

# 硝化抑制剂双氰胺对菜地土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

邱伟红, 刘金山, 胡承孝\*, 谭启玲, 孙学成, 胡珍兰

(华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070)

**摘要:** 采用原状土柱试验研究了施用硝化抑制剂双氰胺(DCD)对菜地(小白菜和辣椒)土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响. 结果表明, 施用 DCD 能显著降低菜地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量和排放总量, 小白菜未施用 DCD 时施氮处理土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量为  $0.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 施用 DCD 后则显著减少至  $0.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 相当于减少了 49.33% 的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放. 辣椒未施用 DCD 时施氮处理土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量为  $2.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 施用 DCD 后则显著减少至  $1.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 相当于减少了 50.9% 的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放. 未施氮处理时, 施用与未施用 DCD 处理的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量均较低 [ $< 9 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  (小白菜)、 $22 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  (辣椒)], 但施用 DCD 依然减少了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的排放 [33.5% (小白菜)、33.4% (辣椒)]. 同时, DCD 降低了土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数, 小白菜未施用 DCD 时土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数(EF)为 0.15%, 施 DCD 时则减少到 0.07%; 辣椒未施用 DCD 时土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放系数为 0.99%, 施入 DCD 则减少到 0.52%. 由此说明, DCD 是减少菜地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的一项有效措施.

**关键词:** 温室气体; 氧化亚氮; 排放系数; 硝化抑制剂; 双氰胺

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3188-05

## Mitigation of Nitrous Oxide Emissions in Vegetable System by Treating Soil with Dicyandiamide, a Nitrification Inhibitor

QIU Wei-hong, LIU Jin-shan, HU Cheng-xiao, TAN Qi-ling, SUN Xue-cheng, HU Zhen-lan

(Microelement Research Center of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Undisturbed soil monolith lysimeter was used to investigate the effectiveness of DCD (dicyandiamide) in reducing  $\text{N}_2\text{O}$  emissions in vegetable (Chinese cabbage and pepper) field. Results showed that DCD significantly reduced total  $\text{N}_2\text{O}$  emission in vegetable field. Total  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from the urea treatment without DCD reached  $0.215 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  for Chinese cabbage, and it reduced to  $0.109 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , equivalent to a 49.3% reduction. The total  $\text{N}_2\text{O}$  emissions for pepper were much higher compared with those for Chinese cabbage. The total  $\text{N}_2\text{O}$  emitted from the urea treatment was  $2.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (without DCD) and it was reduced to  $1.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  with DCD application, representing a 50.9% reduction. In the control treatments where no urea was applied, the daily  $\text{N}_2\text{O}$  flux was very low and it never exceeded  $9 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  for Chinese cabbage and  $22 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  for pepper, respectively, but DCD also reduced  $\text{N}_2\text{O}$  emissions (33.5% for Chinese cabbage and 33.4% for pepper). In addition, the urea-N emission factor (EF) was 0.15%, 0.99% for Chinese cabbage and pepper without DCD, respectively, and it was reduced to 0.07%, 0.52% when DCD was applied. These results demonstrated the potential of using nitrification inhibitors (DCD) to mitigate  $\text{N}_2\text{O}$  emissions in vegetable system.

**Key words:** greenhouse gas; nitrous oxide; emission factor; nitrification inhibitors; dicyandiamide

氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )是一种温室气体,它既可产生温室效应,又可以破坏平流层臭氧.最新研究表明  $\text{N}_2\text{O}$  是破坏臭氧层的最重要因子,并且被认为是 21 世纪最大的影响因子<sup>[1]</sup>.大气中  $\text{N}_2\text{O}$  浓度 2005 年为  $319 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ ,比工业革命前  $270 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$  增长了 16%<sup>[2]</sup>,并且  $\text{N}_2\text{O}$  以每年大约 0.3% 的速率增长<sup>[3]</sup>. Xu 等<sup>[4]</sup>研究表明,每年有  $13.31 \text{ Tg N}$  以  $\text{N}_2\text{O}$  的形式释放大气当中,其中直接从农田生态系统中释放的  $\text{N}_2\text{O}$  大约占了 50%,为全球温室效应做出了巨大贡献.而硝化抑制剂双氰胺(DCD)是减少农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放应用最广泛的措施之一,国内外众多研究表明,施用 DCD 可以有效减少牧草地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[5-9]</sup>和种植粮食作物的农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放,如 Xu

