西北植物学报,2016,36(6):1216－1224
Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.

文章编号:1000-4025(2016)06-1216-09 **doi**:10.7606/j.issn.1000-4025.2016.06.1216

生物炭与氮肥对旱作春玉米农田 CO_2 和 CH_4 排放特征的影响

李秀云[1],张洪培[1],沈玉芳[1,2*],李世清[2]

(1 西北农林科技大学 资源环境学院 陕西杨陵 712100;2 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,陕西杨陵 712100)

摘　要:为了研究生物炭与氮肥对旱作春玉米农田 CO_2 和 CH_4 排放通量季节变化、累积排放总量及 CO_2 + CH_4 排放强度的影响,试验设置 C_0N_0(不加生物炭,不施氮肥)、C_0N_1(不加生物炭,施氮肥 225 kg·hm^{-2})和 C_1N_1(添加生物炭 50 t·hm^{-2},施氮肥 225 kg·hm^{-2})3 个处理,采用密闭式静态暗箱-气相色谱法对不同生物炭和氮肥输入旱作春玉米农田 CO_2 和 CH_4 排放通量进行连续观测,同时对影响通量变化的 0～20 cm 土层温度和水分因子进行测定。结果表明:(1)试验期内不同处理春玉米农田均表现为 CO_2 累积通量的源,且 CO_2 排放通量均呈现一定的峰值变化规律。(2)C_1N_1 处理减少了春玉米生长季农田 CO_2 排放通量和累积排放总量,在试验的 2 个生长季内农田 CO_2 平均排放通量和累积排放总量各处理均表现为 C_0N_0 > C_0N_1 > C_1N_1,且 C_1N_1 处理降低显著。(3)土壤 CO_2 排放通量与土壤温度变化呈显著正相关关系,可用指数方程和二次方程较好拟合二者关系,且与 10 cm 土层温度的相关性优于 0 cm 土层温度,但土壤 CO_2 排放通量与土壤含水量呈负相关关系。(4)试验各处理农田土壤 CH_4 排放通量在－16.08～－73.96 μg·m^{-2}·h^{-1}之间,表现为大气 CH_4 的净吸收库;C_1N_1 处理增加了土壤 CH_4 排放通量和累积排放总量,但作用效果的显著性受年际环境因子的影响;农田土壤 CH_4 排放通量与土壤含水量呈显著正相关关系,与土壤温度呈显著负相关关系。研究发现,添加生物炭和施氮减少了旱作农田春玉米生长季 CO_2 排放通量和累积排放总量,增加了 CH_4 排放通量和累积排放总量,总体上显著增加了春玉米产量,显著减少农田 CO_2＋CH_4 排放强度。

关键词:生物炭;氮肥;二氧化碳;甲烷;旱作农田

中图分类号:Q945.79　　**文献标志码**:A

Effect of Biochar and Fertilizer on CO_2 and CH_4 Emission from Spring Maize Dryland

LI Xiuyun[1], ZHANG Hongpei[1], SHEN Yufang[1,2*], LI Shiqing[2]

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

Abstract: With the aim of investigating the effects of biochar and nitrogen input on the season variation of carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) fluxes, we measured CO_2 and CH_4 cumulative emission, CO_2 + CH_4 emission intensity in dry farmland. A field experiment was performed over two years to measure CO_2 and CH_4 emissions by continuous observation using static chamber technique. Soil temperature and mois-

收稿日期:2016-03-01;**修改稿收到日期**:2016-05-24

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(YQ2013009);国家自然科学基金(51279197, 50809068);杨凌示范区科技计划项目(2014NY-30)

作者简介:李秀云(1990－),女,在读硕士研究生,主要从事农田温室气体排放及碳平衡效应方面的研究。E-mail:Liduoduo112112@163.com

* 通信作者:沈玉芳,博士,副研究员,主要从事旱作农田生态系统水分养分动态过程及其环境效应研究。E-mail:shenyufang@nwsuaf.edu.cn

ture were also measured at the same time. Three treatments were laid out with three replicates per experiment: C_0N_0 (no biochar, no N), C_0N_1 (no biochar, 225 kg·hm^{-2}), C_1N_1 (50 t·hm^{-2} biochar, 225 kg·hm^{-2}). The results showed that: (1) the dry spring maize farmland was source for CO_2 under three treatments during the experimental period. The rates of CO_2 emission increased and peaked on the 22th June 2014 and the 1st July 2015 during the maize growing season. The rates then decreased and were maintained at a relatively low level during the fallow season. Biochar and nitrogen amendments decreased the CO_2 flux and cumulative CO_2 emission during the maize growing season. (2) The flux and cumulative CO_2 emission were significantly lower in C_1N_1 treatment than that in C_0N_0 treatment during the two spring maize growing seasons. (3) There was significantly positive correlation between CO_2 flux and soil temperature. Both exponential equation and quadratic equation could be used to simulate the relationships, of which the correlation of 10 cm temperature was better than of 0 cm temperature. The CO_2 flux had negative correlation with soil moisture. (4) The CH_4 flux was between −16.08−73.96 μg·m^{-2}·h^{-1} for all of the treatments, and was sink for CH_4. Biochar and nitrogen amendments increased the CH_4 flux and cumulative CH_4 emission during the maize growing season which were also affected by annual environmental factors. The CH_4 emission had positive correction with soil moisture but negative with soil temperature. The addition of biochar and nitrogen could reduce CO_2 and increase CH_4 fluxes and cumulative emission from dry farmland. Comprehensive consideration of two aspects, a reasonable addition of nitrogen and biochar would be beneficial for controlling greenhouse gas emission from dry farmland. Briefly, biochar and nitrogen amendment significantly increased the yield of maize, while reduced CO_2+CH_4 emissions intensity significantly.

