

生物质炭对旱作春玉米农田 N₂O 排放的效应

黄海洲^{1,2}, 肖 茜^{1,2}, 沈玉芳^{1*}, 李世清³

(1.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过田间试验,采用密闭式静态暗箱-气相色谱法研究不同生物质炭添加量(0、10、20、30 t·hm⁻²)对黄土旱塬旱作春玉米农田 N₂O 排放的影响。结果表明:生物质炭添加降低了施氮农田春玉米生长季 N₂O 排放通量峰值和排放总量,添加 30、20、10 t·hm⁻² 生物质炭的三个处理 N₂O 排放总量比不添加生物质炭的处理分别降低 19.24%、9.89%、3.40%,其中添加 30 t·hm⁻² 生物质炭处理降低显著($P<0.05$),但添加 20 t·hm⁻² 的生物质炭未对不施氮农田 N₂O 排放通量和总量产生显著影响。无论添加生物质炭与否,生长季不施氮处理的 N₂O 排放通量和总量均显著低于施氮处理。添加生物质炭不同程度提升了农田 0 cm 和 10 cm 土壤温度,减少了施氮处理 0~20 cm 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量,但对农田 0~20 cm 土层土壤含水量影响不显著。相关分析表明,试验农田 N₂O 的排放通量与 0~20 cm 土层土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量、含水量均呈极显著正相关关系($P<0.001$),与 0 cm 与 10 cm 土壤温度呈负相关关系。添加生物质炭后矿质氮含量的减少可能是旱作春玉米农田 N₂O 排放减少的主要原因。

关键词:生物质炭;氧化亚氮;旱作玉米;氮肥

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)10-2063-08 **doi:**10.11654/jaes.2014.10.026

Effect of Biochar on Nitrous Oxide Emissions from Dryland Spring Corn Field on the Loess Plateau

HUANG Hai-zhou^{1,2}, XIAO Qian^{1,2}, SHEN Yu-fang^{1*}, LI Shi-qing³

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: A field experiment was conducted to measure N₂O emissions using static chamber-gas chromatography method. Six treatments were used: C0N0 (no biochar, no N), C2N0 (20 t·hm⁻² biochar, no N), C0N1 (no biochar, 225 kg N·hm⁻²), C1N1 (10 t·hm⁻² biochar, 225 kg N·hm⁻²), C2N1 (20 t·hm⁻² biochar, 225 kg N·hm⁻²) and C3N1 (30 t·hm⁻² biochar, 225 kg N·hm⁻²). Compared to C0N1 treatment, biochar amendments decreased cumulative N₂O emissions by 3.40%, 9.89% and 19.24% for the C1N1, C2N1 and C3N1, respectively. Additions of biochar increased soil temperature at 0 cm and 10 cm soil layers, but decreased mineral N content in 0~20 cm soil. Soil moisture in 0~20 cm was not affected by biochar. A significant positive correlation was found between N₂O emissions and soil NO₃⁻-N, NH₄⁺-N content and soil moisture in 0~20 cm soil, while a negative correlation were observed between N₂O emissions and soil temperature at 0 cm and 10 cm. The reduction in mineral N concentrations by biochar was the main factor that reduced the N₂O emissions in dryland spring corn field.

Keywords: biochar; nitrous oxide; dryland corn; nitrogen fertilizer

N₂O 具有较强的增温潜势,是重要的温室气体之一,其潜在增温作用约为 CO₂ 的 298 倍^[1];同时还参

与大气中许多光化学反应,威胁人类健康。IPCC 第四份全球气候评估报告指出,全球大气 N₂O 浓度的增加主要来自于农业,占总排放量的 80%^[2]。我国是农业大国,旱作农田在农业生产中占据重要地位,由于其化肥使用量大,成为大气 N₂O 的重要排放源。因此,研究旱作农田土壤 N₂O 的排放特征,以及如何减少其 N₂O 的排放显得尤为重要。

研究表明,不同的农田管理措施,如施肥、耕作方式、灌溉以及作物类型等都会通过影响土壤水分、温

收稿日期:2014-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51279197);中央高校基本科研业务费专项资金(YQ2013009);陕西自然科学基金(2012JM3010);甘肃省农业科学院农业科技创新专项(2012GAAS15-22-4)

