

李雪松, Sajjad Raza, 刘占军, 等. 氮肥及硝化抑制剂配合施用对石灰性土壤二氧化碳释放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1658–1663.
LI Xue-song, Sajjad Raza, LIU Zhan-jun, et al. Effects of application of nitrogen fertilizer and nitrification inhibitor on carbon dioxide emissions from calcareous soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1658–1663.

氮肥及硝化抑制剂配合施用对石灰性土壤二氧化碳释放的影响

李雪松^{1,2}, Sajjad Raza^{1,2}, 刘占军^{1,2}, 陈竹君^{1,2}, 周建斌^{1,2*}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为研究施用氮肥对同时含有有机碳及无机碳石灰性土壤碳释放的影响,在陕西杨凌进行田间试验,比较了不同施氮量(0、160、220 kg·hm⁻²)及其与硝化抑制剂(DCD)配合(N160、N220及N160+DCD、N220+DCD)对土壤pH值、矿质态氮含量和二氧化碳(CO₂)释放量的影响。结果表明:施用氮肥显著降低了耕层土壤pH;配施DCD后土壤pH降低幅度小于未加DCD处理;加入DCD使氮肥的硝化过程推迟了约20 d;未加DCD处理的土壤CO₂释放量随施氮量增加而增加,试验结束时(施肥37 d后)土壤CO₂累积释放量最高达到167.1 g·m⁻²。与N0处理相比,N160和N220处理的土壤CO₂累积释放量显著增加,增幅分别为20.9%和25.7%;N160+DCD和N220+DCD处理显著降低了土壤CO₂累积释放量,比对应相同施氮量处理分别降低了13.5%和11.0%。上述结果说明施用氮肥会同时影响石灰性土壤有机碳及无机碳的释放,施用氮肥引起的土壤无机碳的释放值得关注。

关键词:石灰性土壤;氮肥;硝化抑制剂;土壤pH;土壤碳释放

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)08-1658-06 **doi:**10.11654/jaes.2017-0110

Effects of application of nitrogen fertilizer and nitrification inhibitor on carbon dioxide emissions from calcareous soil

LI Xue-song^{1,2}, Sajjad Raza^{1,2}, LIU Zhan-jun^{1,2}, CHEN Zhu-jun^{1,2}, ZHOU Jian-bin^{1,2*}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: A field trial was conducted to study the effects of adding nitrogen(N) fertilizer and nitrification inhibitor(DCD) on CO₂ emissions from calcareous soil in Yangling, Shaanxi. The treatments included a control to which no N fertilizer was added(N0) and two N fertilizer rates(160 and 220 kg N·hm⁻², represented as N160 and N220, respectively) and their combinations with DCD(N160+DCD and N220+DCD, respectively). The soil pH, contents of mineral N(NH₄⁺-N, NO₃⁻-N), and CO₂ emissions were measured. The results showed that the application of N fertilizer significantly reduced soil pH in comparison with N0. The decreasing rates of soil pH were less when N fertilizer was added with DCD. Addition of DCD delayed the nitrification of the N fertilizer by about 20 days. The CO₂ emissions from different N fertilizer treatments increased as the N rate increased when no DCD was added. Moreover, the maximum CO₂ emissions from soil after the experiment(37 days after adding N fertilizer) was as high as 167.1 g·m⁻². Compared with the N0 treatment, the amount of CO₂ emissions from the N160 and N220 treatments increased by 20.9% and 25.7%, respectively. When DCD was combined with the N160 and N220 treatments, CO₂ emissions from the soil decreased by 13.5% and 11.0%, respectively. This indicates that the application of N fertilizer affected both the release of organic carbon and inorganic carbon from the calcareous soil. Thus, the effect of N fertilizer on the release of inorganic carbon from soil needs more study.