Key words: biochar; nitrogenous fertilizer; carbon dioxide; methane; dry farmland

CO_2 和 CH_4 是大气中两种主要的温室气体，农业活动及其相关过程是其重要的源或汇[1]。氮肥的施用、秸秆等生物质焚烧等农业活动产生大量的温室气体。当前世界粮食需求大量增加，使得未来 20 年中农田温室气体的排放量也会有所增加[2]。减少农业温室气体的排放在控制全球气候变化方面具有巨大潜力。因此，研究各种农业措施对农田 CO_2 和 CH_4 气体排放变化的影响，可为正确评估农业对大气温室气体增温的贡献率及采取合理措施改善种植模式、增加农田碳汇效应提供科学依据。

生物炭是由生物质在完全或部分缺氧的条件下经热解炭化产生的一类多孔、高度芳香化、难熔性的固态物质[3]。研究表明，将生物炭施入土壤可以快速扩充土壤稳定性碳库，增加土壤的碳封存能力和肥力，显著降低土壤 CO_2 和 CH_4 的排放[4]。Zimmerman 等[5]研究发现生物炭可抑制实验后期土壤有机质的矿化。Karhu 等[6]研究结果也显示，添加 9 t·hm^{-2} 生物炭可增加土壤对 CH_4 的吸收。Feng 等[7]认为产甲烷菌与嗜甲烷菌丰度比例的降低，或孔隙和比表面积的增加可能是主要原因。但也有学者认为添加生物炭会促进土壤 CO_2 和 CH_4 的排放[8-9]。因此，添加生物炭是否能减少农田 CO_2、CH_4 的排放与农田土壤性质、环境因子和管理措施有密切关系。农业生产中在施用氮肥提高农作物产量的同时，施氮造成的温室气体效应问题研究也非常必要。Ding 等[10]研究表明，施氮能够降低农田土壤玉米生育期累积 CO_2 排放量。但王重阳等[11]研究却发现，施氮增加了旱作玉米农田土壤 CO_2 排放。氮肥施用对农田 CH_4 排放的影响目前较多集中在稻田生态系统。如赵峥等[12]研究发现，施用氮肥会增加水稻生育期 CH_4 的平均排放通量，但添加缓释氮肥可以减少 CH_4 的排放。

对以种植业为主的西北旱作农田生态系统，氮肥施用引起的 CO_2、CH_4 排放变化研究结果不一[12]。添加生物炭能否通过影响土壤物理化学或微生物特性改变 CH_4 和 CO_2 的排放？黄土高原低的降水和高的降水变异性是否影响生物炭对农田 CO_2、CH_4 排放的调节效应。本研究以黄土高原旱作农田土壤为研究对象，采用密闭式静态暗箱-气相色谱法，分析春玉米农田土壤 CO_2 和 CH_4 排放的连续变化特征，探明生物炭与氮肥对旱作农田 CO_2 和 CH_4 排放动态变化规律的影响，以及 CO_2 和 CH_4 排放通量与主要环境因子间的关系，以期为正确评价生物炭与氮肥在黄土高原旱作农田 CO_2 和 CH_4 排放中的作用，以及生物炭在旱作春玉米农田固碳减排中的作用提供一定参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

田间定位试验布置在西北农林科技大学长武国

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陕甘交界处的陕西省长武县洪家镇王东村,海拔 1 200 m。属暖温带半湿润大陆性季风气候,1984～2012 年间年均降水量为 578 mm,年均气温 9.1 ℃,≥10 ℃积温为 3 029 ℃,无霜期 171 d,年日照时数 2 230 h,地下水埋深 50～80 m,属典型的旱作农业区;地带性土壤为黑垆土,土壤质地为壤土,土质均匀疏松。

1.2 试验设计

本气体采集试验于 2014 年 4 至 2015 年 9 月间进行,试验期内总降水 991 mm(图 1)。试验设不施生物炭和不施氮(C_0N_0),不施生物炭和施氮 225 kg·hm^{-2}(C_0N_1),施生物炭 50 t·hm^{-2}和施氮 225 kg·hm^{-2}(C_1N_1)3 个处理,3 次重复,采用不完全随机区组设计,每个试验小区面积为 56 m^2(7 m×8 m)。供试生物炭为玉米秸秆炭(河南三利新能源公司生产),热裂解炭化温度 350～450 ℃,于 2014 年播前撒施于地表后微耕机翻耕混匀。磷肥和钾肥分别于 2014 和 2015 年播前作为基肥与种肥一次施入,磷肥和钾肥施肥量分别为 40 kg·hm^{-2}(含 P_2O_5 12%过磷酸钙)和 80 kg·hm^{-2}(含 K_2O 45%硫酸钾)。氮肥(含 N 46.4 %尿素)按 4∶3∶3 分 3 次施入。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。试验玉米品种为'先玉 335',播种方式采用宽窄行平作(60∶40),种植密度 65 000 株·hm^{-2}。试验期间不进行灌溉处理(雨养)。

1.3 监测指标与监测方法

1.3.1 气体样品的采集与分析 采用密闭式静态箱-气相色谱法测定 CO_2 和 CH_4 的排放通量。试验的采样箱包括箱体和底座两部分,均为不锈钢材料,箱体长、宽、高均为 50 cm,箱内置风扇用于采样时混匀箱内气体,箱外包覆泡沫层用来保温;底座长 50 cm、宽 50 cm、高 15 cm,于播前固定于土层15 cm 深处,原地定位。框内种植 2 棵玉米,生长至九叶期后,截断保留 45 cm 高度[13]。每次采样时(8:30～10:30)将顶箱嵌入底座上部的凹槽中,用水密封,阻断箱内外空气交流,分别于 0、10、20、30 min 用 50 mL注射器抽取箱内气体 50 mL,于 12 h 内用 Agilent 7890A 气相色谱仪(Agilent Technologies inc.)测定分析 CO_2 和 CH_4 浓度。生长季每 2～5 d 采集气体样品 1 次,休闲期 7～15 d 采集气体样品 1 次。CO_2、CH_4 排放通量的计算公式为:

