

DOI: 10.5846/stxb201412292597

李豫婷, 林树基, 韩雪, 冯永祥, 林而达, 李迎春, 陈曦. CO<sub>2</sub> 浓度升高与硝化抑制剂对冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 排放量的影响. 生态学报, 2016, 36(15):

Li Y T, Lam Shu Kee, Han X, Feng Y X, Lin E D, Li Y C, Chen X. Effects of Elevated CO<sub>2</sub> and Nitrification Inhibitors on N<sub>2</sub>O Emissions from a winter wheat cropping system. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15):

# CO<sub>2</sub> 浓度升高与硝化抑制剂对冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 排放量的影响

李豫婷<sup>1,2</sup>, 林树基<sup>3</sup>, 韩雪<sup>1,\*</sup>, 冯永祥<sup>1,2</sup>, 林而达<sup>1</sup>, 李迎春<sup>1</sup>, 陈曦<sup>4</sup>

1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境重点实验室, 北京 100081

2 黑龙江八一农垦大学农学院农学院, 大庆 163000

3 Crop and Soil Science Section, Faculty of Veterinary and Agricultural Sciences, The University of Melbourne, Victoria 3010 Australia

4 北京市平谷区气象局, 北京 101200

**摘要:** 本试验以冬小麦中麦 175 为供试品种, 利用农田开放式 CO<sub>2</sub> 浓度增高 (FACE) 系统, 研究未来大气高 CO<sub>2</sub> 浓度对冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 排放的影响, 以及施用硝化抑制剂 (2-氯-6-三氯甲基吡啶) 是否可以起到抑制冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 的排放量升高的潜能。试验结果表明: CO<sub>2</sub> 浓度升高显著提高冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 的排放增幅达到 67.6%, 追肥灌溉后小麦田间 N<sub>2</sub>O 排放量较大, 随着冬小麦生育进程的推进 N<sub>2</sub>O 的排放量逐渐减少, 硝化抑制剂对中麦 175 田间 N<sub>2</sub>O 排放量的影响并不明显。因此, 在未来高 CO<sub>2</sub> 浓度环境条件下, 可以通过采取相应的耕作制度和栽培技术措施等来降低冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 的排放量。本试验结果对冬小麦田间是否选择施用 2-氯-6-三氯甲基吡啶来控制 N<sub>2</sub>O 的排放起到一定的参考作用。

**关键词:** FACE (开放式 CO<sub>2</sub> 浓度增高系统); 冬小麦; 硝化抑制剂; N<sub>2</sub>O 排放量

## Effects of Elevated CO<sub>2</sub> and Nitrification Inhibitors on N<sub>2</sub>O Emissions from a winter wheat cropping system

LI Yuting<sup>1,2</sup>, LAM Shu Kee<sup>3</sup>, HAN Xue<sup>1,\*</sup>, FENG Yongxiang<sup>1,2</sup>, LIN Erda<sup>1</sup>, LI Yingchun<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>4</sup>

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Key Laboratory of Agro-environment and Climate Change of Agriculture Ministry, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081

2 College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163000, China

3 Crop and Soil Sciences Section, Faculty of Veterinary and Agricultural Sciences, The University of Melbourne, Victoria 3010, Australia

4 Pinggu meteorological bureau, Beijing 101200, China

**Abstract:** Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) is one of the most important greenhouse gases emitted from the fertilized agricultural soils. This agricultural greenhouse gas is produced through nitrification and denitrification processes. The possible factors affecting N<sub>2</sub>O emissions have been widely studied, including the timing and rate of irrigation and nitrogenous fertilizer application, and environmental soil conditions such as temperature, moisture content, and microbial activity. The response of N<sub>2</sub>O emissions to the application of nitrification inhibitors has also been investigated in the last few decades, particularly in the context of climate change mitigation. More recent studies have examined the effects of elevated CO<sub>2</sub> on N<sub>2</sub>O in various agricultural contexts, including a variety of cropping systems. However, there are currently no available reports on the

**基金项目:** 国家科技支撑计划 (2013BAD11B03); 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) (2012CB955904); The University of Melbourne Early Career Research Grant Scheme 2014; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项

