

李 佳, 邓钧尹, 周 伟, 等. 生物炭与硝化抑制剂对菜地综合温室效应的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1205-1211.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.05.018

生物炭与硝化抑制剂对菜地综合温室效应的影响

李 佳¹, 邓钧尹¹, 周 伟^{2,3}, 孙丽英¹

(1.南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044; 2.中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 3.中国科学院常熟农业生态实验站, 江苏 常熟 215555)

摘要: 采用静态暗箱-气相色谱法评估氮肥分别配施生物炭和硝化抑制剂对菜地生态系统综合温室效应 (*GWP*) 和温室气体排放强度 (*GHGI*) 的影响。共设置 3 个田间处理: 尿素 (U)、尿素配施生物炭 (UB) 和尿素配施硝化抑制剂双氰胺 (UDCD)。结果表明: 与 U 处理相比, UDCD 处理分别显著降低了 N_2O 排放通量和 *GWP* 的 27.1% ($P<0.05$) 和 29.1% ($P<0.05$), 而对 CH_4 排放通量、蔬菜产量以及 *GHGI* 并没有显著影响。与 U 处理相比, UB 处理对 N_2O 排放通量、*GWP* 和 *GHGI* 并无显著影响。与 UB 处理相比, UDCD 处理分别显著降低了 N_2O 排放通量和 *GWP* 的 28.3% ($P<0.05$) 和 29.1% ($P<0.05$)。综合对比 3 种施肥方式的 *GWP* 和 *GHGI*, 发现氮肥配施硝化抑制剂 DCD 可以显著减少氮肥对环境的影响, 因此在菜地可推荐使用尿素配施硝化抑制剂双氰胺 (UDCD) 施肥方案。

关键词: 生物炭; 硝化抑制剂; CH_4 ; N_2O ; 菜地; 综合温室效应

中图分类号: S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)05-1205-07

Effects of biochar and nitrification inhibitor on the global warming potentials in vegetable field

LI Jia¹, DENG Jun-yin¹, ZHOU Wei^{2,3}, SUN Li-ying¹

(1. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Changshu Agro-ecological Experimental Station, Chinese Academy of Sciences, Changshu 215555, China)

Abstract: Static opaque chamber-gas chromatography method was used to study the effects of nitrogen fertilizer combined with biochar and nitrification inhibitor respectively, on the global warming potential (*GWP*) and greenhouse gas intensity (*GHGI*) of ecosystem in vegetable field. Three following field treatments were set up: urea (U), urea combined with biochar (UB) and urea combined with nitrification inhibitor dicyandiamide (UDCD). The results showed that compared with U treatment, UDCD treatment significantly decreased the N_2O emission flux and *GWP* by 27.1% ($P<0.05$) and 29.1% ($P<0.05$) respectively, but there were no significant effects on CH_4 emission flux, vegetable yield and *GHGI*. Compared with U treatment, UB treatment had no significant effects on N_2O emission flux, *GWP* and *GHGI*. Compared with UB treatment, UDCD treatment significantly decreased N_2O emission flux and *GWP* by 28.3% ($P<0.05$) and 29.1% ($P<0.05$), respectively. The nitrogen fertilizer combined with DCD is recommended for reducing the effect of nitrogen fertilizer

on environment significantly by comprehensive comparison of *GWP* and *GHGI* under three fertilization modes. Therefore, the UDCD fertilizing scheme is recommend in vegetable field.