$$F = 273/(273+T)\times 2/22.4\times 60\times H\times dc/dt$$

式中,F 为被测气体的排放通量(分别以 CO_2-C、CH_4-C 计,单位分别为 mg·m^{-2}·h^{-1}、μg·m^{-2}·h^{-1});12 为每摩尔 CO_2、CH_4 中 C 的质量数;22.4 为温度 273 K 时 CO_2、CH_4 的摩尔体积;H 为采样箱高度(m);dc 为气体浓度差;dt 为时间间隔(h);T 为采样时箱内温度(℃);dc/dt 为采样时间内 CO_2、CH_4 浓度变化速率(mL·L^{-1}·min^{-1}或 μL·L^{-1}·min^{-1}),采用线性回归方程计算。根据气样浓度与时间的关系曲线计算气体的排放通量,加权平均求得全生育期 CO_2 和 CH_4 的排放总量。

1.3.2 玉米 CO_2、CH_4 的排放强度 采用 CO_2、CH_4 的排放强度(greenhouse gas intensity, *GHGI*)来评价单位玉米产量的 CO_2、CH_4 排放[14],也即:$GHGI$ (kg·t^{-1})=GWP/Y

其中,GWP 指 CO_2、CH_4 的增温潜势(kg·hm^{-2}),Y 指玉米的产量(t·hm^{-2})

1.3.3 土壤温度和含水量 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 0 和 10 cm 土壤温度(温度探头于播前置于 0 和 10 cm 土层),取采集第 1 针和最后 1 针气体样品时的温度平均值作为当天气体采集时的温度值。同时,采集 0～20 cm 土层土样,用烘干法测定土壤含水量。降水量数据来自长武试验区自动气象站(图 1)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 对试验数据进行统计分析,采用 Sigmaplot 12.5 作图。

2 结果与分析

2.1 生物炭及氮肥对旱作春玉米农田 CO_2 排放的影响

2.1.1 试验期内 CO_2 排放通量 2 年试验期内,3 个处理旱作春玉米农田 CO_2 排放通量变化趋势基本

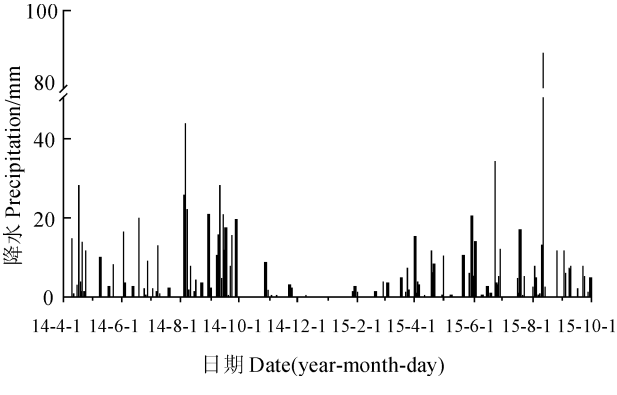


图 1 试验期间的降水量

Fig. 1 Precipitation during the experiment

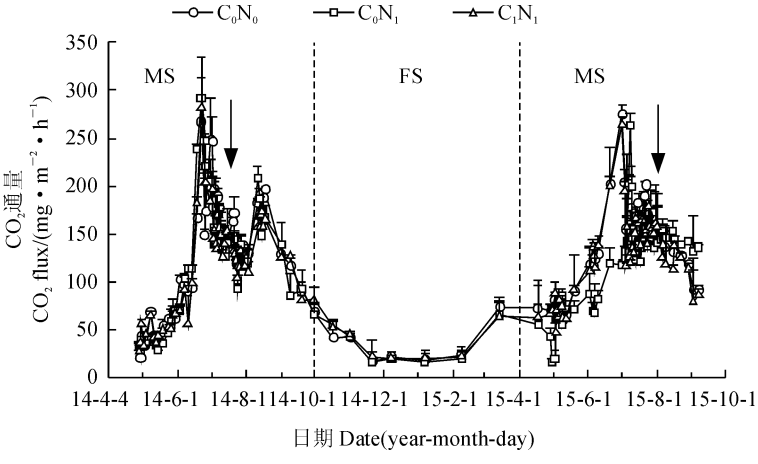
一致，在各生长季内均呈现出一定的峰值变化规律（图 2）。各处理 CO_2 排放通量在玉米生长初期较低，后随着生育期的进程逐渐增大，并分别于 2014 年 6 月 22 日和 2015 年 7 月 1 日出现排放峰值。其中，C_0N_0 处理 CO_2 排放通量峰值在 2014 和 2015 年分别为 267.04 和 275.56 mg·m^{-2}·h^{-1}，C_0N_1 处理分别为 291.21 和 262.85 mg·m^{-2}·h^{-1}，C_1N_1 处理分别为 282.01 和 263.66 mg·m^{-2}·h^{-1}。之后随玉米植株剪断，以及植物和大气温度及降雨的改变，除个别采样时期出现短时间 CO_2 排放通量较大波动外，各处理 CO_2 排放通量均呈逐渐下降趋势。同时，各处理农田休闲期 CO_2 排放通量均维持在较低水平。在本试验的 2 个生长季内，旱作春玉米农田 CO_2 平均排放通量均表现为 C_0N_0＞C_0N_1＞C_1N_1；与 C_0N_0 相比，C_0N_1 和 C_1N_1 处理 CO_2 平均排放通量分别降低 4.05%和 7.79%，且差异显著（P＜0.05），而 C_0N_1 与 C_1N_1 间差异不显著。因此，生物炭与氮肥共同作用对春玉米生长季内 CO_2 排放降低效果更显著。