作者简介:黄海洲(1986—),男,硕士研究生,主要从事生理生态方面的研究。E-mail:huanghai30@163.com

***通信作者:**沈玉芳 E-mail:shenyufang@nwsuaf.edu.cn

度或土壤结构等土壤的物理性质和微生物特性,从而影响土壤的硝化、反硝化反应和 N_2O 在土壤中的传输,进一步影响土壤的 N_2O 排放通量。Pelstera 等^[3]研究发现,旱作农田从传统耕作方式转变成免耕方式引起 N_2O 排放量的增加,但增加是暂时的。化肥氮是农业土壤中产生 N_2O 的最大来源,肥料种类和施肥量对农田土壤 N_2O 排放有显著影响,土壤 N_2O 的排放量与氮肥施用量呈线性关系^[4]。但施肥对土壤 N_2O 排放的影响又受土壤水分条件的影响,水分影响着 N_2O 在土壤中的运输及向大气中的扩散。当土壤含水量较低时,施肥并不会导致 N_2O 通量迅速升高,高水分条件下施肥迅速增加农田土壤 N_2O 排放^[5]。土壤 N_2O 排放是非常复杂的过程,如何通过一定的调控措施减少农田 N_2O 排放,使减排措施达到效益最优是科学家需要重点解决的问题之一。

生物质炭是由植物生物质在完全或部分缺氧的情况下经热解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质^[6]。向土壤中施加生物质炭以减少温室气体排放是当前国际生物质炭研究领域的前沿,也是能否实现废弃有机物资源生物质炭还田的关键。一些研究表明^[7-8],在水稻田内添加生物质炭能够显著降低 N_2O 的排放^[9-10],土壤 NO_x 的排放减少约 80%^[11],但 Clough 等^[12]却发现生物质炭施入土壤后促进 N_2O 排放。分析发现,不同学者所采用的实验材料、研究方法以及实验对象存在较大差异,对生物质炭能否真正减少土壤温室气体 N_2O 排放,还存在很多争议。目前结果主要来自实验室内优化条件下短期培养数据,缺乏田间长期定位试验数据,土壤类型也主要集中在热带酸性土壤及水稻土壤,有关生物质炭对旱作农田 N_2O 排放影响因素的研究较少。黄土高原旱作农业降水量少且季节分布不均、年际间变幅大,生物质炭添加如何影响农田 N_2O 排放有待深入研究。研究采用密闭式静态暗箱-气相色谱法,通过长期定位监测生物质炭输入后旱作农田土壤 N_2O 的排放,开展生物质炭对黄土高原旱作农田 N_2O 排放规律及影响因子的分析研究,以期为正确评价生物质炭在黄土高原旱作农田土壤 N_2O 排放中的作用以及有机物质生物质炭化技术在旱地农田中的应用提供一定参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验安排在西北农林科技大学水土保持研

究所长武国家农业生态试验站(107°40' E, 35°12' N)。该试验站位于黄土高原中南部的陕西省长武县洪家镇王东村,海拔 1200 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水 584 mm,年均气温 9.1 °C,年日照时数 2218 h,无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m,属典型旱作农业区;地带性土壤为黑垆土,土壤质地为壤土,全剖面土质均匀疏松,表层土壤密度为 1.30 g·cm⁻³。

1.2 试验设计

试验于 2013 年 4—9 月进行,试验期内总降雨 424 mm,玉米生育期降雨分布及气温状况见图 1。为了比较生物质炭添加对不同施肥下农田 N_2O 排放的影响,试验设 6 个处理,3 次重复,随机区组排列,小区面积为 7 m×8 m=56 m²。C0N0:不施氮+0 t·hm⁻² 生物质炭;C2N0:不施氮+20 t·hm⁻² 生物质炭;C0N1:225 kg N·hm⁻²+0 t·hm⁻² 生物质炭;C1N1:225 kg N·hm⁻²+10 t·hm⁻² 生物质炭;C2N1:225 kg N·hm⁻²+20 t·hm⁻² 生物质炭;C3N1:225 kg N·hm⁻²+30 t·hm⁻² 生物质炭。以含氮量 46%的尿素为氮源,分 3 次施用,其中基肥与种肥占 40%,拔节期追肥占 30%,抽雄期追肥占 30%。各处理施磷肥 40 kg P·hm⁻²,钾肥 80 kg K·hm⁻²,分别以含 P₂O₅ 12%的过磷酸钙和含 K₂O 45%的硫酸钾为肥源。供试生物质炭为玉米秸秆炭(河南三利新能源公司生产),热裂解炭化温度 350~450 °C。生物质炭、基施氮肥、磷肥和钾肥均在播前撒于地表后微耕机翻耕,使其充分混匀;追施氮肥用点种器施入。玉米种植密度为 65 000 株·hm⁻²,品种为先玉 335。各处理均为宽窄行种植,宽行 60 cm、窄行 40 cm。试验期间采用雨养方式,不进行灌溉处理。

