

硝态氮源及碳源有效性对土壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响

周晓丽¹, 王琳¹, 张艺磊¹, 张丽娟¹, 马银丽², 巨晓棠³, 吉艳芝^{1*}

(1.河北农业大学资源与环境学院/河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071000; 2.河北香河环保产业园区, 河北 廊坊 065400; 3.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:以华北平原农田土壤为对象,通过室内静态培养系统研究 NO_3^- -N 与不同碳源组合对土壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响。结果表明, NO_3^- -N 作为氮源和不同碳源施入土壤,除 NO_3^- +纤维素,其余土壤 N_2O 排放通量均高于对照组和只添加氮源土壤; NO_3^- -N 和不同碳源组合的 CO_2 累积排放量均高于对照和只添加氮源土壤。 NO_3^- +果胶的 N_2O 排放量在第 1 d 达到最大值 $1\,383.42\,\mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$; NO_3^- +葡萄糖的 CO_2 排放量在第 1 d 达到最大值 $370.13\,\text{mg C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, CO_2 累积排放量顺序为:葡萄糖>果胶>秸秆>纤维素>淀粉>木质素。土壤 NO_3^- -N 含量与 N_2O 排放呈极显著正相关。总之,添加纤维素可以抑制 N_2O 的排放,促进 CO_2 排放,并增加土壤中 NO_3^- -N 含量,添加其余碳源均会促进土壤 N_2O 和 CO_2 排放。

关键词:华北农田土壤;硝态氮源;碳源;氧化亚氮;二氧化碳

中图分类号:X71 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2016)02-0170-06 doi: 10.13254/j.jare.2015.0206

引用格式:

周晓丽, 王琳, 张艺磊, 等. 硝态氮源及碳源有效性对土壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 170-175.

ZHOU Xiao-li, WANG Lin, ZHANG Yi-lei, et al. Effect of the Availability of Nitrate Nitrogen and Carbon Source on N_2O and CO_2 Emission from Soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2): 170-175.

Effect of the Availability of Nitrate Nitrogen and Carbon Source on N_2O and CO_2 Emission from Soil

ZHOU Xiao-li¹, WANG Lin¹, ZHANG Yi-lei¹, ZHANG Li-juan¹, MA Yin-li², JU Xiao-tang³, JI Yan-zhi^{1*}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University/Key Laboratory for Farmland Eco-environment of Hebei Province, Baoding 071000, China; 2.Environmental Protection Industry Park of Hebei Xianghe, Langfang 065400, China; 3.College of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Effects of the availability of nitrate nitrogen and different carbon sources on N_2O and CO_2 emission from soil of typical farmland in the North China were studied. The static culture systems were adopted in an indoor experiment. The results illustrated that, compared with single nitrate nitrogen fertilizer, combined different carbon sources and nitrate nitrogen fertilizer increased the emission of N_2O from soil, except for cellulose; combined different carbon sources and nitrate nitrogen fertilizer increased the accumulated emission of CO_2 from soil. The emission flux of N_2O by treatment of pectin peaked $1\,383.42\,\mu\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ on day 1. The emission flux of CO_2 by treatment of glucose peaked $370.13\,\text{mg C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ on day 1, and the accumulated emission of CO_2 order was: glucose>pectin>straw>cellulose>starch>lignin. It showed a highly significant positive correlation between the content of NO_3^- -N and emission of N_2O . Overall, combined cellulose and nitrate nitrogen fertilizer suppressed the N_2O emission, improved the CO_2 emission, and increased NO_3^- -N content; combined other carbon sources and nitrate nitrogen fertilizer promoted the N_2O and CO_2 emission.

Keywords: the North China agricultural soil; nitrate nitrogen source; carbon source; nitrous oxide; carbon dioxide

N_2O 和 CO_2 是重要的温室气体, N_2O 单分子增温潜势是 CO_2 的 298 倍, 并破坏大气平流层中的臭氧层^[1-3], 影响生态环境和人类健康。农田生态系统对大

气中 N_2O 和 CO_2 有显著的影响^[4], 土壤向大气排放的 N_2O 占全球 N_2O 排放总量的 84%^[5]。2009 年, 中国农业总计排放温室气体 158 577.3 万 t CO_2 当量, 其中, N_2O 占总排放的 52%, CO_2 占总排放的 23%^[6]。我国是农业大国, 为了提高作物产量而片面地追施化肥, 使得氮肥施用量逐年增加, 施肥显著促进农田 N_2O 及 CO_2 的排放^[7], 这不仅降低氮素利用率, 导致经济效益下降, 还成为生态环境恶化的一个重要原因^[8]。因此,

