

铵态氮源和碳源对土壤 N_2O 、 CO_2 释放的影响

王琳¹, 周晓丽¹, 马银丽², 巨晓棠³, 吉艳芝¹, 张丽娟^{1*}

(1.河北农业大学资源与环境科学学院, 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科学学院, 北京 100193)

摘要:在田间持水量 WFPS 为 70%、温度为 20 °C 的条件下,通过室内静态培养方法研究铵态氮源与不同碳源结合,对华北平原典型小麦-玉米轮作体系土壤 N_2O 、 CO_2 释放的影响。其中,碳源种类分别为葡萄糖、果胶、淀粉、纤维素、木质素和秸秆。结果表明添加葡萄糖和果胶有效促进了土壤 N_2O 的释放,并在第 1 d 达到最大值,分别为 $4\,039.85\,\mu\text{g}\,\text{N}_2\text{O}-\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $2\,533.44\,\mu\text{g}\,\text{N}_2\text{O}-\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$;添加纤维素和只施秸秆处理降低了 N_2O 释放。施入碳源增加了 CO_2 释放,顺序为纤维素>淀粉>葡萄糖>果胶>秸秆>木质素。培养结束后土壤中铵态氮几乎消耗完全,除添加葡萄糖处理外,其他施碳土壤的硝态氮含量均有所增加。在培养前 3 d,土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 总含量与 N_2O 释放量显著相关。

关键词:华北地区;铵态氮源;碳源; N_2O ; CO_2

中图分类号:S153.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)01-0023-06

doi: 10.13254/j.jare.2015.0181

引用格式:

王琳,周晓丽,马银丽,等.铵态氮源和碳源对土壤 N_2O 、 CO_2 释放的影响[J].农业资源与环境学报,2016,33(1):23-28.

WANG Lin, ZHOU Xiao-li, MA Yin-li, et al. Effect of Ammonium Nitrogen Source and Carbon Source on the CO_2 and N_2O Emissions of Soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(1): 23-28.

Effect of Ammonium Nitrogen Source and Carbon Source on the CO_2 and N_2O Emissions of Soil

WANG Lin¹, ZHOU Xiao-li¹, MA Yin-li², JU Xiao-tang³, JI Yan-zhi¹, ZHANG Li-juan^{1*}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2.Environmental Industrial Park of Xianghe, Langfang 065400, China; 3.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To study the effect of ammonium nitrogen source combined with different carbon sources, which included glucose, pectin, starch, cellulose, lignin and straw, on N_2O and CO_2 emissions of soil in the typical wheat-maize rotation system in typical North China plain, the experiment was carried out through the static incubation-gas chromatograph method, with the WFPS of 70% and the temperature of 20 °C. The results showed that the addition of glucose and pectin could effectively promote N_2O emissions, with the peak values of $4\,039.85\,\mu\text{g}\,\text{N}_2\text{O}-\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ and $2\,533.44\,\mu\text{g}\,\text{N}_2\text{O}-\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ on the first day, respectively; while the cellulose and straw reduced N_2O emissions. The carbon source increased CO_2 emissions, the order was cellulose>starch>glucose>pectin>straw>lignin. The ammonium nitrogen in soil was almost completely consumed after the incubation. Except the addition of glucose, the nitrate nitrogen contents of the soil added the other carbon sources were increased. In the first 3 days of the incubation, the total contents of NH_4^+ and NO_3^- in soil were significantly correlated with N_2O emissions.

Keywords: North China; ammonium nitrogen source; carbon source; N_2O ; CO_2

大气中氧化亚氮(N_2O)、二氧化碳(CO_2)等温室气体浓度的不断增加,是近 50 年来气候变化的主要

原因;其中 N_2O 不仅能导致气候变暖,还会间接破坏臭氧层,影响生态环境和人类健康^[1-2]。有研究表明,农业生产活动所产生的 CO_2 和 N_2O 分别占全球人为温室气体排放的 11% 和 60%^[3]。

农田土壤 N_2O 和 CO_2 主要产生于土壤微生物作用,并且受土壤性质和农业管理措施的影响^[1,4],主要包括土壤温度、水分、质地、pH 值、耕作与施肥等^[5-11]。