Key words: biochar; nitrification inhibitor; methane; nitrous oxide; vegetable field; global warming potential

收稿日期: 2020-07-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0201203); 国家自然科学基金项目 (41501245)

作者简介: 李 佳 (1998-), 男, 甘肃武威人, 本科, 研究方向为农田温室气体排放。(E-mail) 20171342020@nuist.edu.cn

通讯作者: 孙丽英, (E-mail) sunliying@nuist.edu.cn

蔬菜地是一种特殊的农业生态系统,与其他大田作物相比,蔬菜生产集约化程度高、复种指数高、氮肥用量远超出推荐施肥量,导致氮肥利用率越来越低, N_2O 和 CH_4 大量排放^[1]。而 N_2O 和 CH_4 是两种重要的农业温室气体。据联合国气候变化政府间专家委员会(IPCC)报告,在过去的200年里,大气 N_2O 和 CH_4 质量浓度分别由西方工业化之前的270.9 $\mu\text{g/L}$ 和0.73 mg/L ,增加到2005年的325.1 $\mu\text{g/L}$ 和1.82 mg/L ,预计今后仍将呈线性增长^[2]。在100年时间尺度上, N_2O 和 CH_4 的增温潜势分别是 CO_2 的298和34倍。据Wang等估算,中国菜地施肥引起的直接 N_2O 排放量为66.95 Gg N,约占中国农田总直接 N_2O 排放量的21.4%^[3]。因此,寻找切实可行的减排措施减缓菜地温室气体的排放具有重要的意义且十分迫切。

近年来,大量研究结果表明生物炭和硝化抑制剂对农业增产减排的效果显著^[4-5]。生物炭是指生物物质在限氧条件下通过热裂解方法制备而成的一种富含孔隙结构、含碳量高、碳稳定性强的一种非纯净碳的混合物。生物炭施入到土壤中能改善土壤质量,降低土壤温室气体排放,提高作物产量^[6-7]。据Cayuela等报道,生物炭的施用可以平均降低54%的农业生态系统 N_2O 的排放。因此,农田施用生物炭可以作为农业增产减排的一个新途径^[8]。硝化抑制剂能抑制土壤中的硝化作用,从而减少氮肥的损失,提高氮肥利用率而增加作物产量,同时能减缓温室气体的排放^[9]。目前,国内外对蔬菜地温室气体排放的研究较多,通常认为添加生物炭与硝化抑制剂能减缓 N_2O 的排放^[10-12]。因此,生物炭和硝化抑制剂都是目前农业上广泛使用的用来增加作物产量、固碳减排的有效措施。但是,同时对比研究生物炭与硝化抑制剂对菜地温室效应的影响的研究较少。因此,本研究将探讨氮肥分别配施生物炭和硝化抑制剂条件下菜地 N_2O 、 CH_4 的排放特征以及对蔬菜产量的影响。以期为菜地生态系统增产减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于2018年6月在江苏省南京市浦口区浦浩生态园(32°14'N,118°41'E)进行,该区域属于典型的亚热带季风气候。该地块已有5年多的集

约化蔬菜种植历史。表层土壤(0~15 cm)的基本性质为:pH 6.5,总氮含量1.4 g/kg,土壤有机碳含量24.1 g/kg。试验中所用的生物炭由水稻秸秆在550~650 °C裂解而成,基本性质为:总碳含量462.2 g/kg,总氮含量7.2 g/kg,碳氮比64.2,pH 6.5,表面积11.5 m^2/g 。双氰胺(DCD),作为一种硝化抑制剂,与氮肥混合施用能降低农田温室气体的排放并提高氮肥利用率,因此广泛应用于农业生产中。

试验共设置3个处理,每个处理3个重复。3个处理分别为仅施尿素(U)、尿素配施生物炭(UB)、尿素配施硝化抑制剂双氰胺(UDCD)。所有处理中施肥水平一致,根据当地常规施肥水平确定,即氮肥(以N计)施入量为200 kg/hm^2 ,磷肥(以 P_2O_5 计)施入量为200 kg/hm^2 ,钾肥(以 K_2O 计)施入量为200 kg/hm^2 。生物炭的施用量为30 t/hm^2 。硝化抑制剂DCD按常规施氮量5%的比例与尿素混匀。在播种之前,将氮肥、磷肥、钾肥和生物炭施入到土壤中,并翻耕使其混合均匀。试验期间共种植一茬不结球白菜,于2018年6月10日播种,2018年7月21日收获,蔬菜生长期间不追肥。在整个试验期间,其他管理措施都按照当地常规进行。