收稿日期: 2015-08-18

基金项目: 农业部“948”项目(2012-Z36); 河北省科技计划项目(14227305D)

作者简介: 周晓丽(1991—), 女, 河北邢台人, 在读硕士研究生, 主要从事环境质量评价与监控的研究。E-mail: xli_zhou@163.com

* 通信作者: 吉艳芝 E-mail: jiyanzhi@hebau.edu.cn

为了提高氮肥利用率,减少 N₂O 和 CO₂ 排放,研究土壤 N₂O 和 CO₂ 排放机制及影响因素有重要意义。

外源硝态氮的添加可促进黑土和潮土 N₂O 排放通量^[9]。李英臣等^[10]认为,随氮输入量增加,沼泽湿地土壤 N₂O 排放呈现先增加后降低的趋势,适当的氮输入促进土壤 N₂O 排放,过量的氮输入则对土壤 N₂O 排放有一定的抑制作用。黄耀等^[11]研究表明,N₂O 的排放随土壤有机碳含量的增加而减少,有机碳含量低的土壤 N₂O 排放较高。吴浩浩等^[12]研究表明,外源碳氮添加和土壤湿润程度影响着土壤中氮素转换、可溶性有机碳含量以及微生物量,进而影响土壤 N₂O 排放。张旭博等^[13]研究表明,添加秸秆类有机物料后,土壤 CO₂ 的排放速率在培养初期较高。

以往有关 N₂O 和 CO₂ 排放影响因素研究对确定减排措施具有一定的指导意义,但是 N₂O 排放具有高度的时空变异性,土壤中碳氮的生物有效性对 N₂O 和 CO₂ 排放有重要作用,且华北地区是我国重要的商品粮基地之一,粮食产量占全国总产量的 13%^[14]。因此本研究以华北平原典型农田土壤为对象,运用静态培养系统,通过 NO₃⁻-N 与 6 种不同碳源结合,探明 N₂O、CO₂ 随时间排放通量变化及土壤 NO₃⁻、NH₄⁺ 含量变化特征,研究不同碳源对 N₂O 和 CO₂ 排放量的有效性,为降低华北平原农田土壤 N₂O、CO₂ 排放提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2011 年 3—5 月在中国农业大学进行,供试材料选用中国农业大学曲周实验站长期定位试验优化处理土壤,冬小麦/夏玉米一年两熟优化管理种植体系。冬小麦季氮肥施用量为 139 kg N·hm⁻²,夏玉米季氮肥施用量为 185 kg N·hm⁻²。采取秸秆还田、优化施肥、节水灌溉。

曲周实验站位于河北省邯郸市东北部(36N, 114E),属于暖温带半干旱季风气候区,光、热、水等气候资源比较丰富,海拔 36 m,冬小麦/夏玉米一年两熟优化管理种植体系。年降水量 542.8 mm 左右,年际变化率大(23.4%),7、8 月份降水量约占全年降水量 60%,年蒸发量 1 800 mm。供试土壤为盐化潮土,表层土壤(0~20 cm)质地为轻壤土,砂粒、粉粒和粘粒含量分别为 39.34%、58.25%和 2.41%,容重 1.30 g·cm⁻³,有机碳含量为 0.95%,总氮含量为 0.07%,pH 值为 7.72,有效钾 72.7 mg·kg⁻¹,有效磷(Available P-Olsen)

34.4 mg·kg⁻¹,C/N 为 12.1。

1.2 试验设计

在设定环境因素(温度 20 ℃,容重 1.30 g·cm⁻³)条件下,采用静态培养系统进行室内模拟试验。采用硝态氮与不同碳源结合,共设 6 个碳源,分别为:葡萄糖、果胶、淀粉、纤维素、木质素、秸秆(小麦)。试验共设 8 个处理,每个处理 3 次重复,随机排列,具体施肥及水分控制情况见表 1。

表 1 试验设计

Table 1 Design of the experiment

处理	碳源	碳量 C/ g·kg ⁻¹	氮量 Ca(NO ₃) ₂ -N/ mg·kg ⁻¹	含水量 WFPS/%
CK	0	0	0	70
NO ₃ ⁻	0	0	40	70
glucose	葡萄糖	0.5	40	70
pectin	果胶	0.5	40	70
starch	淀粉	0.5	40	70
cellulose	纤维素	0.5	40	70
lignin	木质素	0.5	40	70
straw	秸秆(小麦)	0.5	40	70