1.3 监测指标与监测方法

1.3.1 N_2O 排放通量测定

采用密闭式静态箱法测定 N_2O 排放。箱体包括顶箱和底座两部分,均由不锈钢制成。顶箱长、宽、高均为 50 cm,箱内安装风扇以将箱内气体混匀,箱外包覆泡沫层用来保温。底座长、宽、高分别为 50 cm、50 cm、15 cm,底座安置在小区中央,插入土层 15 cm 深处,整个生长季不再移动,框内种植两棵玉米,玉米长高后(6月下旬,九叶期)折断,只留 45 cm 高度^[13]。气体采集于每天上午 8:30 至 11:30 之间进行,采集时将顶箱放置在底座上部的凹槽中,用水密封,分别在盖箱后 0、10、20、30 min 用 50 mL 注射器抽取箱内气体 50 mL。采气频率:平时为每 5 d 监测 1 次,施氮肥后从第 2 d 开始每 2 d 监测 1 次,连续监测 10 d 后恢复为每 5 d 监测 1 次;降雨后从第 2 d 开始每 2 d 监

测 1 次,连续监测 3 次后恢复为每 5 d 监测 1 次。所采集气体暂时保存在注射器内,当天用 Agilent 7890 A 气相色谱仪(Agilent Technologies inc.)测定。N₂O 排放通量计算公式为:

$$F=273/(273+T) \times 28/22.4 \times 60 \times H \times dc/dt$$

式中: F 为 N₂O 排放通量(以 N₂O-N 计), $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; T 为箱内温度;28 为每摩尔 N₂O 分子中 N 的质量数;22.4 为温度为 273 K 时的 N₂O 摩尔体积; H 为采样箱高度,cm; c 为 N₂O 气体浓度, $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$; t 为关箱时间,min; dc/dt 为采样箱内 N₂O 气体浓度的变化率, $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.3.2 温度的测定

每次采集气体样品的同时用便携式铂电阻数字温度计(JM624)测定箱内空气、土壤表层、土壤 10 cm 处温度,测定时间分别为采集第 1 针及最后 1 针气体样品时,取两次测定的平均值作为当天的温度值。降雨量及大气温度来自长武试验区自动气象站。

1.3.3 土壤含水量、矿质氮、全氮、pH 及容重测定

施氮后 10 d 和降雨后 6 d 内每 2 d 采集 1 次,其余时间每 5 d 采集 1 次箱内 0~20 cm 土层土样(土壤样品采集与气体样品采集在同一时间段内进行),用

烘干法测定土壤含水量;用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸提,连续流动分析仪测定浸提液 NH_4^+-N 及 NO_3^--N 的含量。于玉米收获后在玉米行间随机取点采集 0~20 cm 土层土样,用凯氏定氮法测定全氮含量;采用土水比 1:2.5,用复合玻璃电极测定土壤 pH;采用环刀法测定土壤容重。

1.4 数据处理

试验数据采用 SPSS 16.0 和 Sigmaplot 10.0 软件进行 t 检验、方差分析和相关性分析及作图。

2 结果与分析

2.1 生物质炭对农田 N₂O 排放的影响

2.1.1 生长季 N₂O 排放通量

春玉米生长季农田 N₂O 的排放动态变化见图 1。不施肥时(CON0 和 C2N0),农田 N₂O 排放通量相对稳定,且排放量也一直维持在较低的水平;施肥后,添加不同生物质炭处理农田均出现明显的 N₂O 排放峰,且排放峰出现时间和高低与施肥量、土壤含水量、施肥后降雨时间及降雨量有一定关系。第一次排放峰出现在施基肥(4 月 16 日)后的第 7 d,降雨后的第 4 d,CON1、C1N1、C2N1 和 C3N1 处理的排放通量分别高达 131.85、126.48、113.62、103.25 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 第二

