and emissions of non CO₂ greenhouse gases from soil [M]. London: Biochar for Environmental Management Science and Technology, 2009:227-249.
- [8] 宋敏,齐鹏,蔡立群,等.不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放研究 [J].中国生态农业学报, 2016, 24(9): 1185-1195.
- [9] 李露,周自强,潘晓健,等.氮肥与生物炭施用对稻麦轮作系统甲烷和氧化亚氮排放的影响 [J].植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1095-1103.
- [10] Ameloot N, De Neve S, Jegajeevagan K, et al. Short-term CO₂ and N₂O emissions and microbial properties of biochar amended sandy loam soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 401-410.
- [11] Cheng Y, Cai Z, Chang S X, et al. Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N₂O production in a cultivated Black Chernozem [J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(8): 941-946.
- [12] Troy S M, Lawlor P G, O'Flynn C J, et al. Impact of biochar addition to soil on greenhouse gas emissions following pig manure application [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 60: 173-181.
- [13] 李贵桐,赵紫娟,黄元仿,等.秸秆还田对土壤氮素转化的影响 [J].植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 162-167.
- [14] 邹建文,黄耀,宗良纲,等.稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田N₂O排放的影响 [J].中国农业科学, 2003, 36(4): 409-414.
- [15] 贺京,李涵茂,方丽,等.秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响 [J].中国农学通报, 2011, 27(20): 246-250.
- [16] 万运帆,李玉娥,林而达,等.静态箱法测定旱地农田温室气体时密闭时间的研究 [J].中国农业气象, 2006, 27(2): 122-124.
- [17] 万运帆,林而达.翻耕对冬闲农田CH₄和CO₂排放通量的影响初探 [J].中国农业气象, 2004, 25(3): 8-10.
- [18] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [19] Yan X, Akimoto H, Ohara T. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in East, Southeast and South Asia [J]. Global Change Biology, 2003, 9(7): 1080-1096.
- [20] 王旭燕,张仁陟,蔡立群,等.不同施氮处理下旱作农田土壤CH₄,N₂O气体排放特征研究 [J].环境科学学报, 2015, 35(11): 3655-3661.
- [21] Šlmeek M, Cooper J E. The influence of soil pH on denitrification: progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years [J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53(3): 345-354.
- [22] Shan J, Yan X. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils [J]. Atmospheric Environment, 2013, 71(3): 170-175.
- [23] 张冉,赵鑫,濮超,等.中国农田秸秆还田土壤N₂O排放及其影响因素的Meta分析 [J].农业工程学报, 2015, 31(22): 1-6.
- [24] Liu C, Wang K, Meng S, et al. Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat-maize rotation field in northern China [J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2011, 140(1): 226-233.
- [25] 刘否认,张星,张晴雯,等.施用生物炭和秸秆还田对华北农田CO₂,N₂O排放的影响 [J].生态学报, 2017, 37(20): 58-69.
- [26] 郎漫,李平,张小川.土地利用方式和培养温度对土壤氮转化及温室气体排放的影响 [J].应用生态学报, 2012, 23(10): 2670-2676.