将预培养土壤与不同添加物充分混匀分两次装入广口瓶,并压实至田间容重。装瓶完毕之后,继续向瓶中土层喷洒蒸馏水,调节土壤含水量为田间最大持水量的 70%,盖上 Parafilm 膜(透气不透水),将广口瓶裹上黑色塑料袋(避光),随机放置在 20 ℃的培养箱中培养 15 d。在培养期间补加蒸馏水以保持土壤含水量一致^[15]。

1.3 样品采集及测定

1.3.1 N₂O 和 CO₂ 采样与测定

在培养的 1、2、3、5、8、12、15 d 采集气体样品,采集时段为每日上午 7:30—8:00,采气前揭开 Parafilm 膜,充分通气 5 min,然后盖上橡皮塞,以此为 t₀ 时刻,用 20 mL 医用一次性注射器连续抽取 0、10、20 min 的 3 针气样,每针 20 mL,同时记录采集时间。12 h 内利用气相色谱(型号 Agilent GC6820)测定采集的气样的 N₂O、CO₂ 浓度。

1.3.2 土壤铵态氮、硝态氮测定

在试验开始、初期及试验结束,破坏性采集新鲜土壤样品,通过 2 mm 筛备用。称取过筛后的新鲜土壤 12 g,用 50 mL 1 mol·L⁻¹ 优级纯 KCl,按 1:5 土水比提取无机氮。过滤后的滤液用三通道流动分析仪(TRRACS 2000)测定溶液铵态氮和硝态氮的含量。

1.3.3 土壤 pH 值测定

在试验开始、初期及试验结束采集土壤样品,风

干并通过 1 mm 孔径筛,采用水土比为 1:1,称取风干土样 10.0 g 于 25 mL 烧杯中,加入去除 CO₂ 的蒸馏水 10 mL,搅拌 1 min,静置 30 min 后用校正的 pH 计测定悬液的 pH 值。

1.4 数据计算与统计分析^[16]

1.4.1 N₂O 通量计算公式

$$F_1 = 273 / (273 + T) \times 28 \times 60 \times 24 \times 10^{-3} \times V \times dc/dt / 22.4 / 0.465 \quad (6)$$

式中: F_1 为 N₂O 排放通量($\mu\text{g N}_2\text{O}-\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为瓶内温度;28 为每 mol N₂O 分子中 N 的质量数;22.4 为温度为 273 K 时的 N₂O 摩尔体积($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$); V 为土壤表面上方气体体积(L); c 为 N₂O 气体浓度($\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$); t 为关瓶时间(min); dc/dt 为广口瓶内 N₂O 气体浓度的时间变化率($\text{nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)。

1.4.2 CO₂ 通量计算公式

$$F_2 = 273 / (273 + T) \times 12 \times 60 \times 24 \times 10^{-3} \times V \times dc/dt / 22.4 / 0.465 \quad (7)$$

式中: F_2 为 CO₂ 排放通量($\text{mg CO}_2-\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为瓶内温度;12 为每 mol CO₂ 分子中 C 的质量数;22.4 为温度为 273 K 时的 CO₂ 摩尔体积($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$); V 为土壤表面上方气体体积(L); c 为 CO₂ 气体浓度($\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$); t 为关瓶时间(min); dc/dt 为广口瓶内 CO₂ 气体浓度的时间变化率($\text{nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)。

1.4.3 土壤 NO₃⁻、NH₄⁺ 含量计算公式

$$T = c \times (100 + 1.24 \times w) / 24$$

式中: T 为土壤 NO₃⁻、NH₄⁺ 含量($\text{mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$); c 为浸提液中 NO₃⁻、NH₄⁺ 浓度($\text{mg N} \cdot \text{L}^{-1}$); w 为土壤质量含水量。

1.4.4 统计分析

数据采用 Excel 2003、SPSS 16.0 进行方差分析和统计分析,最小显著差异法(LSD)作多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤 N₂O 排放通量

N₂O 排放通量随时间变化特征见图 1。CK 和只添加氮源土壤的 N₂O 排放量很低;NO₃⁻-N 和添加不同碳源土壤 N₂O 在培养后期还有排放,N₂O 排放持续时间较长。NO₃⁻+glu、NO₃⁻+pec 的 N₂O 排放量在第 1 d 就达到最大值,分别为 990.67、1 383.42 $\mu\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,之后迅速降低。NO₃⁻+sta 的 N₂O 排放量先降低后增加,在培养后期 N₂O 排放量最高;NO₃⁻+str 的 N₂O 排放持续时间最长,并处于较低水平,但始终高于 CK;NO₃⁻+lig 的 N₂O 排放初期相对较高,但降低速率很快,培养后期基本没有排放;NO₃⁻+cel 在培养前期低于 CK,后期高于 CK,整个培养期间 N₂O 排放量低于 CK。综上可见,添加纤维素会抑制 N₂O 排放,添加其余碳源会促进 N₂O 排放。