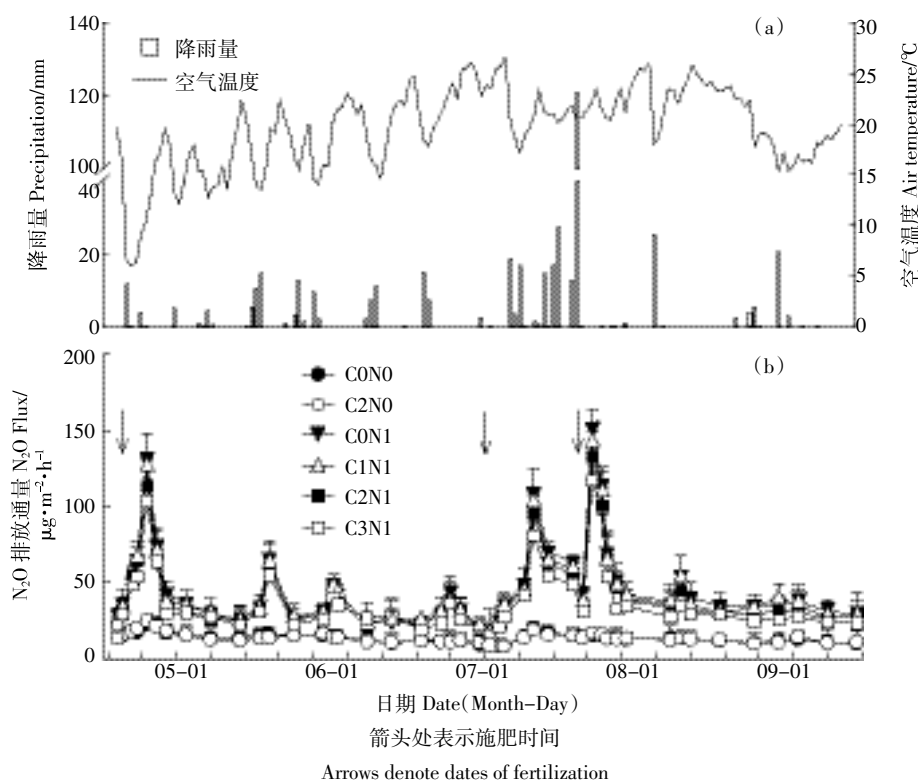


图 1 玉米生长季降雨分布和气温变化(a)以及 N₂O 排放通量(b)

Figure 1 Dynamics of precipitation and air temperature(a), and N₂O emissions(b) during corn growth season

次排放峰出现在拔节期期间的第一次追肥(7月1日)后第10 d,降雨后的第3 d, C0N1、C1N1、C2N1 和 C3N1 处理的排放通量分别为 108.92、102.95、94.72、80.59 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;抽雄期期间的第二次追肥(7月21日)后第2 d C0N1、C1N1、C2N1 和 C3N1 处理的 N_2O 排放通量均达到生长季排放通量的最高值,分别为 151.61、142.25、131.93、119.54 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,这可能与这次追肥后第1 d 突降 120 mm 强降雨有关。另外,生物质炭的添加降低了 N_2O 排放通量峰值,且降幅随添加量的增加而增大。

2.1.2 生长季 N_2O 排放总量

由图2可以看出,氮肥是影响 N_2O 排放总量的主要因素,不施氮处理的农田 N_2O 排放总量极显著低于施氮处理($P<0.01$)。生物质炭添加降低了施氮农田春玉米生长季 N_2O 排放总量, C3N1 处理 N_2O 排放总量显著低于 C0N1 处理($P<0.05$),减少了 19.24%, C1N1、C2N1 比 C0N1 处理仅减少 3.40%、9.89%,差异

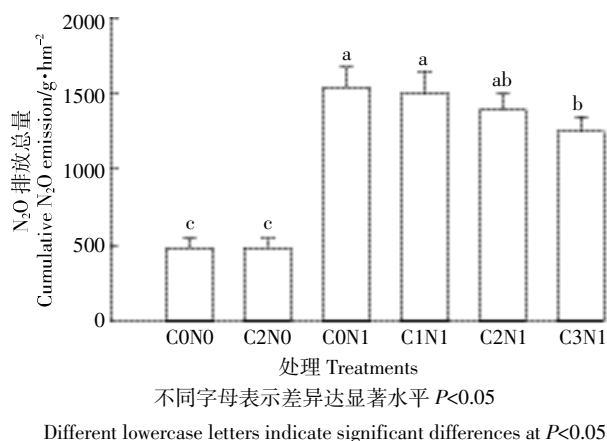


图2 玉米生长季 N_2O 排放总量

Figure 2 Cumulative N_2O emissions in different treatments during corn growth season

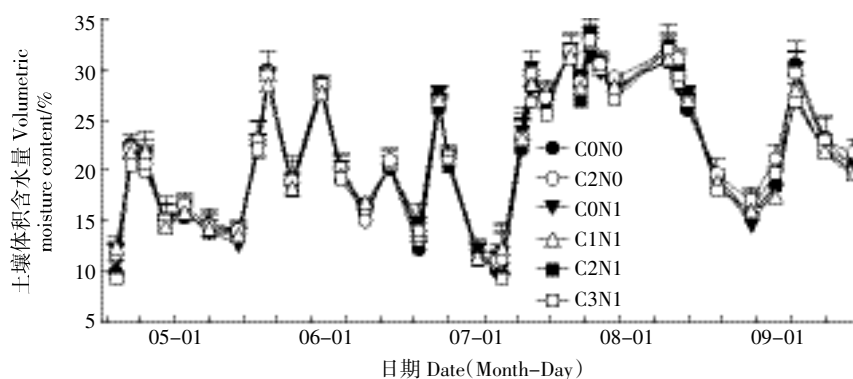


图3 玉米生长季水分动态变化

Figure 3 Dynamics of soil volumetric water content in different treatments during corn growth season

未达显著水平。不施氮时, $20\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的生物质炭添加未对试验农田 N_2O 排放总量产生显著影响。