Keywords: calcareous soil; nitrogen fertilizer; nitrification inhibitor; soil pH; soil carbon release

收稿日期:2017-01-19

作者简介:李雪松(1993—),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事土壤碳、氮关系研究。E-mail:1652289308@qq.com

*通信作者:周建斌 E-mail:jbzhou@nwsuaf.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41671295, 31372137);国家“十二五”科技支撑计划课题(2012BAD15B04)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(41671295, 31372137); The National Technology R&D Pillar Program in the 12th Five Year Plan of China(2012BAD15B04)

以温室效应带来的全球变暖为主要特征的气候变化是人类社会面临的重要问题^[1-2]。温室效应气体中二氧化碳(CO₂)的影响最大,对与其密切相关的土壤碳转化过程及影响因素的研究已成为人们关注的热点。土壤释放 CO₂(通常称为土壤呼吸)是陆地生态系统碳循环的重要环节,是土壤碳素向大气输出的主要途径^[3-4],也是影响大气 CO₂ 浓度的关键生态过程。土壤排放到大气的 CO₂ 高达 68~100 Pg C·a⁻¹^[5],约占大气 CO₂ 总量的 10%^[6],土壤 CO₂ 通量的微小变化即可对全球气候变化和碳循环产生重大影响^[7]。

土壤 CO₂ 的释放同时受生物及土地利用、土壤湿度、pH 值、施肥等非生物因素的影响^[8-9],其中氮肥施用是影响土壤 CO₂ 释放的重要因素^[10]。石灰性土壤同时含有机碳及无机碳,关于氮肥对土壤有机碳释放的影响已有不少研究^[11-12],但施用氮肥对石灰性土壤无机碳释放的影响尚不清楚。氮肥施入土壤后,会导致土壤碳氮循环的改变,如铵态氮在微生物的作用下会发生硝化反应,每生成 1 mol 的硝酸根同时释放出 2 mol 的 H⁺^[13-14],从而降低土壤 pH。我国是世界氮肥生产和消费的第一大国,约占全世界氮肥总用量的 30%^[15]。长期或大量施用氮肥,导致我国农田土壤酸化问题突出,其中以南方地区土壤表现更为严重^[16],北方石灰性土壤 pH 的降低也较为明显^[17]。王媛华等^[18]研究发现,碱性土壤在不同氮肥处理下土壤 pH 值均有不同程度的降低。Schroder 等^[19]研究表明,从 1971 年至 2002 年,由于氮肥的大量施用,北美中西部平原表层土壤(0~15 cm) pH 显著降低。无机碳是石灰性土壤重要的碳库^[20-21]。有研究表明,土壤酸化已经改变了全球无机碳储量及组分^[22]。Wu 等^[23]大尺度分析了我国土壤无机碳含量的变化,发现土壤酸化使我国土壤无机碳自 20 世纪 80 年代至今损失约 1.6 Pg C。硝化抑制剂是减少氮素损失、提高氮肥利用率的措施之一^[24-25];硝化抑制剂可延缓硝化作用的发生,但其对石灰性土壤释放 CO₂ 有何影响,鲜见报道。

为此,本文以陕西关中地区的典型壤土作为研究对象,在田间情况下研究了氮肥及其与硝化抑制剂(DCD)配合施用对土壤 CO₂ 释放的影响,旨在评价施用氮肥对石灰性土壤碳释放的作用。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015 年 10 月在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站试验地进行。该地位于陕西关中地区的

渭河三级阶地,平均海拔 523 m,年均气温 13 ℃,年均降水量 600~650 mm,主要集中在 7、8、9 月,年均蒸发量 1400 mm,属于半湿润易旱区。土壤类型为褐土类,壤土亚类,红油土属,系统分类为土垫旱耕人为土,耕层土壤质地为粉砂粘壤土^[26]。土壤基本性质:有机质 16.77 g·kg⁻¹、全氮 0.99 g·kg⁻¹、速效磷 8.46 mg·kg⁻¹、速效钾 91.75 mg·kg⁻¹、硝态氮 4.56 mg·kg⁻¹、铵态氮 2.12 mg·kg⁻¹、pH 8.24、碳酸钙 66.01 g·kg⁻¹。