收稿日期: 2014-12-29; 网络出版日期: 2015-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanx@ami.ac.cn

potential effects of the interaction between elevated  $\text{CO}_2$  and the nitrification inhibitors on  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from a winter wheat field under open-air conditions. We therefore measured  $\text{N}_2\text{O}$  flux using closed chambers at the Free-Air Carbon dioxide Enrichment (FACE) experimental facility in northern China. The target atmospheric  $\text{CO}_2$  concentrations were 400  $\mu\text{L/L}$  (ambient) and 550  $\mu\text{L/L}$  (elevated) for treatments with and without the application of a nitrification inhibitor (Nitrapyrin). Nitrapyrin was applied twice (24% N-serve, 10 mg/kg soil) during the growing season—on day 1 and day 30 after fertilizer application. Measurements (0, 20, and 40 min after chamber closure) were taken from the start of the elongation stage until harvest (*Triticum aestivum* L. cv. Zhongmai 175). Measurements were taken daily for a week after each nitrapyrin application, and on a weekly basis from the application of nitrapyrin until harvest. The results showed that: 1) from the elongation stage to harvest, the elevated atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration increased  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from the soil by 67.6% overall. Within a week of the first and second applications of the nitrification inhibitor,  $\text{N}_2\text{O}$  flux was increased by 58.1% and 78.7%, respectively, under conditions of elevated  $\text{CO}_2$ . 2) Nitrapyrin had no significant effect on  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from the winter wheat field. The effect of the interaction between  $\text{CO}_2$  concentration and nitrapyrin application on  $\text{N}_2\text{O}$  emissions was not significant. 3)  $\text{N}_2\text{O}$  flux was the highest after fertilization and irrigation, before declining gradually over the course of the season. In our study, elevated  $\text{CO}_2$  stimulated  $\text{N}_2\text{O}$  emissions, possibly as a result of higher carbon (C) input into the soil and C substrate availability for denitrifiers. However, the increase in emissions was not mitigated by the application of nitrapyrin. The ineffectiveness of nitrapyrin observed in our study may be due to (i) the fact that the background ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) content in the soil was high at our study site, and/or (ii) the adsorption of the active ingredient of the inhibitor into the soil organic matter may be strong enough to reduce contact between the ingredient and  $\text{NH}_4^+$ . Further research is required to substantiate these findings. Our results indicate that under future atmospheric  $\text{CO}_2$  concentrations, it will be necessary to adopt appropriate agricultural management and cultivation practices in order to reduce  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from winter wheat fields. This study provides implications for the use of nitrapyrin in the mitigation of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from winter wheat fields.

**Key Words:** Free-air carbon dioxide enrichment (FACE); winter wheat; nitrapyrin;  $\text{N}_2\text{O}$  emission

温室气体排放量日益增加导致全球气候变暖,这一世界性话题已经成为当今学术界研究的热点。 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  是三大主要温室气体,截止到 2013 年 5 月,地球大气层中的  $\text{CO}_2$  浓度已超过 400  $\mu\text{L/L}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度已经上升至 323.2 nL/L,较 1750 年水平增长 20%<sup>[1]</sup>。与  $\text{CO}_2$  相比,虽然  $\text{N}_2\text{O}$  在大气中的含量很低,但其单分子增温潜势却是  $\text{CO}_2$  的 310 倍,而且由于  $\text{N}_2\text{O}$  在大气中可输送到平流层,对臭氧层造成破坏<sup>[2]</sup>,已经成为人类排放的首要消耗臭氧层物质,所以  $\text{N}_2\text{O}$  浓度的增高已引起了广泛的关注。人类活动是造成  $\text{N}_2\text{O}$  排放量增高的主要原因,其中农业生产排放的  $\text{N}_2\text{O}$  占人类活动  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量的 60%—75%<sup>[3]</sup>。小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是我国重要粮食作物之一,2013 年小麦播种总面积为 3.6 亿亩,其中冬小麦播种面积约占小麦总面积的 84% 和 90%<sup>[4]</sup>,所以冬小麦田的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量不容忽视。土壤中  $\text{N}_2\text{O}$  主要是由硝化和反硝化作用产生的,反硝化细菌受到土壤中可用碳含量的影响很大,因为其以碳为能量源,所以大气  $\text{CO}_2$  浓度升高促进了土壤中反硝化细菌的活跃性,从而导致  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量升高<sup>[5,6]</sup>。第五次 IPCC 评估报告显示,大气  $\text{CO}_2$  浓度将持续升高,预计到 2050 年,  $\text{CO}_2$  浓度将上升到 550  $\mu\text{L/L}$ <sup>[1]</sup>。所以,研究高  $\text{CO}_2$  浓度下冬小麦田间  $\text{N}_2\text{O}$  排放量以及排放规律,对于今后冬小麦生产中采用相应的耕作措施控制  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,以及对温室气体减排都会起到一定的贡献作用。