2.2 生物质炭对农田土壤性质的影响

2.2.1 生长季土壤含水量

土壤持水能力受土壤质地、结构和土壤有机质含量的影响。生物质炭施入土壤后改变土壤孔隙度和团聚程度,因而可能会影响土壤水分持有能力。整个生长季 0~20 cm 土壤含水量变化为 9.32%~33.72% (图3)。添加生物质炭并未显著改变农田土壤表层土壤含水量, C0N0 和 C2N0 两个不施氮处理整个生长季的表层土壤平均含水量分别为 21.71% 和 22.10%; C0N1、C1N1、C2N1 和 C3N1 四个施氮处理分别为 21.88%、21.53%、21.70%、21.48%, 差异均较小。生长季后期不施氮处理的土壤含水量平均略高于施氮处理,可能与施氮处理玉米植株壮大,蒸腾耗水量相应增加有关。

2.2.2 生长季土壤温度

土壤温度与种子萌发、幼苗的生长及作物产量关系密切,又是影响土壤 N_2O 产生与排放的一个重要因素。不同处理土壤温度的测定结果(图4、图5)表明,无论施氮与否,添加生物质炭后农田土表(0 cm)和 10 cm 土壤的生长季平均温度增加,且生物质炭对土表(0 cm)的增温效果更显著,生长前期的温度增幅最高达 0.7 $^{\circ}\text{C}$ 。平均来看,不施氮时, C2N0 处理 0~20 cm 土层平均土壤温度比 C0N0 增加 0.2 $^{\circ}\text{C}$; 施氮时, C1N1、C2N1、C3N1 处理 0~20 cm 土层平均土壤温度分别比 C0N1 增加了 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 、0.2 $^{\circ}\text{C}$ 、0.4 $^{\circ}\text{C}$, 但差异不显著。

2.2.3 生长季土壤矿质氮(NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N)含量

不同处理对 0~20 cm 土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量的影响见图6。由图6可知, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量

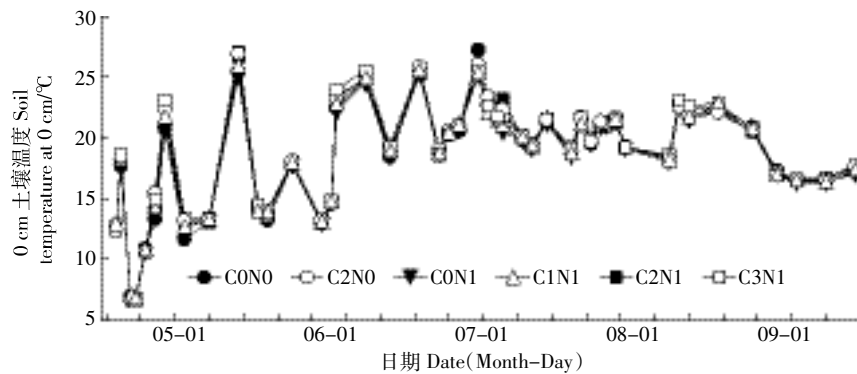


图 4 玉米生长季土表(0 cm)温度变化

Figure 4 Dynamics of soil temperature(0 cm) in different treatments during corn growth season

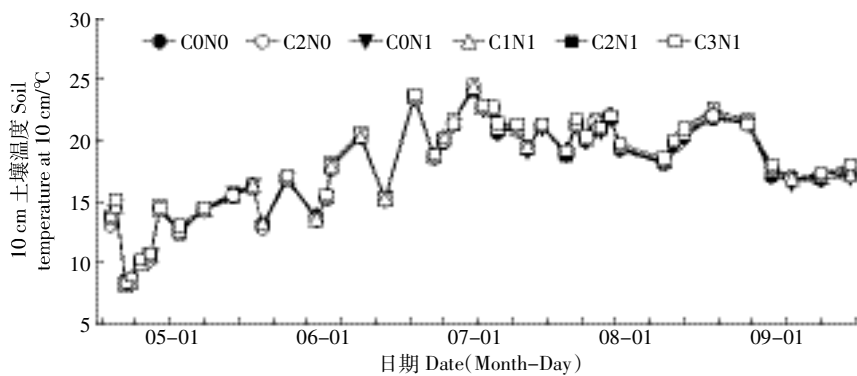


图 5 玉米生长季 10 cm 土壤温度变化

Figure 5 Dynamics of soil temperature(10 cm) in different treatments during corn growth season