田间试验设氮肥不同用量及其与硝化抑制剂(DCD)配比 5 个处理,即氮肥用量为 0、160、220 kg·hm⁻²,及施用 160、220 kg·hm⁻² 氮肥基础上再加入硝化抑制剂,处理代号分别为 N0、N160、N220、N160+DCD 和 N220+DCD。所用氮肥种类为尿素,DCD 用量为施 N 量的 10%^[27]。每个处理 4 个重复,随机排列,小区面积 4 m×4 m,不同小区间隔 0.50 m,周围设置保护行。在施肥后的第 1、3、5、7、9、11、13、15、17、19、21、23、25、27、29、31、33、35、37 d 采用碱液吸收法分别测定土壤释放 CO₂ 通量,并在施肥后的第 1、6、9、12、16、20、25、30、37 d 采集 0~20 cm 土样,测定土壤 pH 和矿质态氮含量。试验期间气温及降雨量见图 1。

1.2 分析项目及计算方法

CO₂ 释放量采用碱液吸收法测定^[28]:在试验小区内选定直径为 25 cm 的圆形测定点,将一小三角架固定在圆心,其上放置事先已注入 20 mL 1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液的广口瓶,迅速用 PVC 管(直径 25 cm、高 30 cm,一端密闭)扣在选定的样圆上,为隔绝外界空气避免大气 CO₂ 的干扰,圆桶下缘压入土中 2 cm,确保桶与外界无气体交换。24 h 后取出碱液瓶,迅速加盖后带回实验室内分析,释放量用 BaCl₂ 沉淀-盐酸-氢氧化钠滴定法测定,可得到该时间内的土壤呼吸速率。

碱液吸收法测定数据计算公式:

$$V_l[\text{CO}_2] = (V_0 - V) \times C \times 22.4 / S$$

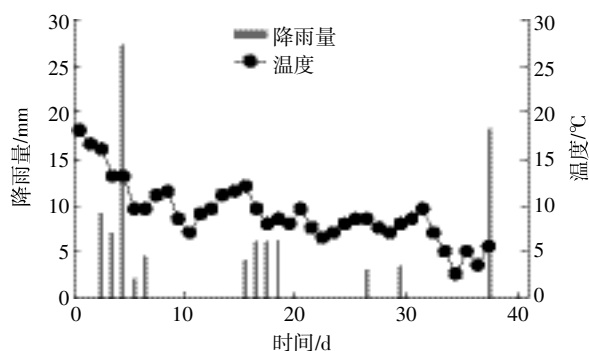


图 1 试验期间气温及降雨量

Figure 1 Changes of air temperature and rainfall during the experiment

式中: V_1 为土壤 CO_2 释放速率, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; V_0 为滴定对照瓶中碱液至终点所需酸的体积, mL; V 为滴定暴露于土壤空气的瓶中碱液至终点所需酸的体积, mL; C 为盐酸标准溶液浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; S 为 PVC 管底面积, m^2 。

CO_2 累积释放量计算公式^[29]:

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i)$$

式中: M 为 CO_2 累积释放量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; F 为释放通量(即释放速率), $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; i 为采样次数; t 为播种后天数, d。

土壤矿质态氮的测定: 称取新鲜土样 5.00 g, 用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提, 振荡机 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 1 h 后连续流动分析仪(AA3)测定。

土壤 pH 值测定: 称取土样 10.00 g, 水土比 2.5:1, PHS-3C 精密 pH 计测定。

1.3 数据处理方法

数据分析采用 Microsoft Excel 2007, 绘图采用 Sigmaplot 12.0, 方差分析采用 SAS 8.0。

2 结果分析

2.1 土壤 pH 值

由图 2 可知, 试验期间各处理的土壤 pH 都比较高($\text{pH} > 8.0$), 与供试石灰性土壤本身的 pH 值较高有关。试验期间 N0 处理土壤 pH 无显著变化($P > 0.05$)。与 N0 相比, N160 和 N220 处理土壤 pH 平均降低了 0.1 个单位; 到试验结束时, 不施氮和只施氮肥处理土壤 pH 差异达显著水平($P < 0.05$), 但不同施肥量之间差异不显著($P > 0.05$)。与只施氮肥处理相比, 加入 DCD 后土壤 pH 降低的幅度较小, 可能与 DCD 抑制了硝化作用进行而减少了质子释放有关。