收稿日期:2015-07-27

基金项目:农业部“948”项目(2012-Z36);国家自然科学基金项目(40771098);河北教育厅项目(Q2012130)

作者简介:王琳(1992—),女,河北保定人,硕士研究生,从事土壤环境质量评价与监测研究。E-mail: wlandxf@126.com

*通信作者:张丽娟 E-mail: lj-zh2001@163.com

Morley 等^[12]研究表明,绝大多数异养微生物以土壤有机质作为碳源和电子供体,因此土壤有机质是调控 N₂O 排放的重要因子,并且为土壤呼吸作用提供基质。目前,很多研究针对于碳源添加及不同碳氮比对 N₂O、CO₂ 排放的影响^[13-14],而关于碳源种类的影响涉及较少。我国北方农田土壤 N₂O 产生的主要途径为硝化作用^[15],因此将铵态氮肥与碳源结合,对研究氮肥的转化规律及有效利用具有重要意义。

华北平原是我国主要粮食产区之一,主要的种植方式为冬小麦-夏玉米轮作体系。本试验以华北平原典型农田土壤为研究对象,运用静态培养系统,通过设置铵态氮源与不同碳源结合的处理,研究土壤 N₂O、CO₂ 的释放特征,以探明华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系下 N₂O、CO₂ 释放对不同碳源种类添加的响应,为制定华北地区土壤温室气体减排措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料选用中国农业大学曲周试验站长期定位试验土壤,在冬小麦-夏玉米优化管理种植体系,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,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(36°N, 114°E),属于暖温带半干旱季风气候,光、热、水等气候资源比较丰富,海拔 36 m,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)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,pH 值 7.72,有机碳含量 9.5 g·kg⁻¹,总氮含量 700 mg·kg⁻¹,C/N 为 12.1,有效磷 34.4 mg·kg⁻¹,有效钾 72.7 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验开始于 2011 年 6 月 21 日,采用室内静态培养系统。以硫酸铵作为氮源,与 6 种不同碳源结合(表 1),每个处理 3 次重复。根据试验处理将添加物与土壤充分混匀,按重量计算分 2 次装入带胶塞的广口瓶中,均匀压实至大田实际容重(1.30 g·cm⁻³)。用注射器喷洒去离子水使土壤水分达到 70% WFPS。盖上 Parafilm 膜,将广口瓶裹上黑色塑料袋,随机放置在 20 °C 的培养箱中培养 15 d。培养期间根据重量调节

表 1 试验设计

Table 1 Design of experiment

处理 Treatment	碳源 Carbon source	碳量/g·kg ⁻¹ Amount of carbon	氮量/g·kg ⁻¹ Amount of nitrogen	含水量 WFPS/%
CK	0	0	0	70
NH ₄ ⁺	0	0	40	70
NH ₄ ⁺ +Glucose	葡萄糖	0.5	40	70
NH ₄ ⁺ +Pectin	果胶	0.5	40	70
NH ₄ ⁺ +Starch	淀粉	0.5	80	70
NH ₄ ⁺ +Cellulose	纤维素	0.5	40	70
NH ₄ ⁺ +Lignin	木质素	0.5	40	70
Straw	秸秆(小麦)	0.5	0	70

水分含量在 70% WFPS。

1.3 气体样品采集与测定

在培养后的 1、2、3、5、8、11、15 d 采集气样样品,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,然后盖上连有三通阀的橡胶塞,以此为 T₀ 时刻,用 20 mL 一次性注射器连续抽取 0~10~20 min 的气样,同时记录时间和温度。采集的气样 12 h 内利用气相色谱(Agilent GC6820)测定 N₂O、CO₂^[16]。

1.4 土壤样品采集与测定

在试验开始的 0、3 d 和 15 d,分别破坏性采集新鲜土壤样品,通过 5 mm 筛备用。

土壤硝态氮、铵态氮测定:称取过筛后的新鲜土壤 12.00 g,用 50 mL 1 mol·L⁻¹ 优级纯 KCl 按 1:5 土水比提取无机氮。滤液用三通道流动分析仪(TRRACS 2000)测定铵态氮和硝态氮的含量。

pH 值测定:将土样风干并通过 1 mm 孔径筛,称取 10.0 g 于 25 mL 烧杯中,加入除 CO₂ 的蒸馏水 10 mL,搅拌 1 min 使土粒充分分散,静置 30 min 后用校正后的 pH 计测定。