等<sup>[10]</sup>和 Li 等<sup>[11]</sup>研究发现施用 DCD 可以显著降低水稻生长期  $\text{N}_2\text{O}$  排放; Ding 等<sup>[12]</sup>研究表明施用 DCD 可以减少小麦生长期 39% 的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放.但是,国内外关于 DCD 施用对蔬菜地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的减排效果研究较少,目前主要集中在 DCD 对降低蔬菜硝酸盐含量、土壤中硝态氮残留和硝酸盐淋失等方面<sup>[13, 14]</sup>.因此,本试验将 DCD 施用于蔬菜生产系统中,研究 DCD 对菜田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响,以期为

收稿日期: 2010-12-17; 修订日期: 2011-02-25

基金项目: 农业部“引进国际先进农业科学技术项目”(948 项目)(2003-Z54, 2008-Z25); “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAD7B03)

作者简介: 邱伟红(1983~),女,博士研究生,主要研究方向为施肥与生态(温室气体氧化亚氮),E-mail: qiuweihong1029@gmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: hucx@mail.hzau.edu.cn

蔬菜系统 N<sub>2</sub>O 减排提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方法

本试验采用 12 个原状土柱(直径 590 mm、高 650 mm、表面积 0.27 m<sup>2</sup>)研究施用硝化抑制剂(DCD)对菜地系统土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响。原状土柱建造(建造方法参考文献[15])于武汉市华中农业大学资源与环境学院盆栽场。土柱系统中所用土壤类型为黄棕壤,采集地点为华中农业大学校内菜地(114°21'8.34"E,30°28'5.87"N)。土壤的基本理化性状为:总碳 8.60 g·kg<sup>-1</sup>,总氮 0.28 g·kg<sup>-1</sup>,速效钾 49.82 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 2.96 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 5.12 ( $m_{\text{水}}:m_{\text{土}}=5:1$ )。

### 1.2 试验处理与管理

本试验种植了 2 季蔬菜,分别是小白菜(*Brassica Chinensis* L.) (2010-03-19~2010-04-24)和辣椒(*Capsicum annuum* L.) (2010-04-27~2010-08-17)。试验设置 4 个处理,分别为 Urea、Urea + DCD、Control、Control + DCD,其中 Urea 表示施用尿素,Control 表示不施用尿素(空白),每个处理 3 个重复。其中小白菜氮肥施用量(以 N 计)为 120 kg·hm<sup>-2</sup>,辣椒为 200 kg·hm<sup>-2</sup>。小白菜氮肥分 2 次施入,基肥 50% (2010 年 3 月 19 日),追肥 50% (2010 年 4 月 9 日)。辣椒氮肥分 4 次施入,基肥 20% (2010 年 4 月 27 日),追肥第 1 次 30% (2010 年 5 月 25 日),追肥第 2 次 30% (2010 年 6 月 15 日),追肥第 3 次 20% (2010 年 7 月 19 日)。DCD 与尿素同时施入土壤,即在施用基肥和追肥时同时施用 DCD,施用量均为 10 kg·hm<sup>-2</sup>。

磷钾肥的施用:小白菜磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 80 kg·hm<sup>-2</sup>)和钾肥(K<sub>2</sub>O, 100 kg·hm<sup>-2</sup>)一次性施入。辣椒磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 120 kg·hm<sup>-2</sup>)一次性施入,钾肥(K<sub>2</sub>O, 200 kg·hm<sup>-2</sup>)分两次施入,基肥 50% (2010 年 4 月 27 日),追肥 50% (2010 年 5 月 25 日)。

### 1.3 采样方法

N<sub>2</sub>O 气体采用静态箱法采集<sup>[16]</sup>。静态箱呈圆柱状,直径为 350 mm,高为 300 mm,材料为 0.5 mm 的不锈钢板。收集气体时,收集装置垂直插入土中 2~3 cm,周围用土填实防止漏气。对于长势较高的辣椒作物,则增加一个采样底座,采样底座材料为 PVC,高度为 600 mm。采样容器为 20 mL 医用塑料注射器和 16 mL 真空玻璃瓶(江苏省南通市海门家豪实验仪器公司)。利用三通阀原理采集 N<sub>2</sub>O 气体样品,采