一般的硝化抑制剂是通过释放毒性化合物,直接影响硝化菌群落及硝化活性来抑制土壤硝化作用<sup>[7]</sup>,而 2-氯-6-三氯甲基吡啶是一种代谢灭活剂,其活性位点是吡啶环上的氮原子,通过对氨氧化细菌的竞争性抑制而对硝化作用进行抑制<sup>[8]</sup>。目前施用硝化抑制剂被认为是最有效的减排  $\text{N}_2\text{O}$  技术之一,对减轻大量施肥造成的环境污染和浪费资源有重要的意义。本文利用 FACE 系统,研究一)  $\text{CO}_2$  浓度升高是否会促进冬小麦田间  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,二)  $\text{CO}_2$  浓度升高对麦田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量季节变化的影响,三) 硝化抑制剂 2-氯-6-三氯甲

基吡啉是否对冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 排放起到抑制作用,为我国气候变化条件下农田 N<sub>2</sub>O 减排提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地基本概况

本试验在中国农业科学院作物科学研究所昌平实验基地进行,该试验基地位于北京市昌平区沙河镇与马池口镇交界处,地理坐标为 40°10'10"—40°10'40"N,116°13'40"—116°14'04"E,基地海拔 31.3m,属暖温带、半湿润大陆性季风气候,土壤为壤质褐潮土,有机质含量 14.10g/kg,全氮 0.82g/kg,速效磷 20.0mg/kg,速效钾 79.8mg/kg,土壤容重为 1.30g/cm<sup>3</sup>,pH8.33,田间最大持水量为 24.9%。

### 1.2 试验设计

本试验采用开放式 CO<sub>2</sub>浓度升高 (FACE) 系统,系统构成和控制同郝兴宇等的方法<sup>[9]</sup>。FACE 圈的直径为 4m,正八边形。圈中心设有 CO<sub>2</sub>传感器和风速风向传感器,由主控计算机根据圈内 CO<sub>2</sub>浓度控制气体的释放,FACE 圈内 CO<sub>2</sub>目标浓度为 550μL/L。采取裂区试验设计,CO<sub>2</sub>浓度为主处理,硝化抑制剂为副处理,每处理 3 次重复。FACE 圈和对照圈的 CO<sub>2</sub>浓度分别为 (550±60) μL/L 和 (400±40) μL/L;硝化抑制剂采用 2-氯-6-三氯甲基吡啶 (24% N-serve;施用量 10m/kg) 和无硝化抑制剂处理。

施氮量为 188kg/hm<sup>2</sup> (其中底肥含 N118 kg/hm<sup>2</sup>,追肥含 N70 kg/hm<sup>2</sup>)、磷肥和钾肥仅作底肥,使用量分别为 165 kg/hm<sup>2</sup> (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 和 90kg/hm<sup>2</sup> (K<sub>2</sub>O)。底肥于播种前一天 (2013-10-05) 施用,追肥于小麦拔节期 (2014-04-18) 施用。冬小麦拔节期追肥次日,首次施用硝化抑制剂,间隔 30 天后再次施用硝化抑制剂。供试冬小麦品种为中麦 175。

### 1.3 测定内容及方法

试验采用静态箱法<sup>[10]</sup>进行温室气体的采集,静态箱成圆柱形,高 0.15m,直径 0.16m。将取气箱底座安置在选取好的试验区域内,取气时用水进行液封,以保证取气箱的密封性。