2.2 土壤 CO₂ 排放通量

CK 和只添加氮源土壤的 CO₂ 排放量很低,添加不同碳源土壤 CO₂ 排放量均高于 CK(图 2);NO₃⁻+glu 和 NO₃⁻+pec 的 CO₂ 排放量分别在培养第 1 d 和 2 d 就达到最大值,为 370.13、214.02 $\text{mg C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,之后逐渐降低;NO₃⁻+sta 的 CO₂ 排放量持续增加,培养后期 CO₂ 排放量相对较高;NO₃⁻+cel 的 CO₂ 排放量先增加后降低,在培养第 5 d 达到最大值,培养末期处于较高水平为 97.25 $\text{mg C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;NO₃⁻+lig 的 CO₂ 排放量一直处于低水平,在培养第 8、11 d 稍低于 CK;NO₃⁻+str 的 CO₂ 排放量先增加后降低,排放量相对较高。可见,添加碳源会促进 CO₂ 排放。

NO₃⁻和添加不同碳源的 CO₂ 累积排放通量高于 CK 与只添加氮源土壤(图 3);CO₂ 累积排放通量呈现

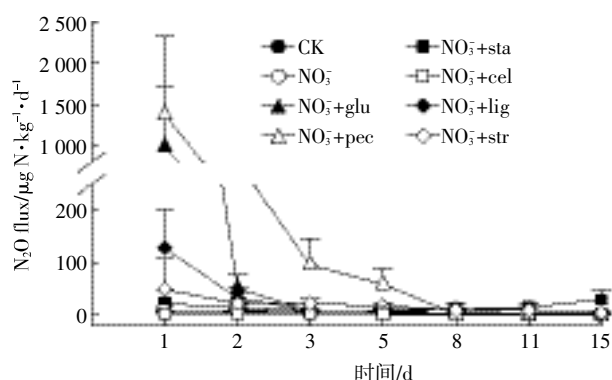


图 1 N₂O 排放通量随时间变化特征

Figure 1 Temporal variations of N₂O emission

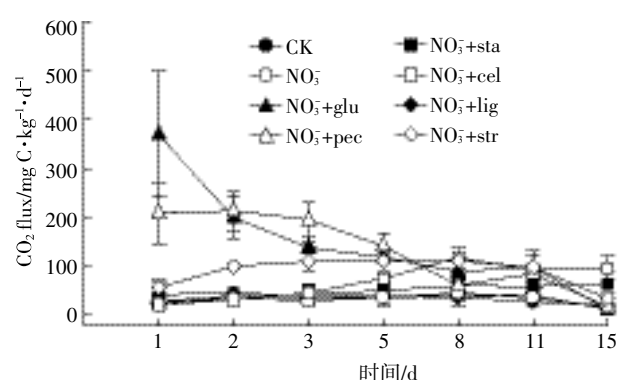


图 2 CO₂ 排放通量随时间变化特征

Figure 2 Temporal variations of CO₂ emission

出葡萄糖>果胶>秸秆>纤维素>淀粉>木质素的趋势。

2.3 土壤 NO₃⁻、NH₄⁺含量及与 N₂O 排放量相关性

培养过程中土壤 NO₃⁻含量变化如图 4 所示。可以看出,培养第 0 d,NO₃⁻和添加不同碳源土壤 NO₃⁻含量

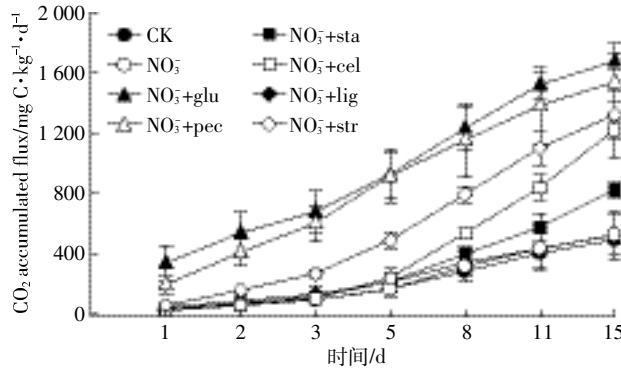


图 3 CO₂ 累积排放通量随时间变化特征

Figure 3 Temporal variations of CO₂ accumulated emission