2.1.2　生长季内 CO_2 排放总量　本试验不同处理 2 个生长季农田 CO_2 排放总量（表 1）在 3 525.83～4 152.13 kg·hm^{-2}之间。与 C_0N_0 处理相比，C_0N_1 处理春玉米生长季 CO_2 排放总量在 2014 和 2015 年分别降低 3.12%和 5.67%，后者差异显著（P＜0.05）；而 C_1N_1 春玉米生长季 CO_2 排放总量在 2014 和 2015 年分别降低 6.52%和 7.67%，且差异均显著（P＜0.05）。与 C_0N_1 相比，C_1N_1 处理春玉米生长季 CO_2 排放总量在 2014 和 2015 年分别降低 4.69%和 2.12%，且前者差异显著。同时，比较春玉米生长季 CO_2 排放总量年际变化发现，与 2014 年相比，2015 年 C_0N_0、C_0N_1、C_1N_1 处理 CO_2 排放总量分别相应显著降低 8.03%、10.45%和 9.16%（P＜0.05）。总体上，试验不同处理间和不同年际间的生长季 CO_2 排放总量差异均显著（表 1）。

2.2　生物炭与氮肥对旱作春玉米农田 CH_4 通量的影响

2.2.1　试验期 CH_4 排放通量　各处理旱作春玉米农田 CH_4 排放通量在－16.08～－73.96 μg·m^{-2}·h^{-1}之间，且不同处理间排放通量季节波动趋势基本一致，表明旱作春玉米农田为大气 CH_4 的净吸收库，生长季较休闲季吸收效应更显著（图 3）。C_0N_0、C_0N_1 和 C_1N_1 处理的农田 CH_4 平均吸收通量在 2014 年生长季分别为 48.97、47.64 和 41.12 μg·m^{-2}·h^{-1}，在 2015 年则分别为 47.33、46.95 和44.68 μg·m^{-2}·h^{-1}；与 C_0N_0 相比，C_0N_1 处理 2 年的生长季 CH_4 平均吸收通量降低 1.78%，C_1N_1 则平均显著降低 10.81%（P＜0.05）；与 C_0N_1 相比，C_1N_1 处理的 CH_4 平均吸收通量在 2014 和 2015 年分别降低 13.67%和 4.82%。可见，生物炭和氮肥均降低了旱作春玉米农田 CH_4 的平均吸收通量，增加农田 CH_4 排放。

2.2.2　生长季 CH_4 排放总量　表 1 显示，春玉米生长季 C_0N_0、C_0N_1 和 C_1N_1 处理农田 CH_4 排放总量在 2014 年分别为－1.60、－1.56 和－1.38 kg·hm^{-2}，



箭头处表示玉米植株剪断时间；MS 和 FS 分别表示玉米生长季和土地休闲期；下同

图 2　不同处理旱作春玉米农田 CO_2 通量动态变化

Arrows denote the date of maize broken. MS and FS denote the maize growing season and fallow season, respectively. The same as below

Fig. 2　Dynamic of CO_2 flux in dry spring maize farmland with different treatments

表 1 春玉米生长季不同处理 CO_2、CH_4 排放总量及排放强度

Table 1 Differences in CO_2, CH_4 cumulative and intensity emission with different treatments during the spring maize growing season

处理 Treatment	CO_2 排放总量 CO_2 cumulative emission /(kg·hm^{-2})		CH_4 排放总量 CH_4 cumulative emission /(kg·hm^{-2})		(CO_2+CH_4)排放强度 CO_2+ CH_4 emission intensity /(kg·t^{-1})		产量 Yield/(t·hm^{-2})	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
C_0N_0	4 152.13a	3 818.63a*	−1.60b	−1.40b**	5 464.35c	3 688.87c**	2.76c	3.76c*
C_0N_1	4 022.50a	3 602.10b*	−1.56b	−1.38ab**	1 661.11b	1 295.32b**	8.90b	10.10b*
C_1N_1	3 881.35b	3 525.83b*	−1.38a	−1.34a**	1 425.03a	1 191.29a**	9.90a	10.75a*

注:同列不同字母表示处理间差异达 0.05 水平,同行 * 和 * * 分别表示处理内年际间差异达到 0.05 和 0.01 水平;下同。

Note: The values within columns followed by different letters are significantl differentses at 0.05 level, while the * and * * within the same row indicate significant difference between years at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as below

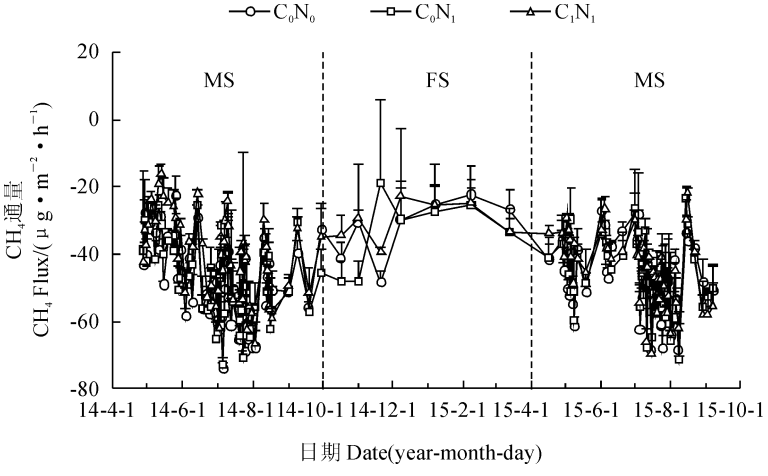


图 3 不同处理旱作春玉米农田 CH_4 通量动态变化

Fig. 3 Dynamic of CH_4 flux in dry spring maize farmland with different treatments