1.5 数据计算与统计分析

气体通量计算公式^[16]为:

$$F = 273 / (273 + T) \times m \times 60 \times 24 \times 10^{-3} \times V \times dc/dt / 22.4 / 0.46567$$

式中: F 为 N₂O($\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)或 CO₂($\text{mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)释放通量; T 为瓶内温度; m 为每 mol N₂O 分子中 N 的质量数或每 mol CO₂ 分子中 C 的质量数; V 为土壤表面上方气体体积(L); c 为气体浓度($\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}$); T 为相对时间(min); dc/dt 为广口瓶内气体浓度的时间变化率($\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$); 22.4 为温度 273 K 时的气体的摩尔体积($\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$)。

土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 含量计算公式^[6]为:

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

式中: T 为土壤 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 含量(mgN·kg⁻¹); c 为浸提液中 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 浓度(mgN·L⁻¹); w 为土壤质量含水量。

数据处理采用 Excel 2003 软件进行数据的方差分析、统计分析,应用 SPSS16.0 软件进行单因素方差分析,用最小显著差异法(LSD)做多重比较,用 SigmaPlot 10.0 和 Excel 2003 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 土壤 N₂O 释放通量

培养期间 N₂O 释放通量随时间变化特征如图 1 所示,可以看出,对照几乎没有 N₂O 释放,单施 NH₄⁺土壤 N₂O 释放量较低但高于对照;除 NH₄⁺+Cellulose 和 Straw 外,其他施碳处理 N₂O 释放量均高于单施 NH₄⁺处理。几乎所有处理 N₂O 释放量均在培养第 1 d 时达到最大值,而秸秆的添加延缓了 N₂O 的出峰时间。NH₄⁺+Glucose 和 NH₄⁺+Pectin 的 N₂O 释放量在第 1 d 时显著高于其他处理,分别为 4 039.85、2 533.43 μg N·kg⁻¹·d⁻¹,其原因可能是葡萄糖和果胶为简单的碳氢氧化物,比其他碳源易被土壤中的微生物分解利用。大田中施用氮肥的基础上,秸秆还田会增加 N₂O 释放量,本试验中秸秆处理未施入氮肥,其 N₂O 释放量与对照处理接近。NH₄⁺+Starch 处理的氮肥用量为 80 mg·kg⁻¹,在培养后期仍有少量 N₂O 释放,可能是由于 C/N 比影响微生物的矿化和固持。

2.2 土壤 CO₂ 释放通量

CO₂ 释放通量随时间变化特征见图 2。对照处理几乎无 CO₂ 释放,只施 NH₄⁺的土壤 CO₂ 释放量很低;其次为 Straw 和 NH₄⁺+Lignin, CO₂ 释放量无明显变化,