2.2 土壤矿质态氮含量

2.2.1 土壤 NH_4^+-N

试验期间除 N0 处理土壤的 NH_4^+-N 含量保持稳

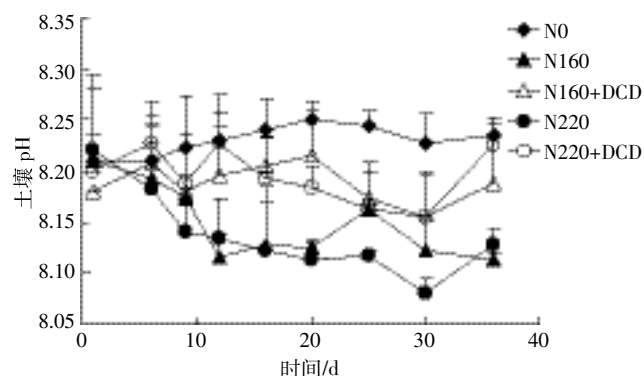


图 2 不同处理土壤 pH 的动态变化

Figure 2 Changes of soil pH of the different treatments during the experiment

定外, 其他各处理土壤 NH_4^+-N 含量呈现先增加后降低的趋势(图 3)。在试验前 16 d, N160 和 N220 处理与 N0 处理 NH_4^+-N 含量差异均达显著水平($P < 0.05$); 随着时间的推移, 土壤 NH_4^+-N 含量逐渐降低, 培养结束时各处理间无显著差异($P > 0.05$)。加入 DCD 处理的土壤 NH_4^+-N 始终高于未加 DCD 处理。N160 和 N220 处理的土壤 NH_4^+-N 含量在试验第 16 d 与 N0 相比无差异, N160+DCD 和 N220+DCD 处理的土壤 NH_4^+-N 含量在试验第 30 d 与 N0 相比无显著性差异, 说明加入 DCD 使得硝化过程推迟了 20 d 左右。

2.2.2 土壤 NO_3^--N

N0 处理土壤 NO_3^--N 含量在整个试验期间无明显变化, 变化幅度为 $4.74 \sim 9.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4)。未加入 DCD 条件下土壤 NO_3^--N 含量随施氮量的增加而增加, 试验第 9 d 与 N0 相比达显著差异水平, 之后直至试验结束 N160 和 N220 处理土壤 NO_3^--N 含量均显著高于 N0; 加入 DCD 处理, 土壤 NO_3^--N 在整个试验期间增加幅度不大, 含量始终低于仅施氮肥处理。这与 DCD 与氮肥配合延迟了 NH_4^+-N 的硝化作用有关。

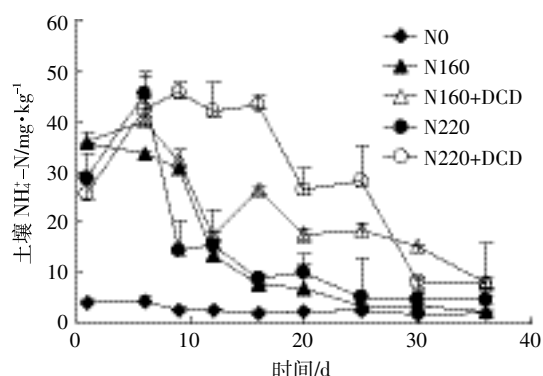


图 3 不同处理土壤 NH_4^+-N 变化

Figure 3 Changes of NH_4^+-N in soils of the different treatments during the experiment

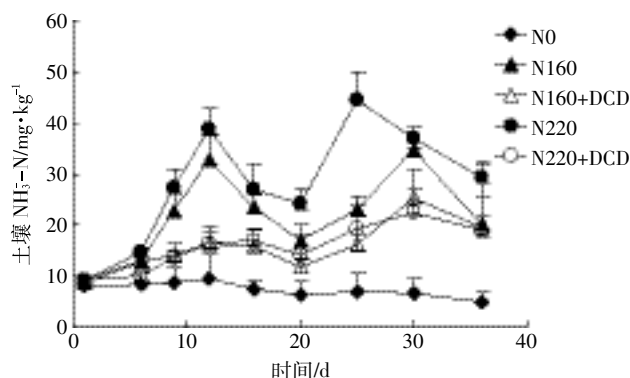


图 4 不同处理土壤 NO_3^--N 变化

Figure 4 Changes of NO_3^--N in soils of the different treatments during the experiment