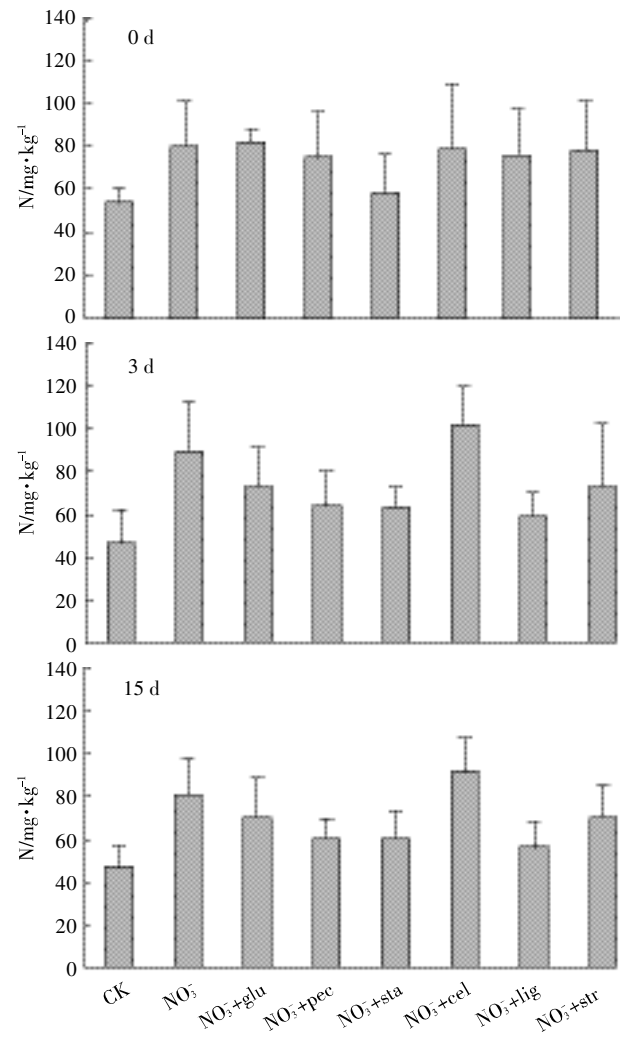


图 4 NO₃⁻含量随时间变化特征

Figure 4 Content of NO₃⁻ in cultivation

均高于 CK;CK 和 NO₃⁻+sta 的 NO₃⁻含量低于 60 mg · kg⁻¹,其余处理 NO₃⁻含量为 75~80 mg · kg⁻¹;培养第 3 d,NO₃⁻+cel 土壤的 NO₃⁻含量增加至 101.85 mg · kg⁻¹,只添加 NO₃⁻土壤的 NO₃⁻含量增加到 89.09 mg · kg⁻¹,其余处理 NO₃⁻含量逐渐降低,CK 处于最低水平;培养结束 (15 d),CK 土壤 NO₃⁻含量与第 3 d 相比没有明显变化仍处于最低水平,其余处理 NO₃⁻含量均有少量减少,单施 NO₃⁻土壤的 NO₃⁻含量低于 NO₃⁻+cel,高于其余添加不同碳源土壤。整个培养期间,NH₄⁺含量较低,在第 0 d 和第 3 d 土壤中没有检测到 NH₄⁺,仅在第 15 d 有少量 NH₄⁺。可见,与只添加氮源相比,添加纤维素增加了土壤 NO₃⁻含量,添加其余碳源减少了土壤 NO₃⁻含量。

培养初始至结束,土壤 NO₃⁻-N 含量与 N₂O 排放极显著相关;培养第 3~15 d,NH₄⁺-N 含量与 N₂O 排放显著负相关(表 2)。

表 2 NO₃⁻、NH₄⁺含量变化与 N₂O 排放量的相关性

Table 2 The correlation of NH₄⁺, NO₃⁻ and N₂O emission

培养时间/ d	NO ₃ ⁻ -N ₂ O		NH ₄ ⁺ -N ₂ O	
	公式	r	公式	r
0~3	y=46.849x-764.27	0.389	y=-56.837x-801.9	-0.022
3~15	y=-0.242 7x-33.329	0.050	y=-69.936x+58.107	-0.746*
0~15	y=131.67x-2 009.7	0.924**	y=-719.16x+410.15	-0.313

注:“**”和“*”分别表示显著水平为 0.01 和 0.05。

Note: “**” and “*” mean correlation is significant at the 0.01 and 0.05 level, respectively.