在 2015 年分别为 −1.40、−1.38 和 −1.34 kg·hm^{-2};与 C_0N_0 处理相比,C_0N_1 处理降低了春玉米生长季农田 CH_4 吸收总量,其在 2014 和 2015 年分别降低 2.23%和 1.59%,但差异均不显著;C_1N_1 处理则分别相应降低 13.61%和 4.21%,且 2014 年达到显著水平($P<0.05$);与 C_0N_1 处理相比,C_1N_1 处理 2014 年生长季 CH_4 吸收总量也显著降低。同时,比较不同年际生长季 CH_4 吸收总量发现,2015 年不同试验处理的 CH_4 吸收总量均比相应的 2014 年处理降低。另外,方差分析结果表明(表 1),春玉米生长季 CH_4 排放总量在试验不同处理间差异性达极显著水平,且年际间及处理与年际交互效应差异均极显著($P<0.01$)。

2.3 生物炭、氮肥对旱作农田春玉米产量及其 CO_2 和 CH_4 排放强度的影响

试验期间不同生物炭、氮肥处理玉米产量及其 CO_2 和 CH_4 排放强度见表 1。与 C_0N_0 相比,C_0N_1 处理 2014、2015 年玉米产量分别显著增加 222.5%和 168.6%,同期 C_1N_1 处理则分别显著增加了 288.7%和 185.9%($P<0.05$);试验相同处理年际间的玉米产量差异也均达显著水平。同时,与 C_0N_0 相比,C_0N_1 处理 2014、2015 年春玉米生长季 CO_2+CH_4 排放强度分别显著降低 69.60%和 64.89%,同期 C_1N_1 处理则分别显著降低 73.92%和67.71%($P<0.05$);试验相同处理年际间的生长季 CO_2+CH_4 排放强度差异均极显著($P<0.01$)。可见,施用生物炭和氮肥总体上显著增加了旱作农田春玉米产量,显著减少农田 CO_2+CH_4 排放强度。

2.4 旱作春玉米农田土壤温度、含水量及其与 CO_2、CH_4 排放量的关系

试验不同处理 2 个生长季土壤含水量和温度的动态变化如图 4 所示。其中,2014 和 2015 年生长季 0~20 cm 土层土壤含水量的波动范围分别为 8.82%~28.69%和 10.30%~23.38%,而且不同处理间土壤含水量的变化趋势基本一致,主要受降雨分布的影响(图 1)。同时,研究表明,土壤温度也是影响土壤 CO_2 和 CH_4 通量的另一重要环境因子[13]。本试验不同处理平均土壤温度变化趋势基本

一致，总体上均呈现先增加后降低的趋势，5 月底土壤温度开始逐渐升高，至 8 月初开始缓慢降低（图 4）。

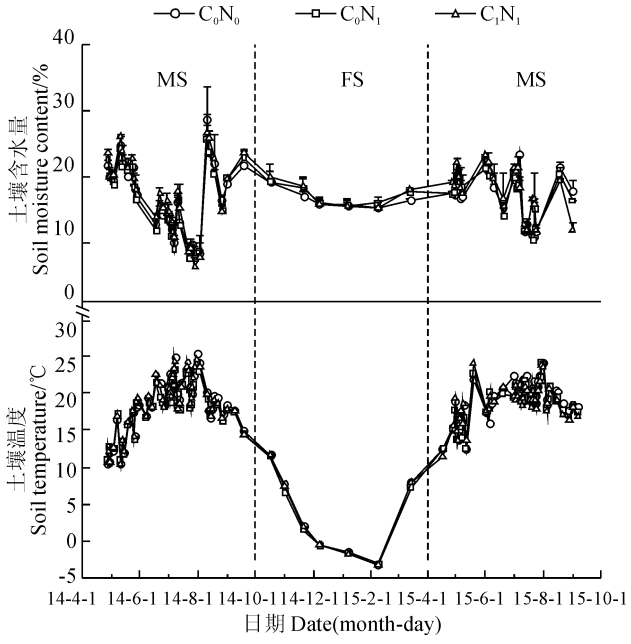


图 4　旱作春玉米农田土壤水分及温度的动态变化

Fig. 4　Dynamic of moisture and soil temperature in dry spring maize farmland

进一步相关性分析发现（图 5），2 个春玉米生长季农田 CO_2 排放通量与 0～20 cm 土层土壤含水量呈一定的负相关关系，可用指数方程和二次方程对二者关系进行拟合；CH_4 排放通量的动态变化也受到土壤含水量的显著影响，随着降雨后土壤含水量增加，农田 CH_4 的排放通量增加；CH_4 通量与土壤含水量呈现极显著的正相关关系（$P<0.01$），指数方程和二次方程均可以较好拟合二者关系。

此外，农田 CO_2 排放通量与土壤温度呈极显著正相关关系（表 2），二次方程和指数方程均可以较好拟合 CO_2 通量与 0 和 10 cm 土壤温度的关系，且指数方程决定系数（R^2）大于二次方程；农田 CO_2 排放通量与 10 cm 土壤温度相关性显著高于 0 cm 土壤温度（$P<0.05$）。同时，随着 0 和 10 cm 土壤温度升高，试验农田 CH_4 吸收通量增加，两者间呈现显著的负相关关系（$P<0.05$），用指数方程拟合的 R^2 分别为 0.211 和 0.293，而用二次方程拟合的 R^2 分别为 0.214 和 0.297，CH_4 排放与 10 cm 土壤温度相关性也显著高于浅层 0 cm 温度。这表明土壤温度升高，有利于土壤对 CH_4 的吸收氧化。