1.2 样品采集与分析

采用静态暗箱-气相色谱法测定菜地土壤 N_2O 和 CH_4 的排放通量。采样箱和采样底座均由PVC材料制成,采样箱长、宽、高分别为45 cm、45 cm、50 cm。在试验开始之前,将方形的采样箱底座安装在各个小区中,采样时,将采样箱扣在采样箱底座上,用水密封。采样时间为上午8:00~10:00,扣上采样箱之后,于0 min、10 min、20 min、30 min分别用20 ml的针筒收集4针气体样品,然后将样品带回实验室,在12 h之内用气相色谱仪(安捷伦7890 B)分析 N_2O 和 CH_4 浓度。采样频率一般为每7 d 1次,施肥之后每隔1 d收集1次样品,持续7 d。气相色谱仪测定样品中 N_2O 和 CH_4 的检测器分别为电子捕获检测器(ECD)和氢火焰离子化检测器(FID)。

每次采集气体样品时,同时采集耕层土壤(0~15 cm)样品,储存于-4 °C冰箱,用来测定土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别采用靛酚蓝比色法和双波长紫外分光光度计法测定。蔬菜收获之后,直接称量新鲜的地上部分,获得每个小区的蔬菜产量。

1.3 数据处理与分析方法

N_2O 、 CH_4 排放通量计算公式如下: $F=\rho\times V/A\times dC/dt\times 273/(273+T)$ 。式中, F 为 N_2O -N或 CH_4 -C排放通量,单位为 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 或 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$; ρ 为标准状态下 N_2O -N和 CH_4 -C的质量浓度,分别为 1.25 g/L 和 0.54 g/L ; V 为采样箱体积, m^3 ; A 为采样箱底面积, m^2 ; dC/dt 为 N_2O 或 CH_4 的排放速率,单位为 $\text{nl}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 或 $\mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{h})$; T 为采样时箱内平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。用每个处理的3个重复的平均值表示 N_2O 和 CH_4 的排放通量。

利用菜地 N_2O 和 CH_4 的增温潜势之和来计算菜地的综合温室效应(GWP , t/hm^2 ,以 CO_2 计)。在100年时间尺度上, N_2O 和 CH_4 的增温潜势分别是 CO_2 的298和34倍^[2], $GWP(\text{t}/\text{hm}^2)$ 计算公式如下: $GWP=298\times GWP(\text{N}_2\text{O})+34\times GWP(\text{CH}_4)$ 。温室气体排放强度($GHGI$, t/t ,以 CO_2 计)是指单位产量的综合温室效应。计算公式如下: $GHGI=GWP/\text{产量}$,式

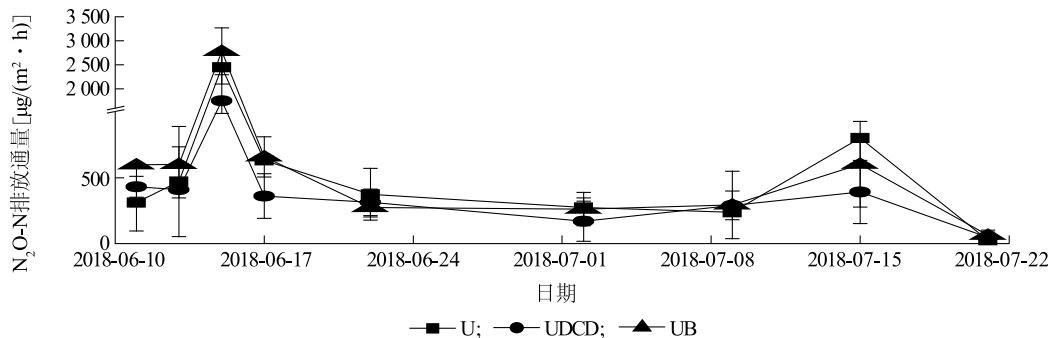
中产量单位为 t/hm^2 。

采用 Microsoft Excel 2013 和 OriginPro 8.5 软件进行图表制作。采用 JMP 9.0 软件进行多重比较分析(Student's)。采用 Pearson's 法分析无机态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)与 N_2O 和 CH_4 排放通量之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 生物炭与硝化抑制剂 DCD 对 N_2O 排放的影响