2.4 土壤 pH 值及与 N₂O、CO₂ 排放量相关性

培养初始、第 3 d 及培养结束时土壤 pH 值动态如图 5 所示。可以看出 CK 处理土壤 pH 值在培养过程中没有明显变化;NO₃⁻+sta、NO₃⁻+cel 处理的土壤 pH 逐渐升高;NO₃⁻+lig、NO₃⁻+str 处理的土壤 pH 值逐渐降低;NO₃⁻+glu、NO₃⁻+pec 处理的土壤 pH 值在培养

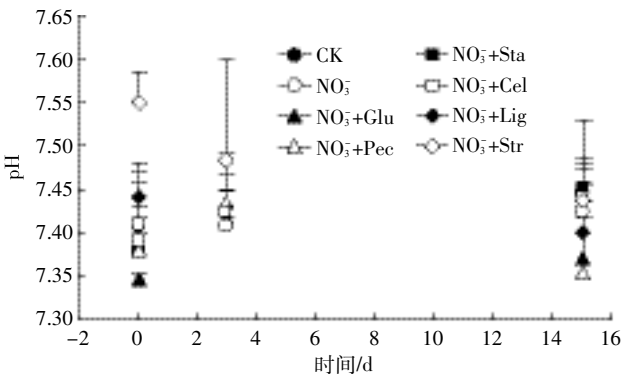


图 5 土壤 pH 值随时间的变化

Figure 5 Temporal variations of pH value for each treatment

第3 d 升高,到培养结束时降低。分析发现,土壤 pH 值变化与 N_2O 排放呈与培养初期负相关、之后正相关趋势,但相关性不显著。

3 讨论

有研究表明,限制土壤反硝化的一个重要因子是土壤可溶性有机碳的有效性,土壤微生物群体大小在很大程度上依赖于土壤有效碳含量,在土壤中反硝化微生物与其他异养微生物争夺土壤中的有效碳,因此土壤反硝化量的大小与碳含量相关^[17]。相关研究表明,添加碳源后可以促进 N_2O 的排放,而过高的 C/N 比则会降低反硝化氮损失,促进氮的生物固定^[18]。农田土壤中绿肥、有机肥的施用以及秸秆还田等都能够增加土壤碳的有效性,但对土壤 N_2O 排放的影响,则需要根据具体的土壤 C/N 和土壤环境而定^[19]。本研究以 NO_3^- 为氮源,添加 6 种不同碳源,结果表明,以纤维素为碳源时,抑制了 N_2O 的排放,促进了 CO_2 排放,因为纤维素具有不溶性的刚性结构,自然条件下分解缓慢^[20],不易被微生物利用;添加其他碳源时,促进了 N_2O 和 CO_2 排放,葡萄糖是单糖,加入葡萄糖后,土壤微生物活性增强,能促进 N_2O 和 CO_2 排放^[21];果胶是一种水溶性膳食纤维^[22],微生物容易利用;淀粉是葡萄糖的高聚体,完全水解为葡萄糖;木质素水溶性能良好,化学稳定性高^[23];秸秆还田能显著增加农田 CO_2 排放,排放总量较同氮素水平下无秸秆还田处理相比增加 18%^[24-25]。

倪玉雪等^[26]研究表明,与只添加氮源的处理相比,碳氮配施的外源添加方式均促进土壤 N_2O 、 CO_2 排放。叶丹丹等^[27]研究表明土壤无机氮含量与 N_2O 排放通量基本呈显著正相关关系。Wang 等^[28]研究表明,土壤中 NO_3^- -N 含量通过反硝化作用影响 N_2O 排放;土壤 pH 通过影响硝化和反硝化细菌活性来影响 N_2O 排放。土壤的硝化和反硝化作用都会产生 N_2O ^[29],添加硝态氮处理 N_2O 和 CO_2 排放量均高于不施氮处理,且前期排放量较高,表明添加硝态氮可促进 N_2O 和 CO_2 排放^[7]。本研究表明,添加纤维素增加了土壤 NO_3^- -N 含量,而添加其余碳源减少了土壤 NO_3^- -N 含量,这可能是由于碳源有效性、C/N 不同对土壤 NO_3^- -N 含量有不同影响^[19]。培养期间 NO_3^- -N 含量降低, NH_4^+ -N 含量略有增加,表明试验过程中发生反硝化作用,促进氮素转化。试验过程中, N_2O 排放表现出与土壤 pH 相关性不显著,可能是因为土壤 pH 变化不大,不足以影响 N_2O 排放。