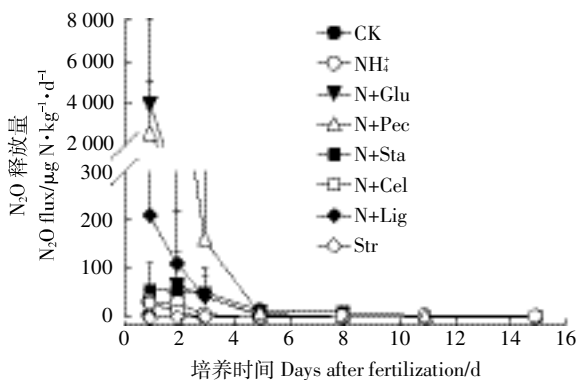


图 1 N₂O 释放通量随时间变化特征

Figure 1 Temporal variation of N₂O emission

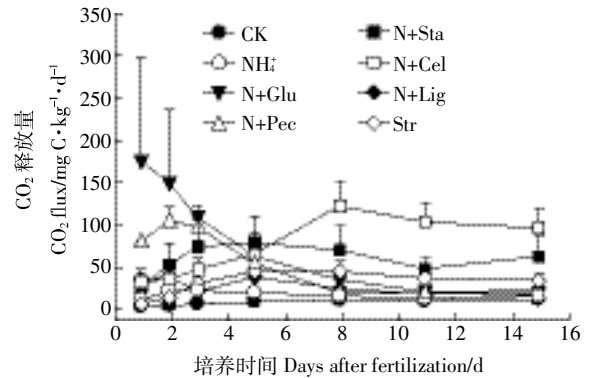


图 2 CO₂ 释放通量随时间变化特征

Figure 2 Temporal variation of CO₂ emission

分别处于 30~45 mg C·kg⁻¹·d⁻¹ 和 20~40 mg C·kg⁻¹·d⁻¹ 范围内;NH₄⁺+Starch 的 CO₂ 释放通量随培养时间先升高后降低,释放高峰为 79.31 mg C·kg⁻¹·d⁻¹;NH₄⁺+Glucose 和 NH₄⁺+Pectin 的 CO₂ 释放量分别在培养第 1 d 和第 2 d 时达到最大值,之后逐渐降低;NH₄⁺+Cellulose 的 CO₂ 释放通量随培养时间逐渐增加,在第 8 d 达到高峰,高于其他处理且后期释放水平较高。

图 3 为 CO₂ 累积释放量随时间变化特征。添加碳源后 CO₂ 累积释放量高于单施 NH₄⁺,顺序为:纤维素>淀粉>葡萄糖>果胶>秸秆>木质素。综合分析表明,添加碳源增加了土壤 CO₂ 释放,其中纤维素和淀粉易被微生物利用。

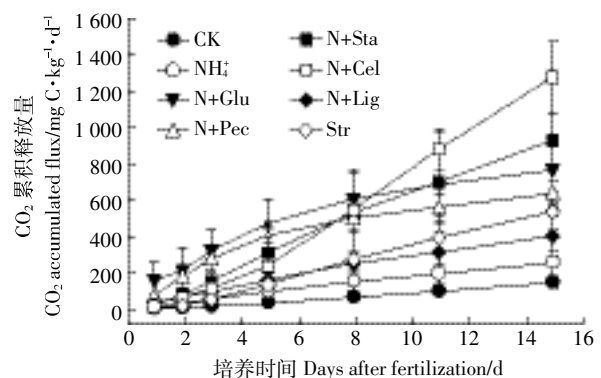
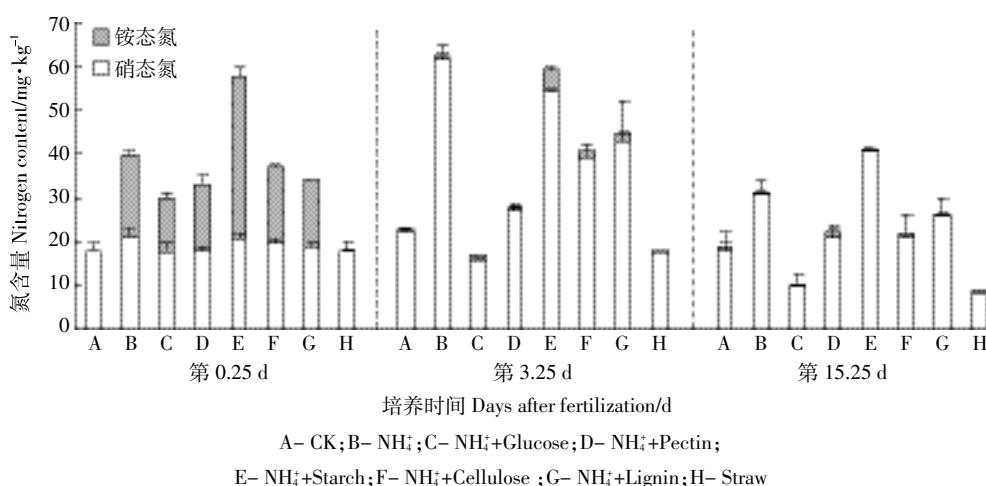