由图 1 可知,在整个蔬菜生长季,各处理的 N_2O 排放通量的变化趋势一致。所有处理都在施肥后第5 d 出现 N_2O 排放通量最大峰值,然后快速下降,之后各处理 N_2O 排放通量均保持在较低水平。UB、U、UDCD 处理的 N_2O 排放通量的最大峰值由高到低分别为 $2\,781.66\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、 $2\,447.89\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、 $1\,751.04\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。



U、UDCD 和 UB 分别代表仅施尿素、尿素配施硝化抑制剂双氰胺、尿素配施生物炭。

图 1 蔬菜生长期内 N_2O 排放通量变化

Fig.1 Variations of N_2O emission flux during the vegetable growth period

整个蔬菜生长期,UB、U、UDCD 处理的 N_2O 累积排放量分别为 $4.64\text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $4.56\text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $3.33\text{ kg}/\text{hm}^2$ (表 1)。与 U 处理相比,UB 处理增加了 1.9%的 N_2O 累积排放量($P>0.05$),而 UDCD 处理

显著降低了 27.0%的 N_2O 累积排放量($P<0.05$)。与 UB 处理相比,UDCD 处理显著降低了 28.3%的 N_2O 累积排放量($P<0.05$)。

表 1 不同处理 N_2O 、 CH_4 累积排放量、综合温室效应(GWP)、温室气体排放强度($GHGI$)和蔬菜产量

Table 1 Cumulative emissions of N_2O , CH_4 , global warming potential (GWP), greenhouse gas intensity ($GHGI$) and vegetable yield under different treatments

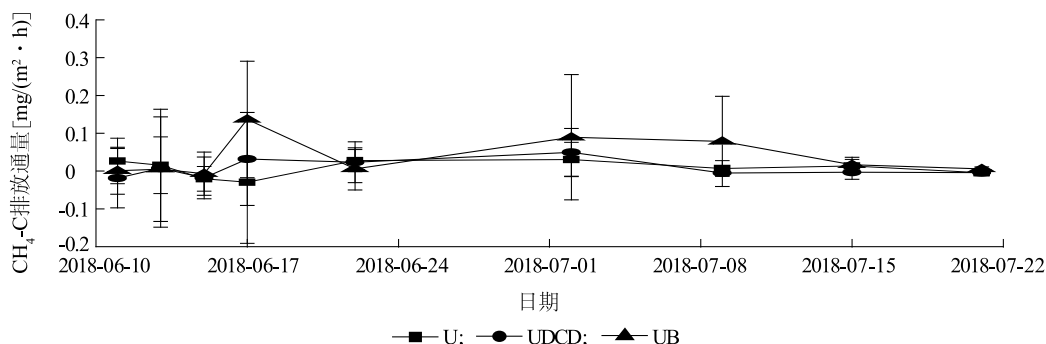
处理	N_2O 累积排放量 (以 N 计)(kg/hm^2)	CH_4 累积排放量 (以 C 计)(kg/hm^2)	产量 (t/hm^2)	GWP (t/hm^2)	$GHGI$
U	$4.56\pm 0.27\text{a}$	$0.13\pm 0.01\text{a}$	$28.94\pm 3.22\text{a}$	$2.14\pm 0.13\text{a}$	$0.06\pm 0.02\text{a}$
UDCD	$3.33\pm 0.49\text{b}$	$0.13\pm 0.24\text{a}$	$31.32\pm 4.14\text{a}$	$1.56\pm 0.22\text{b}$	$0.07\pm 0.01\text{a}$
UB	$4.64\pm 0.66\text{a}$	$0.45\pm 0.73\text{a}$	$33.19\pm 2.4\text{a}$	$2.20\pm 0.30\text{a}$	$0.07\pm 0.01\text{a}$