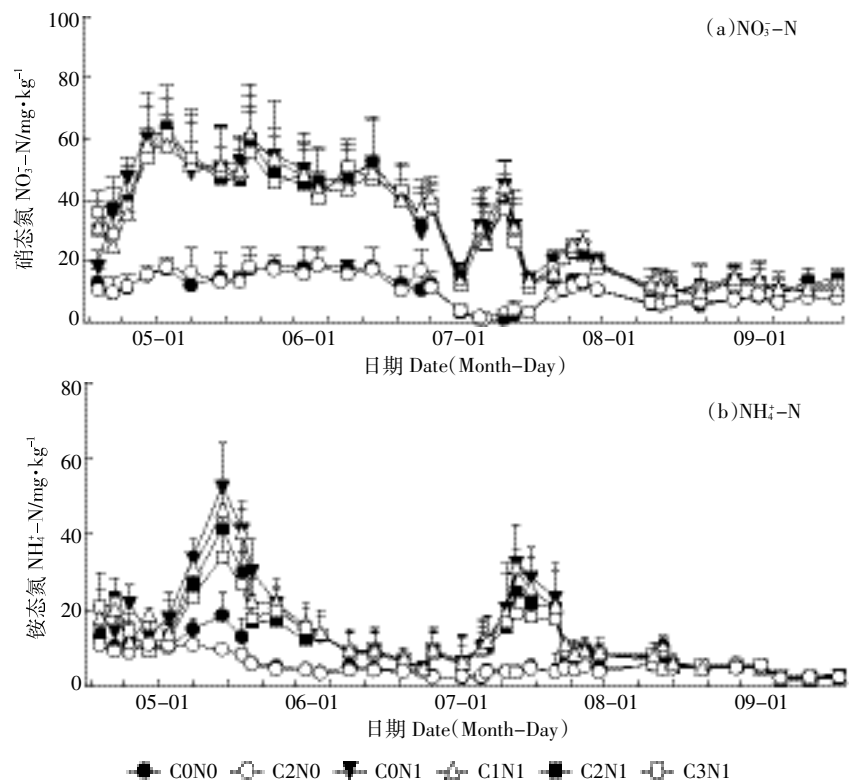


图 6 玉米生长季土壤矿质氮含量动态变化

Figure 6 Dynamics of soil mineral nitrogen in each treatment during corn growth season

的两次峰值均出现在施肥后(4月16日及7月1日),但第2次增加相对较少,未达显著水平;生育后期0~20 cm土层土壤的 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量显著降低,所有处理的平均 NH_4^+ -N含量无明显差异。比较不同处理发现,不施氮时,添加生物质炭减少了0~20 cm土层土壤 NH_4^+ -N含量而未影响 NO_3^- -N含量;施氮时,添加生物质炭同时减少了0~20 cm土层土壤 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N的含量,C1N1、C2N1、C3N1处理的 NH_4^+ -N平均含量比C0N1分别降低了6.5%、15.8%、19.7%。

2.3 农田 N_2O 排放主要影响因素

农田土壤作为大气中 N_2O 的最主要释放源,肥料氮是旱作农田土壤 N_2O 排放的最主要源,氮肥施用对农田土壤 N_2O 的排放有明显的促进作用^[4];土壤水热条件则是影响其 N_2O 产生和排放的重要因子。春玉米整个生长季 N_2O 排放通量与0~20 cm土壤水分、0~20 cm土壤 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量、土表(0 cm)温度及10 cm土壤温度的相关性分析结果见表1。施肥后,0~20 cm土壤 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量显著增加,出现明显的 N_2O 排放峰;而未施氮处理整个生长季土壤 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量及 N_2O 排放较为平缓(图1b和图6)。0~20 cm土层土壤含水量的变化直接受降雨的影响(图1a,图3),添加生物质炭并未显著改变0~20 cm土层平均土壤含水量,但降低了 N_2O 排放总量。这可能是由于随生物质炭添加量的增加,降雨对施氮处理的 N_2O 排放通量增加效应减弱。相关性分析(表1)表明, N_2O 的排放通量与0~20 cm土层土壤含水量呈极显著正相关关系($P<0.001$),与白红英等^[14]研究结果一致。但本试验春玉米生长季土表0 cm和10 cm土壤温度与 N_2O 排放通量分别呈极显著负相关($P<0.01$)和显著负相关($P<0.05$),与已有 N_2O 排放通量大小和温度呈显著正相关的研究结果^[15]不一致,这可能与降雨后 N_2O 排放增加而农田土壤温度下降有关。另外,随着生物质炭添加,土壤温度呈升高趋势,但 N_2O 排放减少。综合分析研究结果,我们认为添加生物质炭后,矿质氮含量的减少可能是 N_2O 的排放

减少的主要原因,而且相关性分析也表明, N_2O 的排放通量与 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量呈极显著的正相关关系($P<0.001$)。

3 讨论

为确保作物正常生长,目前我国每年都要给旱作农田土壤施加一定量的氨基氮肥,这为硝化作用提供了大量的底物 NH_4^+ ,硝化作用影响着耕地土壤氮素转化,是大气中 N_2O 的主要产生机制之一^[16]。旱作农田土壤 N_2O 的排放还受到不同的环境因素和农田管理措施(如pH、土壤温度、湿度、施肥、耕作等)的共同作用和影响。Yanai等^[18]研究认为,生物质炭灰分中的碱性物质可以改变土壤的pH,刺激 N_2O 还原酶的活性,减少 N_2O 排放。但本试验供试土壤为弱碱性土壤,具有一定的酸碱缓冲能力,因此不同处理土壤pH并未表现出明显差异(表2)。不同处理 N_2O 排放峰均出现在3次施肥降雨后,即施肥及土壤水分含量增加之后^[5]。在追肥后降雨前由于土壤含水量极低,可以从试验小区内观察到表层土下方所追施氮肥仍然呈颗粒状,测定的 N_2O 排放峰也没有产生,这与Saarnio等^[17]研究结果一致。