图 3 CO₂ 累积释放通量随时间变化特征

Figure 3 Temporal variation of CO₂ accumulated emission

2.3 土壤 NO₃⁻、NH₄⁺ 含量变化

培养期间土壤 NO₃⁻、NH₄⁺ 含量随时间变化特征如图 4 所示,可以看出,在培养结束后,对照和添加秸秆的土壤中存在少量 NH₄⁺,表明培养期间发生了反硝化作用。添加 NH₄⁺的各处理在培养初期(第 1~3 d)NH₄⁺ 含量明显降低,表明土壤中发生硝化作用使 NH₄⁺ 转化为 NO₃⁻,同时释放 N₂O;其中,只添加 NH₄⁺ 的土壤

图 4 NO_3^- 、 NH_4^+ 含量随时间变化特征Figure 4 Content of NO_3^- , NH_4^+ in cultivation

NO_3^- 含量增加的最多,表明添加碳源后有利于土壤微生物对氮源的固持和利用; NH_4^+ +Glucose 的土壤 NO_3^- 含量稍许降低,可能是由于添加葡萄糖明显促进了微生物的生长和活性,使得生成的 NO_3^- 继续参与到反应过程中,并释放出大量的 N_2O 和 CO_2 。在培养后期(第 4~15 d)添加 NH_4^+ 的各处理 NH_4^+ 含量几乎消耗完全,除 NH_4^+ +Glucose 外,培养结束后其他处理的 NO_3^- 含量均有所增加。整个培养期间,各处理土壤 NO_3^- 和 NH_4^+ 总量均有所降低。

2.4 NH_4^+ 、 NO_3^- 含量与 N_2O 释放量的相关性

在整个培养期间, NH_4^+ 、 NO_3^- 含量与 N_2O 释放不具有相关性,在培养的第 0~3 d,土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 总含量变化与 N_2O 释放呈显著正相关(表 2)。

3 讨论

可溶性碳的添加能刺激土壤微生物的呼吸作用,加快土壤氧的消耗^[17]。芦思佳等^[18]研究表明,水溶性有机碳与土壤累积呼吸量之间呈显著正相关,水溶性有机碳微小的变化能够引起累积呼吸量的明显变化。张玉铭等^[19]也指出,有机肥的施用能显著增加土壤呼吸

排放的 CO_2 。在本试验中, CO_2 表现出相似的趋势,即添加碳源土壤的 CO_2 释放高于未添加碳源处理,表明碳源的添加促进了土壤 CO_2 释放。

从研究结果中可以看出,铵态氮肥分别与葡萄糖、果胶、淀粉、木质素同时施入土壤中后,不同程度的增加了土壤 N_2O 释放通量。朱霞等^[17]研究表明,可溶性碳的添加能间接增强了土壤生物反硝化作用,从而促进土壤 N_2O 排放。Burford 等^[20]发现反硝化速率与水溶性碳量呈极显著相关,土壤中水溶性碳含量越多,反硝化速率越快,土壤 N_2O 排放量也会大大增加。续勇波等^[21]研究表明,易矿化的有机碳含量高,反硝化过程中 N_2O 排放速率增大, N_2O 被进一步还原的速率变小, N_2O 总排放量增大。

铵态氮肥进入土壤,水解后为微生物硝化过程提供底物,而硝化作用的产物 NO_3^- 反过来又可以直接参与反硝化过程。本试验培养过程中,土壤中 NO_3^- 含量先增加,而后有所降低,表明土壤 NO_3^- 参与到了氮素的转化过程中,硝化和反硝化作用是共同进行的。Dendooven 等^[22]研究结果表明,盐碱土添加葡萄糖和氮肥后, NO_3^- 含量下降,这可能是由于氮的固定、硝化

表 2 土壤 NH_4^+ 、 NO_3^- 含量与 N_2O 释放量的相关性Table 2 The correlation of soil nitrogen content and N_2O emission

培养时间 Day/d	NO_3^- - N_2O			NH_4^+ - N_2O			$(\text{NO}_3^-+\text{NH}_4^+)$ - N_2O		
	公式 Formula	R^2		公式 Formula	R^2		公式 Formula	R^2	
0~3.25	$y=48.197x-1\ 614.1$	0.508		$y=-1.651\ 8x-846.28$	-0.011		$y=104.6x-1\ 154.9$	0.737*	
0~15.25	$y=62.899x-1\ 049.1$	0.387		$y=-3.973\ 3x-917.14$	-0.030		$y=125.22x+495.75$	0.520	
3.25~15.25	$y=-2.173\ 1x-66.005$	-0.351		$y=-0.233\ 4x-37.595$	-0.007		$y=-1.939\ 3x-64.55$	-0.332	

注:“*”表示显著水平为 0.05。

Note: “*” means correlation is significant at the 0.05 level.