各处理见图 1 注。同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 生物炭与硝化抑制剂 DCD 对 CH_4 排放的影响

由图 2 可知,整个观测期间, CH_4 的排放通量变化较平稳。UB 处理在施肥第 7 d 出现 CH_4 排放峰,峰值为 $0.14 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其他处理则无明显 CH_4 排放峰。而 UB 处理的 CH_4 平均排放通量高于其他

两个处理。U、UDCD 处理的 CH_4 排放总量均为 $0.13 \text{ kg}/\text{hm}^2$,而 UB 处理高达 $0.45 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。UB 处理的 CH_4 排放通量高于 U、UDCD 处理 CH_4 排放量,但无显著差异($P>0.05$)。



U、UDCD 和 UB 分别代表仅施尿素、尿素配施硝化抑制剂双氰胺、尿素配施生物炭。

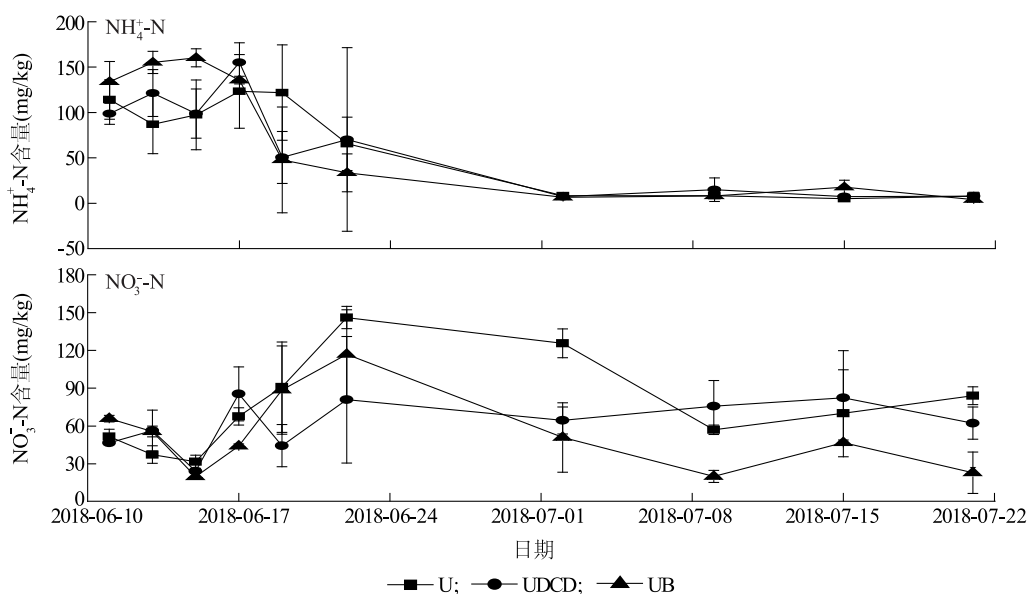
图 2 蔬菜生长期内 CH_4 排放通量变化

Fig.2 Variations of CH_4 emission flux during the vegetable growth period

2.3 菜地 CH_4 排放与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的相关性

由图 3 可知,U 处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈现先下降后上升再下降的趋势,而 UB 和 UDCD 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈现先上升后下降趋势。所有处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在第 22 d 都趋于平稳。所有处理中土

壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均呈现先下降后上升再下降然后趋于平稳的趋势。在试验第 5 d 时,U、UB、UDCD 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均出现最小值,分别为 $31.61 \text{ mg}/\text{kg}$ 、 $19.84 \text{ mg}/\text{kg}$ 、 $24.19 \text{ mg}/\text{kg}$;第 9 d 至第 22 d,U 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量明显高于其他两个处理。