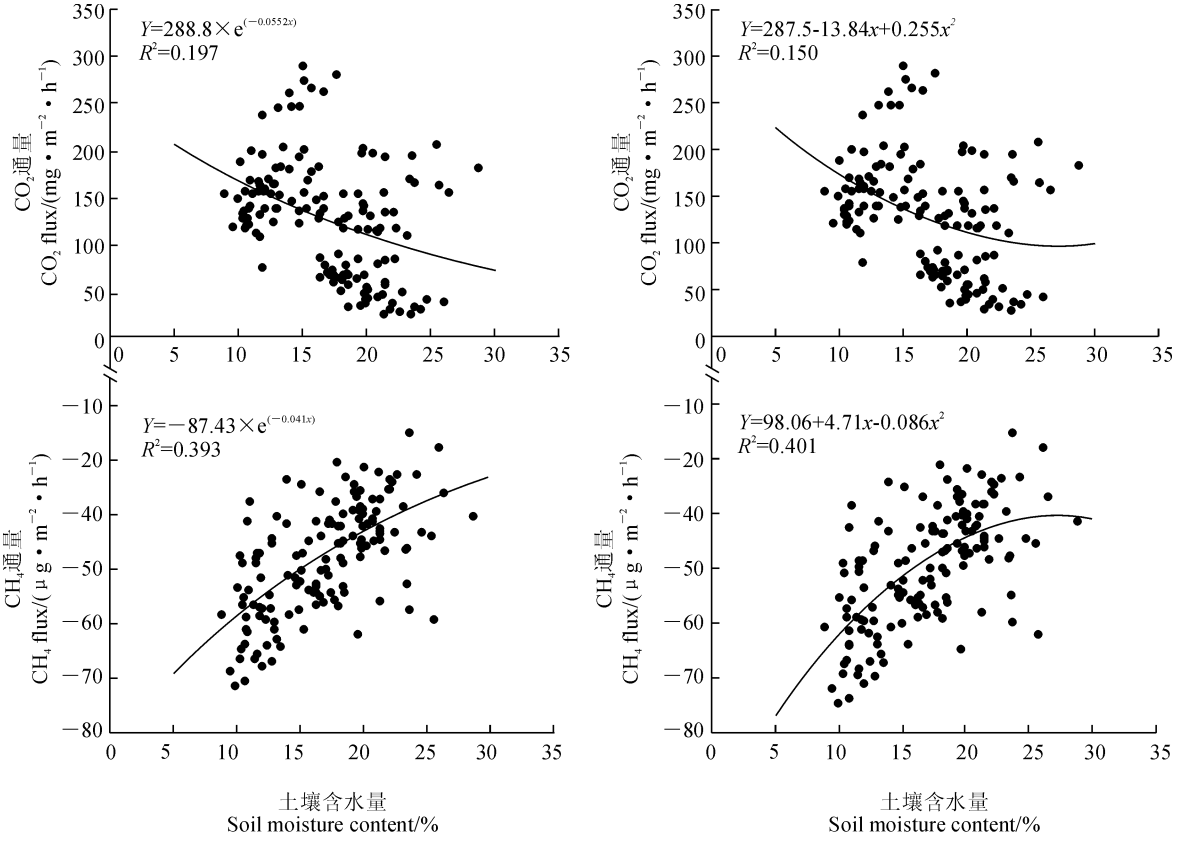


图 5　春玉米生长季土壤 CO_2、CH_4 通量与其平均含水量的相关性

Fig. 5　The correlation between soil CO_2 and CH_4 flux and soil moisture during the spring maize growing season

表 2 土壤 CO_2、CH_4 排放通量与其土壤温度的拟合方程

Table 2 The fitting equation between CO_2 and CH_4 flux and soil temperature during the spring maize growing season

指标 Index	土层 Soil layer/cm	二次方程 Quadratic equation	R^2	指数方程 Exponential equation	R^2
CO_2 通量 CO_2 flux	0	$y=-241.83+30.65x-0.5826x^2$	0.397	$y=17.37e^{0.097x}$	0.448
	10	$y=-93.77+15.35x-0.1679x^2$	0.469	$y=16.93e^{0.106x}$	0.581
CH_4 通量 CH_4 flux	0	$y=-12.76-1.87x+0.0063x^2$	0.214	$y=-22.93e^{0.036x}$	0.211
	10	$y=-32.98+0.72x-0.0773x^2$	0.297	$y=-21.01e^{0.043x}$	0.293

3 讨 论

3.1 农田土壤温度及水分与其 CO_2、CH_4 排放的关系

研究表明，土壤温度、水分是影响农田土壤 CO_2、CH_4 通量的时空变化的主要环境因子[15-17]。本研究中，0 和 10 cm 土层土壤温度与 CO_2 排放通量呈显著正相关关系，与 CH_4 通量呈显著负相关关系。这与 Li 等[18]、宋秋来等[16]的研究结果一致，表明土壤温度影响农田土壤 CO_2 通量的主导因子之一。温度会通过影响土壤微生物菌群的数量、多样性、活性及有机质的分解等，影响土壤 CO_2、CH_4 产生、传输和排放；使得二者之间的关系具有一定的规律性，可用指数方程和二次方程进行拟合，但两者在 10 cm 土层的相关性优于 0 cm 土层。

但由于田间试验环境的复杂性，温度的变化经常受水分等影响，温度和水分对 CO_2、CH_4 排放通量的影响相互作用。目前对于土壤水分与 CO_2、CH_4 排放相关关系的研究结果不一。Mer 等[19]研究认为，干燥土壤 CH_4 吸收量很低，土壤含水量升高会增加土壤 CH_4 吸收。Bing 等[13]研究发现，大约三分之一的土壤 CH_4 吸收差异受土壤水分和温度的影响。Wu 等[15]的研究表明，随土壤水分含量的增加，CO_2、CH_4 的排放通量均增加。本试验土壤含水量与 CH_4 排放通量呈显著正相关关系，与 CO_2 排放通量呈一定负相关关系。短期较强降雨后，使得土壤含水量迅速增加，而厌氧环境的产生、微生物的氧化活性减弱，土壤的通透性也降低，不利于 CO_2 的产生和扩散排放；但同时却为产甲烷菌提供良好的环境，从而增加 CH_4 的产生和排放[20]。但试验总体上土壤水分变化与 CO_2 排放通量的相关性较弱。