气样采集时间及方法如下,首次施用硝化抑制剂的第二天开始连续进行 7 天气样采集,然后每隔一周取气一次直到第二次施吡啉,重复与第一次相同的操作直到小麦成熟收获后停止取气。取气时间在上午的 10:00—12:00 之间进行,扣箱抽取后 0、20 和 40min 气样,取样量 30mL。同时记录箱内温度。气样返回实验室采用气相色谱仪 (Agilent 7890B GC) 测定分析气样中 N<sub>2</sub>O 的浓度。

N<sub>2</sub>O 的排放通量计算公式<sup>[11]</sup>如下:

$$F=K\times(\Delta c/\Delta t)\times V/A\times 273/(273+T)$$

式中, $F$  为气体排放通量,即单位时间单位面积土壤表面的 N<sub>2</sub>O 排放通量 (μgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); $K$  为计算 N<sub>2</sub>O 排放通量的单位换算系数 (1.25 μgN/μL); $\Delta c/\Delta t$  为单位时间静态箱内的 N<sub>2</sub>O 气体浓度变化率 (mL m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>); $V$  为取样箱的体积 (m<sup>3</sup>), $A$  为取样箱的底面积 (m<sup>2</sup>); $T$  为测定时箱体內的平均温度 (℃)。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析,一般线性模型 LSD 检验法对各处理进行差异显著性检验;Excel 进行图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 CO<sub>2</sub>浓度升高对麦田 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响

CO<sub>2</sub>浓度升高对麦田 N<sub>2</sub>O 排放起到了明显的促进作用。小麦拔节至收获、施肥灌溉后 7 天和再次施硝化抑制剂后 7 天,FACE 圈的 N<sub>2</sub>O 排放通量比对照圈平均高出 67.6%、58.1% 和 78.7%,均达到显著水平 ( $P<0.05$ ) (表 1)。

表 1 CO<sub>2</sub> 浓度升高对麦田 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响Table 1 Emission of N<sub>2</sub>O as affected by elevated CO<sub>2</sub> concentration

| 测定时期<br>Experiment time                                      | N <sub>2</sub> O 排放通量 N <sub>2</sub> O flux/( $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) |                                          |   |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---|
|                                                              | CO <sub>2</sub> (400±40) $\mu\text{L/L}$                                              | CO <sub>2</sub> (550±60) $\mu\text{L/L}$ | P |
| 小麦拔节至收获 From elongation stage to harvest                     | 43.5±4.5                                                                              | 72.9±5.5                                 | * |
| 施肥灌溉后 7 天 7 days after fertilizer and irrigation application | 91.0±8.8                                                                              | 143.8±8.8                                | * |
| 再次施硝化抑制剂后 7 天 7 days after the second nitrapyrin application | 26.4±2.4                                                                              | 47.1±3.6                                 | * |

\* 代表  $P<0.05$ , CO<sub>2</sub> 浓度处理之间有显著差异

## 2.2 CO<sub>2</sub> 浓度升高与硝化抑制剂对麦田土壤 N<sub>2</sub>O 排放量的影响

本试验结果表明,2-氯-6-三氯甲基吡啶的施用和其与 CO<sub>2</sub> 浓度升高的交互作用对麦田 N<sub>2</sub>O 排放都没有显著的影响,在小麦拔节至收获、施肥灌溉后 7 天和第二次施硝化抑制剂后 7 天均没有达到显著性水平(表 2)。

表 2 CO<sub>2</sub> 浓度升高与硝化抑制剂对 N<sub>2</sub>O 排放通量影响Table 2 Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and Nitrapyrin application on N<sub>2</sub>O emission