U、UDCD 和 UB 分别代表仅施尿素、尿素配施硝化抑制剂双氰胺、尿素配施生物炭。

图 3 蔬菜生长期内土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量变化

Fig.3 Changes of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content during the vegetable growth period

通过线性相关分析发现,菜地 N_2O 排放与土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈显著负相关关系 ($P<0.05$) (表 2)。菜地 CH_4 排放与土壤中无机氮含量无显著关系。由表 1 知, U、UDCD、UB 处理的蔬菜产量分别为 28.94 t/hm^2 、 31.32 t/hm^2 、 33.19 t/hm^2 , UDCD 和 UB 处理的蔬菜产量比 U 处理蔬菜产量分别增加了 8.2% 和 14.7%, 但无显著性差异 ($P>0.05$)。

表 2 蔬菜生长期 N_2O 、 CH_4 排放与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的相关性

Table 2 Correlation of N_2O , CH_4 emission with $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content of soil during the growth period of vegetable

指标	N_2O 排放		CH_4 排放	
	样品数 (n)	相关系数 (r)	样品数 (n)	相关系数 (r)
土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量	27	0.475 *	27	-0.090
土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量	27	-0.427 *	27	-0.027

* 表示相关关系显著 ($P<0.05$)。

2.4 生物炭与硝化抑制剂对 GWP 和 GHGI 的影响

由表 1 知, U、UDCD、UB 处理的 GWP 值分别为 2.14 t/hm^2 、 1.56 t/hm^2 、 2.20 t/hm^2 。与 U、UB 处理相比, UDCD 处理菜地 GWP 分别显著降低了 27.1% ($P<0.05$) 和 29.1% ($P<0.05$)。而 3 个处理间的菜地 GHGI 并无显著差异。U、UB、UDCD 处理的 GHGI 值分别为 0.06、0.07、0.07。

3 讨论

3.1 生物炭与硝化抑制剂对菜地 N_2O 排放的影响

许多研究结果表明,生物炭添加到农田土壤中,能增加土壤有机碳含量和改变土壤理化性质,从而影响农田土壤温室气体 (N_2O 、 CH_4) 的排放^[6,8,13]。但生物炭添加到不同土壤中,对 N_2O 排放产生的影响也不相同。生物炭能通过改变土壤通气性,降低土壤容质量,提高土壤 pH 以及改变土壤氮素形态等来降低土壤 N_2O 的排放^[14]。Cayuela 等通过 Meta 分析发现添加生物炭能降低 N_2O 排放的 54%^[8]。但是本研究结果表明,生物炭的添加,对菜地 N_2O 排放量并没有显著影响,与有的人的研究结果^[7,15] 相同。本研究中,生物炭的添加增加了菜地 N_2O 排放量但没有产生显著影响,可能的原因是:1) 生物

炭灰分较高,导致菜地土壤 N_2O 排放增加;2) 菜地施肥量较大,过量氮肥对 N_2O 排放的影响可能远超过生物炭对氮素转化的影响;3) 配施 30 t/hm^2 生物炭可能远没有达到生物炭的减排效果。

本研究中,施用硝化抑制剂 DCD 显著降低了蔬菜生长期 N_2O 排放量,与前人的研究结果一致^[4,16]。硝化抑制剂主要是通过抑制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 从而减少氮肥以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 形式的损失^[17]。DCD 处理较 U 处理有效降低了菜地土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,表明氮肥配施 DCD 能有效抑制土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化过程,不仅降低土壤中硝酸盐淋失的风险^[18], 还降低 N_2O 排放。

菜地施肥之后, N_2O 排放量逐渐升高,所有处理在第 5 d 都达到最大值,主要是因为施入的氮肥为硝化、反硝化作用提供了底物。通常情况下,在土壤通气性比较好的情况下,土壤呈氧化状态,硝化作用是 N_2O 排放的主要来源。通过线性相关分析发现,菜地土壤中 N_2O 的排放与土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度呈显著负相关关系 ($P<0.05$), 说明在菜地土壤中硝化作用产生的 N_2O 可能要高于反硝化作用产生的。