3.2 施氮与农田土壤 CO_2、CH_4 排放的关系

增施氮肥是提高产量和维持土壤地力的重要管理措施，同时也会影响农田温室气体的产生和排放。研究表明，施氮对 CO_2、CH_4 排放的影响取决于氮肥种类、施氮量和施肥技术，有促进、无影响、抑制三种作用[21-22]。Spokas 等[23]的研究表明，施氮 20 年后 CO_2 排放量降低了 40%。Bowden 等[24]通过长期施氮模拟发现，施氮第 1 年促进土壤 CO_2 释放，第 2 年无影响，而施氮 13 年后与对照相比则降低了 41%。本研究中，施氮不同程度降低了试验 2 年春玉米生长季 CO_2 的排放总量，且 2015 年作用显著；施氮增加了生长季的 CH_4 排放总量，这与焦燕等[25]、王旭燕等[26]研究结果一致，说明长期施化学氮肥可能会降低土壤对甲烷的氧化能力，从而抑制 CH_4 的吸收。但总体上，施氮处理 2014、2015 年 CO_2+CH_4 的排放强度均显著降低，这与施氮显著增加玉米产量有关。

3.3 施用生物炭与农田土壤 CO_2、CH_4 排放的关系

生物炭施加到农田土壤中，影响土壤的物理性状、营养状况及生物效应，从而影响生态系统的温室气体排放效应。Luo 等[27]在英国洛桑试验站的研究结果表明，向旱地土壤中添加生物炭会使土壤 CO_2 的排放增加，尤其在添加初期这种促进作用更明显。Liu 等[8]则发现输入生物炭能明显抑制土壤 CO_2 的释放；生物炭一方面可能通过降低土壤微生物的活性使排放受到抑制，另一方面可以吸附土壤中的酶和有机物，从而抑制土壤中有机碳的矿化，减少土壤 CO_2 的排放[28]。因此，生物炭添加对土壤 CO_2 排放效应及机理解释目前并不一致，这与土壤及生物炭本身特性有关。Spokas 等[23]通过对比 16 种不同生物炭对土壤温室气体排放的影响，发现热裂解温度分别为 400～515 ℃的玉米秸秆生物炭抑制 CO_2 排放。本研究采用的生物炭由玉米秸秆在 350～450 ℃温度下热裂解制成；试验中，生物炭不同程度地降低了 CO_2 的排放通量、排放总量及排放强度。

同时，本试验添加生物炭农田 CH_4 的排放有增加趋势。这一方面可能是试验生物炭中一些易分解物质能够提供给产甲烷菌更多的生活底物，从而促进根系分泌物的增加，为产甲烷菌提供了前体，增加 CH_4 的排放[29]。另外，添加生物炭有利于土壤温度

的升高，加速有机质的分解来消耗更多的氧气从而形成土壤的厌氧环境，促进了 CH_4 的产生和排放[30]。Zhang 等[31]研究也发现，向水稻田中添加 40 t·hm^{-2}小麦秸秆生物炭，可以增加土壤 CH_4 的排放。但 Karhu 等[6]在芬兰南部小麦-大豆轮作土壤中研究却表明，添加 9 t·hm^{-2}生物炭 5 年后，土壤 CH_4 的吸收量增加。Xie 等[32]在稻田土壤中研究发现，添加 12 t·hm^{-2}玉米秸秆生物炭对 CH_4 的排放并未产生显著的影响。因此，不同土壤施加生物炭后，由于土壤在质地、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、作物类型等方面的差异，会同时影响 CO_2 和 CH_4 排放变化的差异。生物炭对在中国农业生产中占据重要地位的旱作农田温室气体排放的影响究竟如何，仍需要进一步长期的田间定位监测以及影响机制的探讨，以期为生物炭科学应用提供一定的依据。

综上所述，在本试验期内，不同生物炭和施氮处理春玉米农田表现为 CH_4 累积通量的汇和 CO_2 累积通量的源，且 CO_2 排放通量均呈现一定的峰值变化规律；添加生物炭与施氮减少了春玉米生长季 CO_2 排放通量和累积排放总量，增加了 CH_4 排放通量和累积排放总量，但总体上，显著降低了 CO_2+CH_4 的排放强度，且作用效果的显著性受年际环境因子的影响；土壤 CO_2 排放通量与土壤温度变化呈显著正相关，用指数方程和二次方程可较好拟合二者关系，且与 10 cm 土层温度的相关性优于 0 cm 土层温度，但其却与土壤含水量呈负相关；土壤 CH_4 排放通量与土壤含水量呈显著正相关，与土壤温度呈显著负相关。

参考文献：

[1] 张玉铭，胡春胜，张佳宝，等. 农田土壤主要温室气体(CO_2，CH_4，N_2O)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.
ZHANG Y M，HU C S，ZHANG J B，*et al*. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2，CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*，2011，**19**(4)：966-975.

[2] BEACH R H，DEANGELO B J，ROSE S，*et al*. Mitigation potential and costs for global agricultural greenhouse gas emissions[J]. *Agricultural Economics*，2008，**38**(2)：109-115.

[3] ANTAL M J，GRONLI M. The art，science，and technology of charcoal production[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*，2003，**53**(1)：8-9.

[4] LEHMANN J. A handful of carbon[J]. *Nature*，2007，**447**(7 141)：143-144.

[5] ZIMMERMAN A R，GAO B，AHN M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*，2011，**43**(6)：1 169-1 179.

[6] KARHU K，MATTILAB T，BERGSTRÖMA I，*et al*. Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity-Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*，2011，140：309-313.

[7] FENG Y Z，XU Y P，YU Y C，*et al*. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*，2012，**46**(1)：80-88.