试验后期各处理 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均有所降低,可能与试验期间降雨较多,表层土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 发生淋溶有关。

2.3 土壤 CO_2 释放速率

从图 5 可以看出,与 N0 相比,各施氮处理土壤 CO_2 释放速率均较高,且随着施氮量的增加而增加。各施肥处理 CO_2 释放速率在试验前 5 d 无显著差异,之后加入 DCD 处理的 CO_2 释放速率有所降低,与未加入 DCD 的对应相同施氮处理差异达显著水平 ($P<0.05$)。

不同处理土壤 CO_2 释放速率表现出两个峰:前期先升高,到第 5 d 达到第一个峰值, CO_2 释放速率最大值为 $5.81 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,可能与尿素水解释放 CO_2 有关;到试验第 15 d 达到第二个峰值, CO_2 释放速率最大值为 $5.33 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;之后 CO_2 释放速率开始降低,至第 19 d 后趋于平稳。

2.4 土壤 CO_2 累积释放量

从图 6 可以看出,与 N0 相比,单施氮肥处理不同程度地增加了试验期间土壤 CO_2 累积释放量,试验结束时土壤 CO_2 累积释放量最大值为 $167.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,试验结束时 N160 和 N220 处理土壤 CO_2 累积释放量显著高于对照 ($P<0.05$),分别比对照增加了 20.9%和 25.7%。

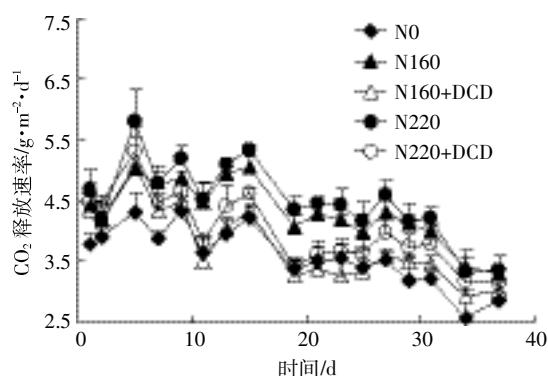


图 5 不同处理土壤 CO_2 释放速率变化

Figure 5 Changes of CO_2 release rates from soil of the different treatments during the experiment

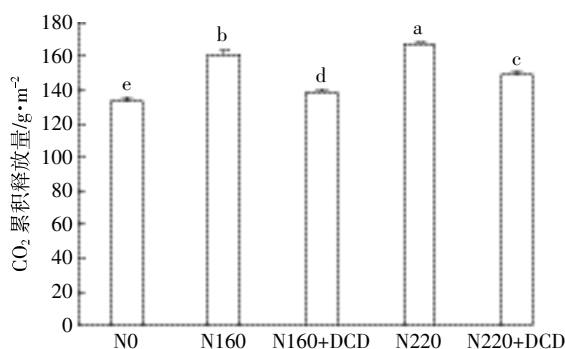


图 6 不同处理土壤 CO_2 累积释放量

Figure 6 The cumulative released CO_2 from the different treatments during the experiment

与仅施氮肥处理相比,加入 DCD 显著降低了土壤 CO_2 累积释放量, N160+DCD 和 N220+DCD 处理分别降低了 13.5%和 11.0%。

3 讨论

3.1 施用氮肥和 DCD 对土壤 pH 和矿质氮变化的影响

本研究发现, N160 和 N220 处理土壤 pH 显著低于 N0 处理,施用氮肥基础上加入 DCD 后,土壤 pH 降低幅度小于未加入 DCD 的土壤(图 1),与他人的研究结果一致。如孙志梅等^[30]发现,施用氮肥土壤酸化作用明显,而将尿素与 DCD 配合施用明显减轻了土壤的酸化程度。石美等^[27]培养试验发现,在单独施用尿素 21 d 内,石灰性土壤 pH 由于硝化作用的进行而显著降低, pH 降低幅度约 0.6 个单位;而尿素和 DCD 配合施用在 25 d 内土壤 pH 显著高于只施尿素处理,在培养的 60 d 内土壤 pH 降低的幅度始终低于单独施用尿素处理。可见施入 DCD 缓解了氮肥施用带来的土壤酸化现象。