3.2 生物炭与硝化抑制剂 DCD 对菜地 CH_4 排放的影响

在整个不结球白菜生长期,所有处理的 CH_4 排放通量均较低,在 $0 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 上下波动,无明显规律。相比于只施氮肥处理,氮肥配施生物炭处理增加了 CH_4 排放通量,但是未达到显著水平;而氮肥配施硝化抑制剂 DCD 处理对 CH_4 的排放通量并无显著影响。许多研究结果表明,添加生物炭到土壤中,尤其是旱地土壤,能增加土壤的通气性、阳离子交换量,抑制产甲烷菌的活动,从而降低 CH_4 排放^[19]。李露等^[20] 在稻麦轮作中配施 20 t/hm^2 生物炭对 CH_4 排放无显著影响,但是配施 40 t/hm^2 生物炭能显著降低 10% 的 CH_4 排放。因此,本研究中氮肥配施 30 t/hm^2 的生物炭可能还没有达到减排效果。硝化抑制剂主要是影响土壤中氮素的转化,降低 N_2O 排放,对 CH_4 的排放并无显著影响。Weiske 等通过 3 年的田间试验发现硝化抑制剂 DCD 能显著降低 N_2O 的排放,对 CH_4 的排放显著影响^[21]。

3.3 生物炭与硝化抑制剂对蔬菜产量、GWP 和 GHGI 的影响

通常向土壤中添加生物炭能增加作物产

量^[7,22],因为生物炭能通过改善土壤性质提高土壤肥力和氮肥利用率^[23]。虽然在本研究中,施用生物炭增加蔬菜产量没有达到显著水平,但是有明显提高蔬菜产量的趋势。本研究中, N_2O 排放是GWP的主要组成部分,而生物炭的添加并没有显著影响 N_2O 的排放和蔬菜产量,因此对GWP和GHGI也无显著影响。

许多研究结果表明硝化抑制剂能通过降低氮素损失和增加氮肥利用率来增加作物产量^[23-24]。本研究中施用硝化抑制剂并未显著提高蔬菜产量,与Fan等的研究结果相同^[25]。主要原因可能是,通过硝化抑制剂减少的氮素损失,相比于施入的大量氮肥,可以忽略不计。相比于仅施尿素处理,添加硝化抑制剂DCD显著降低了GWP,但是对GHGI无显著影响^[26]。

4 结 论

本研究结果表明,在常规施肥条件下,配施生物炭对菜地 N_2O 和 CH_4 排放以及蔬菜产量、GWP和GHGI没有显著影响。而配施硝化抑制剂DCD能显著降低菜地 N_2O 的排放和GWP,对 CH_4 排放、蔬菜产量和GHGI没有显著影响。即添加硝化抑制剂DCD可以显著减少氮肥对环境的影响。但是本研究期限较短,生物炭与硝化抑制剂对菜地GWP和蔬菜产量的影响需要今后进一步、长期的研究。

参考文献:

- [1] 纪梦梦,吴晓刚,吴欣欣,等. 过量施肥对设施菜田土壤菌群结构及 N_2O 产生的影响[J]. 微生物学通报, 2018, 45(6): 1452-1459.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013: the physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] WANG J Y, XIONG Z Q, YAN X Y. Fertilizer-induced emission factors and background emissions of N_2O from vegetable fields in China [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45: 6923-6929.
- [4] 李 博,李巧玲,范长华,等. 施用生物炭与硝化抑制剂对菜地综合温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2651-2657.
- [5] 易 琼,逢玉万,张 木,等. 不同施肥模式下硝化抑制剂DCD与生物炭对菜地 N_2O 排放和土壤特性的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1336-1341.
- [6] ZHANG A F, CHENG G, QAISER H, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar application on net global warming potential in the Loess Plateau of China [J]. Field Crops Research, 2017, 205: 45-54.
- [7] 陈 晨,许 欣,毕智超,等.生物炭和有机肥对菜地土壤 N_2O 排放及硝化、反硝化微生物功能基因丰度的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(5): 1912-1920.
- [8] CAYUELA M L, VAN ZWIETEN L, SINGH B P, et al. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: a review and meta-analysis [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2014, 191: 5-16.
- [9] GUO Y J, DI H J, CAMERON K C, et al. Effect of 7-year application of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), on soil microbial biomass, protease and deaminase activities, and the abundance of bacteria and archaea in pasture soils [J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(4): 753-759.
- [10] DI T, ZHANG Y Y, ZHOU Y Z, et al. Effect of nitrification inhibitors on mitigating N_2O and NO emissions from an agricultural field under drip fertigation in the North China Plain [J]. Science of the Total Environment, 2017, 598: 87-96.
- [11] HUSSAIN M, FAROOQ M, NAWAZ A, et al. Biochar for crop production: potential benefits and risks [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(3): 685-716.
- [12] KONG X, ERIKSEN J, PETERSEN S. Evaluation of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) for mitigating soil N_2O emissions after grassland cultivation [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2018, 259: 174-183.
- [13] MAUCIERI C, ZHANG Y, MCDANIEL M D, et al. Short-term effects of biochar and salinity on soil greenhouse gas emissions from a semi-arid Australian soil after re-wetting [J]. Geoderma, 2017, 307: 267-276.
- [14] ZHANG A, CUI L, PAN G, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice Paddy from Tai Lake Plain, China [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2010, 139: 469-475.
- [15] CASE S D C, MCNAMARA N P, REAY D S, et al. Can biochar reduce soil greenhouse gas emissions from a Miscanthus bioenergy crop? [J]. GCB Bioenergy, 2014, 6: 76-89.
- [16] 熊 舞,夏永秋,周 伟,等. 菜地氮肥用量与 N_2O 排放的关系及硝化抑制剂效果[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 743-751.
- [17] FRIEDL J, SCHEER C, ROWLINGS D W, et al. The nitrification inhibitor DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) reduces N_2 emissions from intensively managed pastures in subtropical Australia [J]. Soil Biology Biochemistry, 2017, 108:55-64.
- [18] ASING J, SAGGAR S, SINGH J, et al. Assessment of nitrogen losses from urea and an organic manure with and without nitrification inhibitor, dicyandiamide, applied to lettuce under glasshouse conditions [J]. Soil Research, 2008, 46(7): 535-541.
- [19] KHAN S, WANG N, REID B J, et al. Reduced bioaccumulation of PAHs by *Lactuca sativa* L. grown in contaminated soil amended with sewage sludge and sewage sludge derived biochar [J]. Environmental Pollution, 2013, 175: 64-68.
- [20] 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.
- [21] WEISKE A, BENCKISER G, HERBERT T, et al. Influence of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in comparison to dicyandiamide (DCD) on nitrous oxide, carbon dioxide fluxes and methane oxidation during 3 years of repeated application in field experiments [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34: 109-117.
- [22] LI B, BI Z C, XIONG Z Q. Dynamic responses of nitrous oxide emission and nitrogen use efficiency to nitrogen and biochar amendment in an intensified vegetable field in southeastern China [J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 9: 400-413.
- [23] ZHANG D, PAN G, WU G, et al. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol [J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 106-113.
- [24] 张 洋,李雅颖,郑宁国,等. 生物硝化抑制剂的抑制原理及其研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 21-26.
- [25] FAN C, LI B, XIONG Z Q. Nitrification inhibitors mitigated reactive gaseous nitrogen intensity in intensive vegetable soils from China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 480-489.
- [26] ABALOS D, JEFFERY S, SANZ-CORBINA A, et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2014, 189: 136-144.

(责任编辑:张震林)