[8] LIU Y，YANG M，WU Y M，*et al*. Reducing CH_4 and N_2O emissions from water logged paddy soil with biochar[J]. *Journal of Soils and Sediments*，2011，**11**(6)：930-939.

[9] 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.

[10] DING W X，YU H Y，Cai Z C，*et al*. Responses of soil respiration to N fertilization in a loamy soil under maize cultivation[J]. *Geoderma*，2010，155：381-389.

[11] 王重阳，王绍斌，顾江新，等. 下辽河平原玉米田土壤呼吸初步研究[J]. 农业环境科学学报，2006，**25**(5)：1 240-1 244.
WANG C Y，WANG S B，GU J X，*et al*. Soil respiration in maize fields in the lower reaches of Liaohe Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*，2006，**25**(5)：1 240-1 244.

[12] 赵峥，岳玉波，张翼，等. 不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J]. 农业环境科学学报，2014，**33**(11)：2 273-2 278.
ZHAO Z，YUE Y B，ZANG Y，*et al*. Impact of different fertilization practices on greenhouse gas emission from paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*，2014，**33**(11)：2 273-2 278.

[13] BING G，JU X T，FANG S，*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] ZHANG A F，LIU Y M，PAN G X，*et al*. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. *Plant and Soil*，2012. **351**(1-2)：263-275.

[15] WU X，YAO Z，BRÜGGEMANN N，*et al*. Effects of soil moisture and temperature on CO_2 and CH_4 soil-atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia，China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*，2010，42：773-787.

[16] 宋秋来，赵泽松，龚振平，等. 东北黑土区旱作农田土壤 CO_2 排放规律[J]. 农业工程学报，2012，**28**(23)：200-207.
SONG Q L，ZHAO Z S，GONG Z P，*et al*. CO_2 emission law of dry farmland soil in black soil region of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*，2012，**28**(23)：200-207.

[17] 刘全全，王 俊，陈荣荣，等. 黄土高原冬小麦田土壤 CH_4 通量对人工降水的短期响应[J]. 应用生态学报，2015，**26**(1)：140-146.
LIU Q Q，WANG J，CHEN R R，*et al*. Short-term response of soil CH_4 flux to simulated precipitation in a winter wheat field on the Loess Plateau，Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*，2015，**26**(1)：140-146.

[18] LI X D，FU H，GUO D. Partitioning soil respiration and assessing the carbon balance in a Setaria italica(L.) Beauv. cropland on the Loess Plateau，*Northern China*[J]. *Soil Biology and Biochemistry*，2010，**42**(2)：337-346.

[19] MER J L，ROGER P. Production，oxidation，emission and consumption of methane by soils：a review[J]. *European Journal of Soil Biology*，2001，37：25-50.

[20] 齐玉春，董云社，耿元波，等. 内蒙古羊草草原不同物候期 CH_4 通量日变化特征与日通量比较[J]. 地理研究，2004(6)：785-794.
QI Y C，DONG Y S，GENG Y B，*et al*. The comparison of the CH_4 flux diurnal variation characteristics and diurnal uptake flux in different phenologies in Leymus Chinense grassland in Inner Mongolia，China[J]. *Geographical Research*，2004，(6)：785-794.

[21] 孟凡乔，关桂红，张庆忠，等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报，2006，**26**(6)：992-999.
MENG F Q，GUAN G H，ZHANG Q Z，*et al*. Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*，2006，**26**(6)：992-999.

[22] 王智平，胡春胜，杨居荣. 无机氮对土壤甲烷氧化作用的影响[J]. 应用生态学报，2003，**14**(2)：305-309.
WANG Z P，HU C S，YANG J R. Organic carbon impact on the soil methane oxidation[J]. *Journal of Applied Ecology*，2003，**14**(2)：305-309.

[23] SPOKAS K A，REICOSKY D C. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas productiont[J]. *Annals of Environmental Science*，2009，3：179-193.

[24] BOWDEN R D，DAVIDSON E，SAVAGE K. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest[J]. *Forest Ecology and Management*，2004，196：43-56.

[25] 焦 燕，黄 耀，宗良纲. 氮肥水平对不同土壤 CH_4 排放的影响[J]. 环境科学，2005，3：21-24.
JIAO Y，HUANG Y，ZONG L G，*et al*. Impact of different levels of nitrogen fertilizer on CH_4 emission from different paddy soils[J]. *Environmental Science*，2005，3：21-24.

[26] 王旭燕，张仁陟，蔡立群，等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH_4、N_2O 气体排放特征研究[J]. 环境科学学报，2015，**35**(11)：3 655-3 661.
WANG X Y，ZHANG R B，CAI L Q，*et al*. Emission characteristics of CH_4 and N_2O fluxes from dryland field under different nitrogen treatments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*，2015，**35**(11)：3 655-3 661.

[27] LUO Y，DURENKAMP M，DE N M. Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH[J]. *Soil Biology & Biochemistry*，2011，**43**(11)：2 304-2 314.

[28] LIANG B Q，LEHMANN J，SOHI S P. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*，2010，41：206-213.

[29] KNOBLAUCH C，MARIFAAT A A，HAEFELE M S. Biochar in rice-based system：impact on carbon mineralization and trace gas emissions[J]. *Bioresource Technology*，2008，**95**(32)：255-257.

[30] DING W X，CAI Z C，TSURUTA H. Cultivation，nitrogen fertilization and set-aside effects on methane uptake in a drained marsh soil in Northeast China[J]. *Global Change Biology*，2004，**10**(10)：1 801-1 809.

[31] ZHANG A F，CUI L Q，PAN G X. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain，China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*，2011，**139**(4)：469-475.

[32] XIE Z B，XU Y P，LIU G. Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice，greenhouse-gas emissions and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China[J]. *Plant and Soil*，2013，**370**(1-2)：527-540.

（编辑：裴阿卫）