| N <sub>2</sub> O 排放量 N <sub>2</sub> O flux/( $\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) |                                  |                                             |                                                                 |                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| CO <sub>2</sub>                                                                      | 硝化抑制剂<br>Nitrification inhibitor | 小麦拔节至收获<br>From elongation stage to harvest | 施肥灌溉后 7 天<br>7 days after fertilizer and irrigation application | 第二次施硝化抑制剂后 7 天<br>7 days after the second nitrapyrin application |
| (400±40) $\mu\text{L/L}$                                                             | -吡啶-Nitrapyrin                   | 43.5±4.5                                    | 91.0±8.8                                                        | 26.4±2.6                                                         |
|                                                                                      | +吡啶+Nitrapyrin                   | 37.9±4.3                                    | 87.9±8.4                                                        | 26.5±4.0                                                         |
| (550±60) $\mu\text{L/L}$                                                             | -吡啶-Nitrapyrin                   | 72.9±5.5                                    | 143.8±8.7                                                       | 47.1±3.9                                                         |
|                                                                                      | +吡啶+Nitrapyrin                   | 83.0±7.3                                    | 181.1±15.8                                                      | 33.3±3.8                                                         |
| CO <sub>2</sub>                                                                      |                                  | *                                           | *                                                               | *                                                                |
| 硝化抑制剂 Nitrification inhibitor                                                        |                                  | NS                                          | NS                                                              | NS                                                               |
| CO <sub>2</sub> & 硝化抑制剂 CO <sub>2</sub> & Nitrification inhibitor                    |                                  | NS                                          | NS                                                              | NS                                                               |

\* 代表  $P<0.05$ ; NS 代表没有显著性差异

## 2.3 CO<sub>2</sub> 浓度升高对麦田土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量季节变化的影响

N<sub>2</sub>O 的排放通量从拔节到成熟的变化范围是 16.4—409.1  $\mu\text{gN m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 排放峰出现在追肥灌溉后, 随着冬小麦生育进程的推进 N<sub>2</sub>O 的排放量逐渐减少。追肥灌溉后 7 天土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量平均达到 293.9  $\mu\text{gN m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 是第二次施 2-氯-6-三氯甲基吡啶后 7 天平均 77.8  $\mu\text{gN m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  N<sub>2</sub>O 排放通量的 3 倍左右。

从拔节到成熟, FACE 圈内的 N<sub>2</sub>O 排放通量比对照圈内的 N<sub>2</sub>O 排放通量平均增高 67.6% ( $P<0.05$ ) (图 1), 说明 CO<sub>2</sub> 浓度升高显著促进土壤 N<sub>2</sub>O 的排放。硝化抑制剂 2-氯-6-三氯甲基吡啶对 N<sub>2</sub>O 的排放没有显著的影响。CO<sub>2</sub> 浓度与 2-氯-6-三氯甲基吡啶交互作用对麦田土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响, 没有达到显著性水平。

## 3 结论与讨论

第一, 本研究表明, CO<sub>2</sub> 浓度升高促进冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 排放(增幅为 67.6%), 该结论与许多研究成果一致, Ineson 等利用瑞士 FACE 试验系统研究发现, 高 CO<sub>2</sub> 浓度下 C<sub>3</sub> 作物多年生黑麦草地的 N<sub>2</sub>O 排放量升高了 27%<sup>[12]</sup>。Lam 等研究发现, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高显著促进了冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 的排放, 增幅达到 60%<sup>[13-15]</sup>。同时也有研究表明, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对高粱田间 N<sub>2</sub>O 的排放量没有明显影响, 因为高粱为 C<sub>4</sub> 作物对大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化的响应没有 C<sub>3</sub> 作物的响应强烈<sup>[16]</sup>, 由此可见, 在 C<sub>4</sub> 作物田间土壤中, 反硝化细菌可利用的碳输入在高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下没有显著增加。Kettunen 等研究发现, 土壤 N<sub>2</sub>O 的排放量随着作物生长而降低, 原因是作物生长对土壤中 N 素的吸收量增加, 有可能减少土壤中无机氮的含量进而降低土壤的硝化和反硝化能力<sup>[17]</sup>。不同试验结果的产生, 可能与各试验中高 CO<sub>2</sub> 浓度处理的时间长度有关, 长时间或短时间排放高浓度 CO<sub>2</sub> 对