本研究还发现,无论是否加入 DCD,土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量均在第 6 d 达到最大值,说明施入土壤的尿素在此时完全水解。未加入 DCD 处理的土壤,其 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量在第 16 d 达到痕量,而加入 DCD 处理的土壤,其 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量在第 37 d 达到痕量,说明加入 DCD 使氮素硝化过程延迟了 20 d 左右。刘瑜等^[31]研究表明,褐土施用 DCD 使尿素加入后的硝化过程时间延长 30 d。石美等^[27]研究指出,DCD 使供试的石灰性土壤硝化过程延滞了 35~39 d。与这些研究结果相比,本研究加入 DCD 使硝化过程的延迟时间相对较短,可能与试验期间降雨较多有关,因为 DCD 不易被土壤吸附,随水流失,所以减弱了 DCD 发挥的抑制效果^[32]。

3.2 施用氮肥及 DCD 对石灰性土壤 CO_2 的影响及机理

本研究发现,随着施氮量的增加土壤碳释放量相应增加,试验结束时, N160 和 N220 处理土壤 CO_2 释放量分别比 N0 处理高 20.9%和 25.7%。相关性分析表明,试验结束时土壤 CO_2 累积释放量与施肥量之间呈显著正相关 ($r=0.996$),表明氮肥用量与土壤碳释放之间具有密切的关系。氮肥配施 DCD 后,土壤 CO_2 累积释放量显著降低 ($P<0.05$),试验结束时 N160+DCD 和 N220+DCD 处理比对应相同施氮处理土壤的 CO_2 释放量分别降低了 13.5%和 11.0%,差异达显著水平(图 6)。

石灰性土壤同时存在有机碳及无机碳,土壤释放

的碳除来自有机碳的分解外,也可能来自土壤无机碳的释放^[33-34]。前者是生物因素主导的过程,氮肥施入土壤后,为土壤微生物提供了必需的氮素,提高了微生物对土壤有机碳的分解^[35];后者是非生物因素主导的过程,主要受土壤条件特别是土壤 pH 的影响,土壤 pH 降低,会促进石灰性土壤无机碳的释放。孟延等^[36]培养试验研究发现,施用氮肥显著降低土壤 pH,增加了石灰性土壤 CO₂ 的释放量,估算可知来源于无机碳的比例约 54%。关于田间条件下施用氮肥对石灰性土壤无机碳可能释放的影响研究较少。如 Heimann 等^[37]新近研究表明,从 1981 年到 2009 年不到 30 年期间,由于大量施用化肥,北京地区一些土壤酸化现象明显,无机碳含量由 3.6 g·kg⁻¹ 下降到 0.96 g·kg⁻¹。因此,氮肥配施 DCD 后,土壤 CO₂ 累积释放量显著降低可能与 DCD 对硝化过程抑制后降低了 H⁺ 的释放,进而减少土壤无机碳的溶解与释放有关。这说明施用氮肥不仅影响土壤碳释放生物过程,同时影响土壤碳释放的非生物过程。

本研究同时发现,氮肥施用一周内,不论是否加入 DCD,相同施氮处理土壤 CO₂ 释放速率差异不大。这可能与此时土壤 CO₂ 释放的来源主要为尿素水解有关。随着试验时间的延长,不同处理的土壤 CO₂ 累积释放量的差异逐渐变大。这可能由于加入与未加入 DCD 处理土壤 pH 降低的幅度不同,所以造成土壤无机碳的释放不同。若要进一步准确区分土壤碳排放来源,需采用 δ¹³C 等更为准确的方法进行研究。

4 结论

(1)与未施氮肥对照(N0)相比,N160 和 N220 处理显著降低了土壤 pH;施用氮肥基础上加入 DCD 后土壤 pH 降低幅度小于未加入 DCD 土壤。加入 DCD 使氮肥硝化过程推迟了 20 d 左右。

(2)施用氮肥显著提高了石灰性土壤 CO₂ 释放量,与不施肥相比增加了 20.9%~25.7%;而氮肥与硝化抑制剂 DCD 配施,土壤 CO₂ 释放量降低了 11.0%~13.9%。这与 DCD 延缓了 NH₄⁺-N 的硝化作用,土壤 pH 降低的幅度较小有关,说明施用氮肥会同时影响石灰性土壤有机碳及无机碳的释放。