4 结论

(1)以纤维素为碳源与硝态氮配施抑制了土壤 N_2O 排放,促进了 CO_2 排放;添加其他碳源可明显促进 N_2O 和 CO_2 排放; CO_2 累积排放量顺序为:葡萄糖>果胶>秸秆>纤维素>淀粉>木质素。

(2)与其他碳源相比,添加纤维素增加了土壤中 NO_3^- -N 含量。

(3)土壤 NO_3^- -N 含量与 N_2O 排放量呈极显著正相关,土壤 pH 值与 N_2O 排放相关性不显著。

参考文献:

- [1] Dalal R, Allen D, Livesley S, et al. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: A review[J]. *Plant Soil*, 2008, 309(1e2): 43-76.
- [2] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. *Science*, 2009, 326: 123-125.
- [3] Townsend A R, Howarth R W. Fixing the global nitrogen problem[J]. *Scientific American*, 2010, 302: 64-71.
- [4] Snyder C S, Bruulsema T W, Jensen T L, et al. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions[J]. *Environment Pollution*, 2007, 150(1): 107-124.
- [5] Smith Pete, Martino Daniel, Cai Zucong, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London. Series B, Biological Science*, 2008, 363(1492): 789-813.
- [6] 谭秋成. 中国农业温室气体排放: 现状及挑战[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(10): 69-75.
- TAN Qiu-cheng. Greenhouse gas emissions in China's agricultural: Situation and challenge[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(10): 69-75. (in Chinese)
- [7] 李晓密, 伦小秀, 陈琪, 等. 不同施肥处理下冬小麦-夏玉米轮作农田温室气体的排放[J]. *环境化学*, 2014, 33(4): 591-596.
- LI Xiao-mi, LUN Xiao-xiu, CHEN Qi, et al. Greenhouse gas emission from a winter wheat summer maize crop rotation farmland under different fertilization treatments[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(4): 591-596. (in Chinese)
- [8] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *PNAS*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [9] 陈思, 张克强, 麻晓越, 等. 外源硝态氮对典型耕作土壤冻结过程 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学研究*, 2014(6): 635-641.
- CHEN Si, ZHANG Ke-qiang, MA Xiao-yue, et al. Effect of nitrate nitrogen application on N_2O emission from three types of soil during freezing process[J]. *Research of Environmental Science*, 2014(6): 635-641. (in Chinese)
- [10] 李英臣, 宋长春, 侯翠翠, 等. 外源氮输入影响下沼泽化草甸湿地土壤有机碳矿化和 N_2O 排放动态研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 140-147.