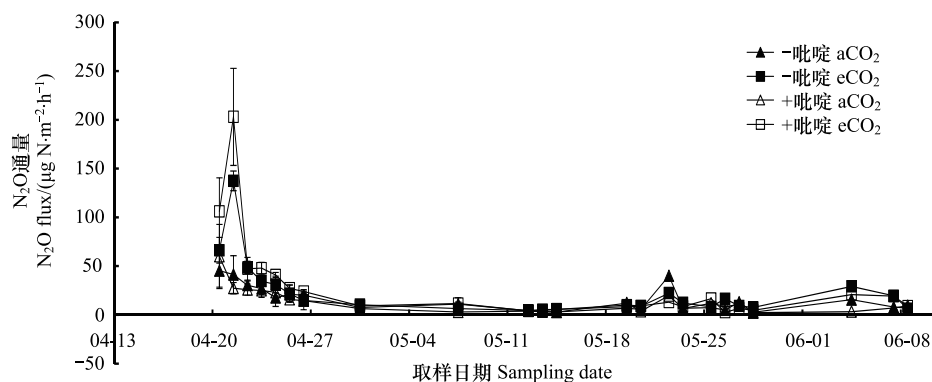


图1 冬小麦拔节后各处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放量的季节变化

Fig.1 The emission of N<sub>2</sub>O with and without Nitrpyrin application since the elongation stage of winter wheat

eCO<sub>2</sub>为FACE圈CO<sub>2</sub>浓度处理:elevated CO<sub>2</sub> concentration(550μL/L);aCO<sub>2</sub>为对照圈大气CO<sub>2</sub>浓度处理 ambient CO<sub>2</sub> concentration(400μL/L);施硝化抑制剂(+吡啶)与不施硝化抑制剂(-吡啶)+Nitrpyrin;-Nitrpyrin

作物田间 N<sub>2</sub>O 排放量的影响不同。此外,土壤原位测定表明,大气 CO<sub>2</sub>浓度升高降低了土壤 0—20cm 剖面中 N<sub>2</sub>O 的产生,从而减少了土壤 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[18]</sup>。

CO<sub>2</sub>浓度升高促进冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 排放的原因有以下几种可能,1) CO<sub>2</sub>浓度升高影响土壤微生物,Klemetsson 研究发现,大气 CO<sub>2</sub>浓度升高刺激作物生长<sup>[19]</sup>,增加了有机质向土壤输入,特别是根际有机碳的积累增加,并且影响作物与田间土壤的 C、N 循环,促进了微生物的活性并获得更多的碳源作为反硝化作用所需能量,从而增强了土壤微生物的反硝化强度,促进了 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[20]</sup>。采用 OTC 研究发现,大气 CO<sub>2</sub>浓度升高,能增加土壤的 pH 促进土壤中硝化细菌活性提高 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 转化成 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的速率,从而促进 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[21]</sup>。2) CO<sub>2</sub>浓度升高使温度相应增高,温度是土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量规律性日变化的最主要控制因素。3) Mosier 研究认为,大气 CO<sub>2</sub>浓度升高提高作物对水分的利用率而保持土壤湿润,促进土壤的反硝化作用<sup>[22]</sup>,从而有可能导致土壤 N<sub>2</sub>O 排放增加。

第二,本试验研究 N<sub>2</sub>O 排放通量季节变化结果显示,追肥灌溉后 N<sub>2</sub>O 排放量较大,随着冬小麦生育进程的推进 N<sub>2</sub>O 的排放量逐渐减少,这是由于施肥后土壤外源 N 素含量急剧增加,土壤中硝化细菌可利用 N 素含量升高,养分充足提高了微生物活性促进田间 N<sub>2</sub>O 的排放;Kettunen 等研究发现,土壤高 N<sub>2</sub>O 排放与土壤中可利用氮的含量成正相关<sup>[17]</sup>。Hall 和 Matson 研究也发现,土壤 N<sub>2</sub>O 排放对外源氮输入非常敏感,随着外源氮的增加,N<sub>2</sub>O 排放量增加的速度快于线性增加<sup>[23]</sup>。此外,作物生长初期对土壤中 N 的竞争力不强,土壤中的大部分 N 被硝化细菌利用加速了硝化和反硝化作用的发生,而作物生长发育越旺盛对土壤中 N 的竞争吸收能力就越强,使土壤中硝化细菌可利用原料减少,N<sub>2</sub>O 的产生和排放速率降低<sup>[24]</sup>,所以在作物生长初期田间 N<sub>2</sub>O 排放量较高。灌溉后土壤平均湿度为 15.9%,比第二次施硝化抑制剂期的土壤平均湿度高出 6.9%。N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤水分含量成正比<sup>[25]</sup>,从而灌溉期 N<sub>2</sub>O 的排放通量高。