参考文献:

- [1] 张旭博,孙楠,徐明岗,等. 全球气候变化下中国农田土壤碳库未来变化[J]. 中国农业科学, 2014, 47(23): 4648-4657.
ZHANG Xu-bo, SUN Nan, XU Ming-gang, et al. Soil organic carbon in agricultural soils in China under global climate change[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(23): 4648-4657.
- [2] 王新源,李玉霖,赵学勇,等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4890-4901.
WANG Xin-yuan, LI Yu-lin, ZHAO Xue-yong, et al. Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4890-4901.
- [3] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, 1(1): 77-91.
- [4] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [5] 李玉宁,王关玉,李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 351-357.
LI Yu-ning, WANG Guan-yu, LI Wei. Soil respiration and carbon cycle[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 351-357.
- [6] 韩广轩,周广胜,许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 719-733.
HAN Guang-xuan, ZHOU Guang-sheng, XU Zhen-zhu. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 719-733.
- [7] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Soil warming and organic carbon content reply[J]. *Nature*, 2000, 408(6814): 789-790.
- [8] 江国福,刘畅,李金全,等. 中国农田土壤呼吸速率及驱动因子[J]. 中国科学:生命科学, 2014, 44(7): 725-735.
JIANG Guo-fu, LIU Chang, LI Jin-quan, et al. Soil respiration and driving factors of farmland ecosystems in China[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2014, 44(7): 725-735.
- [9] Baath E, Arnebrant K. Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash treated forest soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26(8): 995-1001.
- [10] 金皖豫,李铭,何杨辉,等. 不同施氮水平对冬小麦生长期土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2015, 39(3): 249-257.
JIN Wan-yu, LI Ming, HE Yang-hui, et al. Effects of different levels of nitrogen fertilization on soil respiration during growing season in winter wheat[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(3): 249-257.
- [11] 王朔林,杨艳菊,王改兰,等. 长期施肥对栗褐土有机碳矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1278-1285.
WANG Shuo-lin, YANG Yan-ju, WANG Gai-lan, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon mineralization of cinnamon soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(5): 1278-1285.
- [12] 陈涛,郝晓晖,杜丽君,等. 长期施肥对水稻土土壤有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1494-1500.
CHEN Tao, HAO Xiao-hui, DU Li-jun, et al. Effects of long-term fertilization on paddy soil organic carbon mineralization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1494-1500.
- [13] 佟德利,徐仁扣. 三种氮肥对红壤硝化作用及酸化过程影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 853-859.
TONG De-li, XU Ren-kou. Effects of urea, (NH₄)₂SO₄ and NH₄HCO₃ on nitrification and acidification of a red soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(4): 853-859.
- [14] 孟红旗,刘景,徐明岗,等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1109-1116.
MENG Hong-qi, LIU Jing, XU Ming-gang, et al. Evolution of pH in