- LI Ying-chen, SONG Chang-chun, HOU Cui-cui, et al. Dynamics of N₂O emission and carbon mineralization to exogenous nitrogen input in meadow marsh soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4):140-147.(in Chinese)
- [11] 黄 耀, 焦 燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田 N₂O 排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(5):598-602.
HUANG Yao, JIAO Yan, ZONG Liang-gang, et al. N₂O emission from wheat cultivated soils as influenced by soil physicochemical properties[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5):598-602.(in Chinese)
- [12] 吴浩浩, 徐星凯, 李团胜, 等. 碳氮添加对不同湿润程度的温带森林土壤氧化亚氮排放影响[J]. 科学通报, 2014, 59(14):1337-1347.
WU Hao-hao, XU Xing-kai, LI Tuan-sheng, et al. Effect of carbon and nitrogen addition on nitrous oxide flux from temperate forest soils under different wetting intensity conditions[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(14):1337-1347.(in Chinese)
- [13] 张旭博, 徐明岗, 张文菊, 等. 添加有机物料后红壤 CO₂ 释放特征与微生物生物量动态[J]. 中国农业科学, 2011, 44(24):5013-5020.
ZHANG Xu-bo, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, et al. Characteristics of CO₂ emission and microbial biomass dynamics after adding various organic materials in red soil[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2011, 44(24):5013-5020.(in Chinese)
- [14] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
Nation Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistic Press, 2014.(in Chinese)
- [15] 王 琳, 周晓丽, 马银丽, 等. 铵态氮源及碳源有效性对土壤 N₂O、CO₂ 排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(1).
WANG Lin, ZHOU Xiao-li, MA Yin-li, et al. Effect of ammonium nitrogen source and carbon source on the CO₂ and N₂O emissions of soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, (Accepted).(in Chinese)
- [16] 马银丽. 华北平原典型农田土壤 N₂O 产生机理及影响因素研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
MA Yin-li. Study on mechanism and factors of nitrous oxides in North China plain[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012.(in Chinese)
- [17] R Katz, J Hagin, L T Kurtz. Participation of soluble and oxidizable soil organic compounds in denitrification[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1985, 19(4):209-213.
- [18] 王改玲, 陈德立, 李 勇. 土壤温度、水分和 NH₄⁺-N 浓度对土壤硝化反应速度及 N₂O 排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):1-6.
WANG Gai-ling, CHEN De-li, LI Yong. Effect of soil temperature, moisture and NH₄⁺-N concentration on nitrification and nitrification-induced N₂O emission[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1):1-6.(in Chinese)
- [19] Granli T, Bockman O C. Nitrous oxide from agriculture[J]. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*, 1994(12):1-128.
- [20] 文少白, 李勤奋, 侯宪文. 微生物降解纤维素的研究概况[J]. 中国农学通报, 2010, 26(1):231-236.
WEN Shao-bai, LI Qin-fen, HOU Xian-wen. Recent advances in microbial degradation of cellulose[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(1):231-236.(in Chinese)
- [21] 王海飞, 贾兴永, 高 兵, 等. 不同土地利用方式土壤温室气体排放对碳氮添加的响应[J]. 土壤学报, 2013, 50(6):1172-1181.
WANG Hai-fei, JIA Xing-yong, GAO Bing, et al. Response of greenhouse gas emission to application of carbon and nitrogen in different soils in land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6):1172-1181.(in Chinese)
- [22] 田宝明, 彭 林, 吴金松, 等. 柚皮果胶理化性质的研究[J]. 食品工业科技, 2014(8):313-317, 363.
TIAN Bao-ming, PENG Lin, WU Jin-song, et al. Study on physico-chemical properties of pomelo peel pectin[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014(8):313-317, 363.(in Chinese)
- [23] 路 瑶, 魏贤勇, 宗志敏. 木质素的结构研究与应用[J]. 化学进展, 2013, 25(5):838-858.
LU Yao, WEI Xian-yong, ZONG Zhi-min, et al. Structural investigation and application of lignins[J]. *Progress in Chemistry*, 2013, 25(5):838-858.(in Chinese)
- [24] 李昌珍, 张婷婷, 冯永忠, 等. 不同轮作方式和秸秆还田对麦田土壤 CO₂ 排放与水热碳氮状况和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6):190-197.
LI Chang-zhen, ZHANG Ting-ting, FENG Yong-zhong, et al. Effects of different rotation modes and straw returning on soil CO₂ emission fluxes and moisture, heat, carbon and nitrogen conditions in wheat field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(6):190-197.(in Chinese)
- [25] 李英臣, 侯翠翠, 李 勇, 等. 免耕和秸秆覆盖对农田土壤温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6):1076-1083.
LI Ying-chen, HOU Cui-cui, LI Yong, et al. Effects of no-till and straw mulch on greenhouse gas emission from farmland: A review[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2014, 23(6):1076-1083.(in Chinese)
- [26] 倪玉雪, 孙卓玲, 尹 兴, 等. 外加可溶性碳源对华北典型农田土壤 N₂O、CO₂ 排放的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4):222-227.
NI Yu-xue, SUN Zhuo-ling, YIN Xing, et al. Influence of soluble carbon on N₂O and CO₂ emission from soil of typical farm-land in North China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4):222-227.(in Chinese)
- [27] 叶丹丹, 谢立勇, 郭李萍, 等. 华北平原典型农田 CO₂ 和 N₂O 排放通量及其与土壤养分动态和施肥的关系[J]. 中国土壤与肥料, 2011(3):15-20.
YE Dan-dan, XIE Li-yong, GUO Li-ping, et al. The emission-flux of CO₂ and N₂O and its relationship with soil nutrient dynamic and fertilization in typical upland fields in North China plain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(3):15-20.(in Chinese)
- [28] Wang Lianfeng, Du Huachao, Han Zuoqiang, et al. Nitrous oxide emissions from black soils with different pH[J]. *Environmental Sciences*, 2013, 25(6):1071-1076.
- [29] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 等. 农田土壤硝化-反硝化作用与 N₂O 的排放[J]. 土壤与环境, 2001, 10(4):273-276.
ZOU Guo-yuan, ZHANG Fu-suo, CHEN Xin-ping, et al. Nitrification-denitrification and N₂O emission from arable soil[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(4):273-276.(in Chinese)