对试验结果进一步分析发现,生物质炭的添加降

表2 N_2O 排放总量和0~20 cm土壤全氮、pH和容重

Table 2 Cumulative N_2O emissions, soil pH, total N and bulk density of top soil(0~20 cm) in different treatments

处理 Treatment	N_2O 排放总量 Cumulative N_2O emissions/kg·hm ⁻²	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	pH	容重 Bulk density/ g·cm ⁻³
C0N0	0.48±0.07c	1.04±0.01c	8.04	1.30±0.04
C2N0	0.48±0.06c	1.14±0.06b	8.05	1.27±0.07
C0N1	1.54±0.13a	1.01±0.06c	8.02	1.30±0.05
C1N1	1.49±0.15a	1.09±0.04bc	8.05	1.28±0.03
C2N1	1.39±0.11ab	1.15±0.04ab	8.08	1.27±0.04
C3N1	1.25±0.10b	1.24±0.07a	8.10	1.25±0.09

注:同列中不同小写字母代表 $P<0.05$ 。

Different letters within a column represent significant difference between treatments at $P<0.05$.

表1 春玉米生长季农田土壤 N_2O 排放通量与各影响因素的相关性

Table 1 Correlation coefficients between soil N_2O flux and influencing factor during spring corn growth season

<i>R</i>	水分 Soil moisture	0 cm 地温 Soil temperature at 0 cm	10 cm 地温 Soil temperature at 10 cm	NO_3^- -N 含量 NO_3^- -N content	NH_4^+ -N 含量 NH_4^+ -N content
N_2O 排放通量 N_2O flux	0.368***	-0.179**	-0.144*	0.263***	0.308***

注:*代表 $P<0.05$,**代表 $P<0.01$,***代表 $P<0.001$ 。

Note: *indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$, *** indicates $P<0.001$.

低了降雨后 N_2O 排放通量峰值,且随添加量的增加,降低显著;这可能与生物质炭具有多孔、低密度特性有关。试验添加生物质炭后土壤容重不同程度减小(表2),增加了土壤孔隙度,而土壤孔隙度影响土壤中氧气的供给状况,对 N_2O 的排放过程产生极为重要的影响^[18]。土壤的保水性也主要取决于土壤孔隙的分布和连通性。Novak 等^[19]研究认为,添加生物质炭能够增加土壤的保水能力,但本试验各处理间的水分含量差异未达显著水平,可能与试验土壤温度升高有关。生物质炭呈黑色,随着添加量的增加试验土壤的孟塞尔色度值有变小趋势^[20];本试验地区又具有较强的太阳辐射与较长的日照时间,有利于黑色物质吸收更多的太阳辐射来提高土壤温度,增加土壤水分蒸发。

土壤温度的提升,孔隙度的增加,以及生物质炭颗粒对游离 NH_4^+-N 的吸附,一方面可以给微生物提供良好的生存环境^[21],增加微生物的活性,在土壤中固定更多的氮,增加土壤的全氮含量(表2),另一方面可降低反硝化细菌的活性,降低土壤的硝化与反硝化作用^[22-23],降低 N_2O 的排放^[24]。比较不同处理发现,施氮处理 C1N1、C2N1、C3N1 的 NH_4^+-N 平均含量比 C0N1 分别降低了 6.5%、15.8%、19.7%,说明可能是生物质炭对 NH_4^+-N 的吸附作用减缓了 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N 的反应速率进而减少了 N_2O 的排放。

农田土壤是 N_2O 重要排放源,基于全球农田土壤 1008 个 N_2O 排放数据分析表明,施肥农田土壤每年释放 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 的量达到 3.3 Tg,且为了满足日益增长的人口对粮食的需求,越来越多肥料被施入农田,必将极大地增加农田土壤 N_2O 的排放量^[25]。因此,加强我国农田土壤 N_2O 排放规律及减排措施的研究十分必要。施加生物质炭后,由于不同种类土壤在质地、水分含量、通气状况、温度、本底有机质含量、微生物种类和数量、植被类型等方面的差异,因而 N_2O 排放也存在差异,目前对生物质炭能否减少土壤温室气体排放尚无定论。生物质炭对在我国农业生产中占据重要地位的旱作农田 N_2O 排放的影响究竟如何,需要进一步长期的田间定位监测,为准确评价生物质炭对旱作农田土壤 N_2O 排放影响积累更加丰富和代表性的数据,同时也为生物质炭还田大面积推广应用提供一定科学依据。