第三,本试验研究表明,施硝化抑制剂 2-氯-6-三氯甲基吡啶对麦田 N<sub>2</sub>O 的排放量无显著影响。相似结果 López 研究表明,在相对较高 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量的土壤中硝化抑制剂的施用对硝化作用不产生抑制效应,这与氨氧化菌群落与数量和活性受到铵态氮含量高低的影响有关<sup>[26]</sup>。众多研究表明,硝化抑制剂的施用对减少温室气体 N<sub>2</sub>O 排放效果显著,而本试验的研究结果与之相反,产生这种结果的原因可能是,硝化抑制剂的施用效果受到土壤质地类型、有机质含量、硝化抑制剂种类等多种因素的综合影响<sup>[27]</sup>。其中主要有两点,首先,土壤中只有未受到扰动团聚体表面的活性硝化细菌才能够氧化 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,但是活性硝化细菌受到土壤微域一定程度的保护,导致硝化抑制剂对硝化菌活性的抑制效果下降<sup>[28]</sup>;不同质地土壤中的硝化菌群落对硝化抑制剂的敏感程度不同,因此,硝化抑制剂在不同质地土壤上的施用效果变异很大。其次,硝化抑制剂种类本身的原

因,本试验采用 2-氯-6-三氯甲基吡啶作为硝化抑制剂,由于甲基吡啶的水溶性较低、极性较弱,因此,容易被土壤中的腐植酸吸附<sup>[8]</sup>;此外硝化细菌由于受到土壤微域的保护对甲基吡啶不敏感,所以甲基吡啶对硝化细菌的抑制作用不强。

由本次试验研究结果可见,未来大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高导致冬小麦田间 N<sub>2</sub>O 的排放量增大。因此,控制田间 N<sub>2</sub>O 的排放对于降低农业生产温室气体排放量至关重要,必须通过进一步系统的研究来降低冬小麦生产乃至整个农业系统所产生的 N<sub>2</sub>O 等温室气体,为全球环境和农业可持续发展贡献力量。农业生产中硝化抑制剂的施用,对于田间 N<sub>2</sub>O 排放的影响作用受多种外界因素的影响表现复杂,硝化抑制剂的施用方法和配套技术值得进一步深入研究。

**致谢:**本文能够顺利完成要感谢,澳大利亚墨尔本大学青年科学基金项目、国家重点基础研究发展计划项目、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项等,对科研经费的支持;中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所农业部农业环境重点实验室,对试验平台的提供及技术支持;还要感谢居辉、郭李萍、郝兴宇、高霁等各位老师的指导,以及姜厚竹、李靖涛、王晨光、曹刚、余星星等同学在试验操作上的帮助。