- topsoils of typical Chinese croplands under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6):1109-1116.
- [15] 许秀成. 21世纪化肥展望[J]. 磷肥与复肥, 2002, 17(5):1-5.
- XU Xiu-cheng. Prospects for fertilizer in the 21st Century[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2002, 17(5):1-5.
- [16] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2):238-244.
- XU Ren-kou. Research progresses in soil acidification and its control[J]. *Soils*, 2015, 47(2):238-244.
- [17] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [18] 王媛华, 段增强, 汤英, 等. 不同施肥处理对碱性设施土壤酸化的影响[J]. 土壤, 2016, 48(2):349-354.
- WANG Yuan-hua, DUAN Zeng-qiang, TANG Ying, et al. Effects of different fertilizations on acidification of a greenhouse alkaline soil[J]. *Soils*, 2016, 48(2):349-354.
- [19] Schroder J L, Zhang H, Girma K, et al. Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(3):957-964.
- [20] 余健, 房莉, 卞正富, 等. 土壤碳库构成研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(17):4829-4838.
- YU Jian, FANG Li, BIAN Zheng-fu, et al. A review of the composition of soil carbon pool[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17):4829-4838.
- [21] 杨黎芳, 李贵桐. 土壤无机碳研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42(4):986-990.
- YANG Li-fang, LI Gui-tong. Advances in research of soil inorganic carbon[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4):986-990.
- [22] Sanderman J. Can management induced changes in the carbonate system drive soil carbon sequestration? A review with particular focus on Australia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 155:70-77.
- [23] Wu H, Guo Z, Gao Q, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 129(4):413-421.
- [24] Jia M, Xu R K, Li J, et al. Dicyandiamide enhances liming potential of two legume materials when incubated with an acid Ultisol[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(9):1632-1635.
- [25] Cookson W R, Cornforth I S. Dicyandiamide slows nitrification in dairy cattle urine patches: Effects on soil solution composition, soil pH and pasture yield[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(10):1461-1465.
- [26] 蔡苗, 董燕婕, 李佰军, 等. 不同施氮处理玉米根茬在土壤中矿化分解特性[J]. 生态学报, 2013, 33(14):4248-4256.
- CAI Miao, DONG Yan-jie, LI Bai-jun, et al. Decomposition characteristics of maize roots derived from different nitrogen fertilization fields under laboratory soil incubation conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14):4248-4256.
- [27] 石美, 张妹婷, 沈锋, 等. 石灰性土壤中不同硝化抑制剂的抑制效果及其对亚硝态氮累积的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3):500-506.
- SHI Mei, ZHANG Mei-ting, SHEN Feng, et al. Effects of nitrification inhibitors on nitrification inhibition and nitrite accumulation in calcareous soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3):500-506.
- [28] 张丁辰, 蔡典雄, 代快, 等. 旱地农田两种土壤呼吸测定方法的比较[J]. 中国土壤与肥料, 2011(4):1-4.
- ZHANG Ding-chen, CAI Dian-xiong, DAI Kuai, et al. Comparative study of two different soil respiration measuring methods in dryland farm[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2011(4):1-4.
- [29] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1):18-24.
- LI Yin-kun, CHEN Min-peng, XIA Xu, et al. Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2013, 22(1):18-24.
- [30] 孙志梅, 刘艳军, 梁文举, 等. 新型脲酶抑制剂 LNS 与双氰胺配合施用对菜田土壤尿素氮转化及蔬菜生长的影响[J]. 土壤通报, 2005, 36(5):803-805.
- SUN Zhi-mei, LIU Yan-jun, LIANG Wen-ju, et al. Synergistic effect of a novel urease inhibitor LNS and a nitrification inhibitor DCD on urea-N transformation and vegetable growth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(5):803-805.
- [31] 刘瑜, 串丽敏, 安志装, 等. 硝化抑制剂双氰胺对褐土中尿素转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12):2496-2502.
- LIU Yu, CHUAN Li-min, AN Zhi-zhuang, et al. Effects of nitrification inhibitor dicyandiamide on ammonium and nitrate nitrogen transformations in cinnamon soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2496-2502.
- [32] 戴宇, 贺纪正, 沈菊培. 双氰胺在农业生态系统中的应用效果及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1):279-286.
- DAI Yu, HE Ji-zheng, SHEN Ju-peí. Effects and influence factors of dicyandiamide (DCD) application in agricultural ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1):279-286.
- [33] Tamir G, Shenker M, Heller H, et al. Can soil carbonate dissolution lead to overestimation of soil respiration? [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(4):1414-1422.
- [34] Bertrand I, Delfosse O, Mary B. Carbon and nitrogen mineralization in acidic, limed and calcareous agricultural soils: Apparent and actual effects[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(1):276-288.
- [35] 王平, 李凤民, 刘淑英. 长期施肥对土壤生物活性有机碳库的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1):224-228.
- WANG Ping, LI Feng-min, LIU Shu-ying. Effects of long-term fertilization on soil biologically active organic carbon pool[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1):224-228.
- [36] 孟延, 蔡苗, 师倩云, 等. 氮肥用量对石灰性土壤二氧化碳释放的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(4):948-954.
- MENG Yan, CAI Miao, SHI Qian-yun, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on carbon dioxide emission from calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(4):948-954.
- [37] Heimann L, Roelcke M, Hou Y, et al. Nutrients and pollutants in agricultural soils in the peri-urban region of Beijing: Status and recommendations[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 209:74-88.