4 结论

生物质炭添加降低了施氮农田春玉米生长季

N_2O 排放通量峰值和排放总量,且 C3N1 处理降低显著($P<0.01$)。无论添加生物质炭与否,生长季不施氮处理农田 N_2O 排放通量和总量均显著低于施氮处理。添加生物质炭不同程度提高了农田 0 cm 和 10 cm 土壤温度,减少了施氮处理 0~20 cm 土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量,但对农田 0~20 cm 土层土壤含水量影响不显著;相关性分析表明,试验农田 N_2O 的排放通量与 0~20 cm 土层土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量、含水量均呈极显著正相关关系($P<0.001$)。添加生物质炭后矿质氮含量的减少可能是旱作春玉米农田 N_2O 排放减少的主要原因。

参考文献:

- [1] IPCC, Working Group I. The physical science basis[R]. Forth Assessment Report, 2007.
- [2] IPCC, Working Group III. Greenhouse gas mitigation in agriculture[R]. Fourth Assessment Report, 2007.
- [3] Pelstera D E, Larouche F, Rochette P, et al. Nitrogen fertilization but not soil tillage affects nitrous oxide emissions from a clay loam soil under a maize-soybean rotation[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 115: 116:16-26.
- [4] Qin S P, Wang Y Y, Hu C S, et al. Yield-scaled N_2O emissions in a winter-summer corn double-cropping system[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 55: 240-244.
- [5] 刘运通, 万运帆, 林而达, 等. 施肥与灌溉对春玉米土壤 N_2O 排放通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 997-1002.
LIU Yun-tong, WAN Yun-fan, LIN Er-da, et al. N_2O flux variations from spring maize soil under fertilization and irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 997-1002.
- [6] Antal M J, Gronli M. The art, science, and technology of charcoal production[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2003, 42(8): 1619-1640.
- [7] Roberts K G, Gloy B A, Joseph S, et al. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic economic, and climate change potential[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(2): 827-833.
- [8] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M, et al. Effect of charcoal addition on N_2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2): 181-188.
- [9] Zhang A F, Bian R J, Pan G X, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 153-160.
- [10] 张 斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4844-4853.
ZHANG Bin, LIU Xiao-yu, PAN Gen-xin, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amend-

- ment in two consecutive rice growing cycles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23):4844–4853.
- [11] Renner R. Rethinking biochar[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(17):5932–5933.
- [12] Clough T J, Bertram J E, Ray J L, et al. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine–urine–amended pasture soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3):852–860.
- [13] Gao B, Ju X T, Su F, et al. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: A two-year field study[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472:112–124.
- [14] 白红英, 韩建刚, 张一平, 等. 农田温室气体 N_2O 释放的水热效应机理初探[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6):724–726.
BAI Hong-ying, HAN Jian-gang, ZHANG Yi-ping. Mechanism of N_2O emission relying on humidity and temperature from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6):724–726.
- [15] 陈卫卫, 张友民, 王毅勇, 等. 三江平原稻田 N_2O 通量特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):364–368.
CHEN Wei-wei, ZHANG You-min, WANG Yi-yong, et al. Characteristics of N_2O fluxes in paddy fields of the Sanjiang Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):364–368.
- [16] 李平, 郎漫. 硝化和反硝化过程对林地和草地土壤 N_2O 排放的贡献[J]. 中国农业科学, 2013, 46(22):4726–4732.
LI Ping, LANG Man. Contribution of nitrification and denitrification to the nitrous oxide emission from forest and grassland soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(22):4726–4732.
- [17] Saario S, Heimonen K, Kettunen R. Biochar addition indirectly affects N_2O emissions via soil moisture and plant N uptake[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 58:99–106.
- [18] Hansen S, Mehlum J E, Bakken L R. N_2O and CH_4 fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(5):621–630.
- [19] Novak, J M, Busscher W J, Watts D W, et al. Biochars impact on soil–moisture storage in an ultisol and two aridisols[J]. *Soil Science*, 2012, 177(5):310–320.
- [20] Briggs C M, Breiner J, Graham R C. Contributions of Pinus Ponderosa charcoal to soil chemical and physical properties[C]//The ASA – CSSA – SSSA International Annual Meetings. Salt Lake City, USA, 2005.
- [21] Yoshizawa S, Tanaka S. Acceleration of composting of food garbage and livestock waste by addition of biomass charcoal powder[J]. *Asian Environmental Research*, 2008, 1:45–50.
- [22] Wang J Y, Zhang M, Xiong Z Q, et al. Effects of biochar addition on N_2O and CO_2 emissions from two paddy soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(8):887–896.
- [23] Cayuela M L, Oenema O, Kuikman P J, et al. Bioenergy by-products as soil amendments implications for carbon sequestration and greenhouse gas emissions[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2010, 2:201–213.
- [24] Laird D A. The Charcoal Vision: A win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(1):178–181.
- [25] Stehfest E, Bouwman L. N_2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(3):207–228.