#### 参考文献 (References):

- [1] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Baggs E M, Richter M, Hartwig U A, Cadisch G. Nitrous oxide emissions from grass swards during the eighth year of elevated atmospheric pCO<sub>2</sub> (Swiss FACE). *Global Change Biology*, 2003, 9(8): 1214-1222.
- [3] 米松华. 我国低碳现代农业发展研究—基于碳足迹核算和适用性低碳技术应用的视角[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2013: 437-437.
- [5] Welzmler J T, Matthias A D, White S, Thompson T L. Elevated carbon dioxide and irrigation effects on soil nitrogen gas exchange in irrigated Sorghum. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(2): 393-401.
- [6] 张玉铭, 胡春胜, 董文旭, 陈德立, 张佳宝. 农田土壤 N<sub>2</sub>O 生成与排放影响因素及 N<sub>2</sub>O 总量估算的研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(3): 119-123.
- [7] 刘倩. 硝化抑制剂对土壤的硝化抑制效应及其微生物作用机理[D]. 石河子: 石河子大学, 2011.
- [8] Jacinthe P A, Pichtel J R. Interaction of nitrapyrin and dicyandiamide with soil humic compounds. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 465-470.
- [9] 郝兴宇, 林而达, 杨锦忠, 居辉, 马占云, 韩雪, 王贺然, 杨万深. 自由大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对夏大豆生长与产量的影响. *生态学报*, 2009, 29(9): 4595-4603.
- [10] Datta A, Das S, Manjunath K R, Adhya T K. Comparison of two methods for the estimation of greenhouse gas flux from rice ecosystems in India. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 2012, 2(1): 43-49.
- [11] Ruser R, Flessa H, Schilling R, Steindl H, Beese F. Soil compaction and fertilization effects on nitrous oxide and methane fluxes in potato fields. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(6): 1587-1595.
- [12] Ineson P, Coward P A, Hartwig U A. Soil gas fluxes of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>: The Swiss free air carbon dioxide enrichment experiment. *Plant and Soil*, 1998, 198(1): 89-95.
- [13] Lam S K, Lin E D, Norton R, Chen D. The effect of increased atmospheric carbon dioxide concentration on emissions of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from a wheat field in a semi-arid environment in northern China. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(2): 458-461.
- [14] Lam S K, Chen D, Norton R, Armstrong R, Mosier A R. Nitrogen dynamics in grain crop and legume pasture systems under elevated atmospheric carbon dioxide concentration: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2012, 18(9): 2853-2859.
- [15] Lam S K, Chen D, Norton R, Armstrong R, Mosier A R. Influence of elevated atmospheric carbon dioxide and supplementary irrigation on greenhouse gas emissions from a spring wheat crop in southern Australia. *The Journal of Agricultural Science*, 2013, 151: 201-208.
- [16] De Luis I, Irigoyen J J, Sánchez-Díaz M. Elevated CO<sub>2</sub> enhances plant growth in droughted N<sub>2</sub>-fixing alfalfa without improving water stress. *Physiologia Plantarum*, 1999, 107(1): 84-89.
- [17] Kettunen R, Saarnio S, Martikainen P, Silvola J. Elevated CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen fertilization effects on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes and biomass production of *Phleum pratense* on farmed peat soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(4): 739-750.

- [18] 徐仲均, 王迎红, 徐星凯, Boeckx P, Van Cleemput Q, 朱建国, 王跃思. 高浓度 CO<sub>2</sub> 处理后土壤 N<sub>2</sub>O 排放特征. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1866-1869.
- [19] Klemetsson L, Svensson B H, Rosswall T. A method of selective inhibition to distinguish between nitrification and denitrification as sources of nitrous oxide in soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1988, 6(2): 112-119.
- [20] 徐仲均. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对稻-麦轮作农田温室气体排放影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [21] Carnol M, Hogenboom L, Jach M E, Remacle J, Ceulemans R. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> in open top chambers increases net nitrification and potential denitrification. *Global Change Biology*, 2002, 8(6): 590-598.
- [22] Mosier A R, Pendall E, Morgan J A. Effect of water addition and nitrogen fertilization on the fluxes of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and N<sub>2</sub>O following five years of elevated CO<sub>2</sub> in the Colorado Shortgrass Steppe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2003, 3: 1703-1708.
- [23] Hall S J, Matson P A. Nitrogen oxide emissions after nitrogen additions in tropical forests. *Nature*, 1999, 400(6740): 152-155.
- [24] 宋涛, 郑循华, 王跃思, 徐仲均, 韩圣慧, 朱建国. 开放式空气 CO<sub>2</sub> 浓度增高试验中的 NO 和 N<sub>2</sub>O 地-气交换观测研究. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1264-1268.
- [25] 张岳芳, 陈留根, 王子臣, 朱普平, 盛婧, 郑建初. 耕作方式对太湖地区冬小麦生长季 N<sub>2</sub>O 排放的影响. 生态环境学报, 2011, 20(8/9): 1326-1331.
- [26] López N I, Austin A T, Sala O E, Méndez B S. Controls on nitrification in a water-limited ecosystem: Experimental inhibition of ammonia-oxidising bacteria in the Patagonian steppe. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(12): 1609-1613.
- [27] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 马星行. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1611-1618.
- [28] Neufeld J D, Knowles R. Inhibition of nitrifiers and methanotrophs from an agricultural humisol by allylsulfide and its implications for environmental studies. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65(6): 2461-2465.