反硝化作用造成的。栗方亮等^[23]也指出,常规硫酸铵用量添加葡萄糖后,土壤中 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 含量降低,微生物碳、氮量增加。外加可溶性碳源除促进 N₂O、CO₂ 排放外,还会明显减少土壤中 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 含量^[24]。从本试验整个培养期来看,各处理土壤 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 总量均有所降低。

不同碳源种类对于 N₂O 和 CO₂ 释放的影响有所差异。葡萄糖有效促进了 N₂O 释放,释放量居于所有碳源的首位;可能是由于葡萄糖是一种较为简单的有机物,容易被土壤中微生物分解利用。众多研究表明,葡萄糖作为一种常见碳源,在不同农田类型、林地和污水生物处理过程中,均能增加 N₂O 排放^[23-26]。果胶作为碳源添加到土壤后,其土壤 N₂O 释放量也很高。果胶是一种酸性多糖,具有可溶性,易被微生物利用,从而有效促进微生物反应,增加了 N₂O 释放^[27]。淀粉是葡萄糖的高聚体,完全水解为葡萄糖,在污水生物处理过程中,添加淀粉可促进 N₂O 排放,但 N₂O 转化率低于葡萄糖^[26];本试验中淀粉虽增加了 N₂O 释放,但效果不明显。关于秸秆对于农田 N₂O 释放的影响目前没有定论:一方面秸秆应用到大田后,供碳量增加,促进反硝化作用产生 N₂O 释放;另一方面,秸秆在分解过程中产生苯甲酸和对叔丁基苯甲酸等化感物质,会抑制硝化作用,减少 N₂O 排放^[28]。本试验在未施氮肥的基础上添加秸秆,增加了土壤 C/N 比,降低了土壤 N₂O 释放。

4 结论

NH₄⁺ 与不同碳源同时施入华北石灰性土壤,葡萄糖有效促进了 N₂O 释放,其释放量居于所有碳源的首位,果胶次之;添加纤维素和只施秸秆降低了 N₂O 释放。施入碳源增加了 CO₂ 释放,顺序为:纤维素>淀粉>葡萄糖>果胶>秸秆>木质素。培养的 0~3 d,土壤 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 总含量与 N₂O 释放量显著相关。

参考文献:

- [1] Snyder C S, Bruulsema T W, Jensen T L, et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 133(3-4): 247-266.
- [2] Townsend A R, Howarth R W. Fixing the global nitrogen problem[J]. *Scientific American*, 2010, 302: 64-71.
- [3] IPCC. Climate change 2007: Synthesis report[R]. Geneva, Switzerland: Fourth assessment report of the first, second and third report of the IPCC, 2007.
- [4] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. *环境科学*, 2014, 35(2): 792-800.
ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-rong, et al. Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 792-800. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 齐玉春, 郭树芳, 董云社, 等. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(9): 1764-1773.
QI Yu-chun, GUO Shu-fang, DONG Yun-she, et al. Advances in research on the effects of irrigation on the greenhouse gases emission and soil carbon sequestration in agro-ecosystem[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(9): 1764-1773. (in Chinese)
- [7] Giovanbattista Domenico de Dato, Paolo De Angelis, Costantino Sirca, et al. Impact of drought and increasing temperatures on soil CO₂ emissions in a Mediterranean shrubland (gariga)[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327: 153-166.
- [8] Case S D C, McNamara N P, Reay D S, et al. The effect of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from a sandy loam soil-The role of soil aeration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 51: 125-134.
- [9] 孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤 N₂O 的产生机制及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1524-1530.
SUN Zhi-qiang, HAO Qing-ju, JIANG Chang-sheng, et al. Advances in the study of nitrous oxide production mechanism and its influencing factors in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(6): 1524-1530. (in Chinese)
- [10] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of Earth's nitrogen cycle[J]. *Science*, 2010, 330(6001): 192-196.
- [11] YAO Zhi-sheng, ZHENG Xun-hua, DONG Hai-bo, et al. A 3-year record of N₂O and CH₄ emissions from a sandy loam paddy during rice seasons as affected by different nitrogen application rates[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 152: 1-9.
- [12] Morley N, Baggs E M. Carbon and oxygen controls on N₂O and N₂ production during nitrate reduction[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1864-1871.
- [13] 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): 1170-1179.
WANG Hai-fei, JIA Xing-yong, GAO Bing, et al. Response of greenhouse gas emission to application of carbon and nitrogen in soil different in land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6): 1170-1179. (in Chinese)
- [14] YANG Guang-rong, HAO Xi-ying, LI Chun-li, et al. Effects of greenhouse intensive cultivation and organic amendments on greenhouse gas emission according to a soil incubation study[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(1): 89-103.
- [15] Ju X T, Lu X, Gao Z L, et al. Processes and factors controlling N₂O pro-

- duction in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159: 1007-1016.
- [16] 马银丽. 华北平原典型农田土壤 N_2O 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: Agricultural University of Hebei, 2012. (in Chinese)
- [17] 朱 霞, 韩晓增, 乔云发, 等. 外加可溶性碳氮对不同热量带土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2637-2644.
- ZHU Xia, HAN Xiao-zeng, QIAO Yun-fa, et al. Influence of soluble carbon and nitrogen on N_2O emission from different thermal zones soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2637-2644. (in Chinese)
- [18] 芦思佳, 韩晓增. 施肥对土壤呼吸的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(3): 366-370.
- LU Si-jia, HAN Xiao-zeng. The effect of fertilization on soil respiration[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2011, 27(3): 366-370. (in Chinese)
- [19] 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 Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, 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. (in Chinese)
- [20] Burford J R, Bremner J M. Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, 7: 389-394.
- [21] 续勇波, 蔡祖聪. 亚热带土壤氮素反硝化过程中 N_2O 的排放和还原[J]. 环境科学学报, 2008, 28(4): 731-737.
- XU Yong-bo, CAI Zu-cong. Nitrous oxide emission and reduction during denitrification in subtropical soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(4): 731-737. (in Chinese)
- [22] Dendooven L, Alcántara-Hernández R J, Valenzuela-Encinas C, et al. Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(6): 865-877.
- [23] 栗方亮, 李忠佩, 刘 明, 等. 添加葡萄糖及硫酸铵对水稻土微生物生物量和功能多样性的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(11): 2199-2208.
- LI Fang-liang, LI Zhong-pei, LIU Ming, et al. Effects of glucose and ammonium sulfate addition on paddy soil microbial biomass and functional diversity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(11): 2199-2208. (in Chinese)
- [24] 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 N_2O 、 CO_2 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 N_2O and CO_2 emissions from soil of typical farm-land in North China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4): 222-227. (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] 赵聪聪, 张 建, 胡 振, 等. 碳源类型对污水生物处理过程中氧化亚氮释放的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2354-2360.
- ZHAO Cong-cong, ZHANG Jian, HU Zhen, et al. Effect of carbon source types on nitrous oxide emission during wastewater treatment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2354-2360. (in Chinese)
- [27] 张学杰, 郭 科, 苏艳玲. 果胶研究新进展[J]. 中国食品学报, 2010, 10(1): 167-174.
- ZHANG Xue-jie, GUO Ke, SU Yan-ling. A review on the recent advance in pectin research[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2010, 10(1): 167-174. (in Chinese)
- [28] 黄益宗, 张福珠, 刘淑琴, 等. 化感物质对土壤 N_2O 释放影响的研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(5): 478-482.
- HUANG Yi-zong, ZHANG Fu-zhu, LIU Shu-qin, et al. Effect of allelochemicals on N_2O emission from soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(5): 478-482. (in Chinese)