样时,先将 50 mL 注射器来回抽取气体 10 次以上,以混匀箱内气体,减少采样误差,然后用 20 mL 注射器抽取气样注入玻璃收集瓶,带回实验室进行分析。采样持续时间为 20 min,分别在 0、10、20 min 时采集气体。N<sub>2</sub>O 气体采集频率为每周一次。

### 1.4 N<sub>2</sub>O 排放量的测定及排放通量的计算

N<sub>2</sub>O 排放量的测定:N<sub>2</sub>O 气体分析采用改装后的美国 Varian 产 GC3800 气相色谱仪测定。色谱柱为 1 m (长) × 2 mm (内径) 不锈钢柱,内填 80~100 目 Porapak Q 的填充柱,柱温 55℃,ECD 检测,检测器温度 330℃,采用十通进样反吹阀和四通切换阀进样,保留时间 4.30 min,载气为高纯氮气(>99.999%),流速为 30 mL·min<sup>-1</sup>。

N<sub>2</sub>O 排放通量的计算:N<sub>2</sub>O 排放通量指单位时间内单位面积上农田土壤排放或吸收 N<sub>2</sub>O 的量。通量的计算公式为:

$$\text{Flux} = \rho \times h \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{T}$$

式中,Flux 为排放通量[μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>],Δt 为测定时间; $h$  为箱内有效空间的高, $\rho$  为标准状况下 N<sub>2</sub>O 气体的密度(1.25 kg·m<sup>-3</sup>), $\Delta c/\Delta t$  为箱内气体浓度随时间的变化率[nL·(L·h)<sup>-1</sup>], $T$  为采气箱内温度(绝对温度)。

N<sub>2</sub>O 排放总量的计算:采用积分法计算作物生长期间土壤释放 N<sub>2</sub>O 量的总和。

N<sub>2</sub>O 排放系数的计算:以 N<sub>2</sub>O 形式损失的氮量占所施用氮肥的比例。

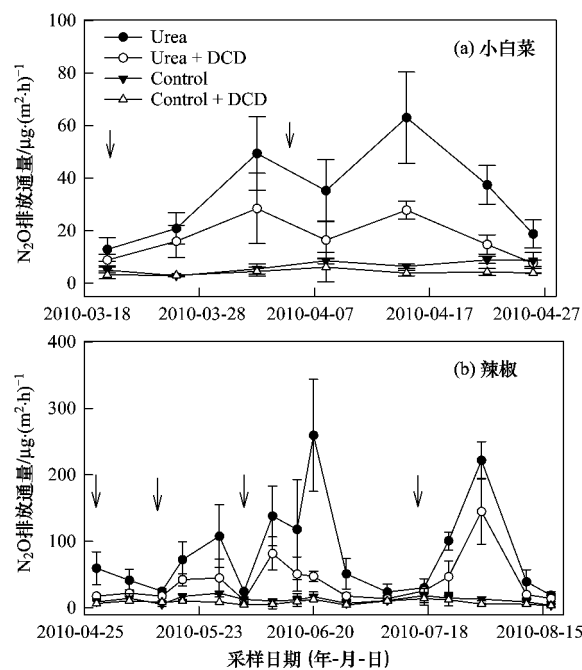
### 1.5 数据统计分析

Excel 数据处理,Sigmaplot 作图,SPSS 数据处理系统进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量的动态变化

氮肥施用显著提高了土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量,每次施用氮肥之后,有无 DCD 处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量均呈迅速增加的趋势,直至排放高峰,而后则呈逐渐下降趋势(图 1)。同时,整个试验期间施用 DCD 能显著减少土壤 N<sub>2</sub>O 的排放。种植小白菜期间,施氮处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量变化范围为 12.9~63.0 μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,施用 DCD 后则减少至 7.7~28.5 μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>[图 1(a)]。未施氮处理下土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量较低,施用 DCD 和未施用 DCD 处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量均小于 9 μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>。而在种植辣椒期间,土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量要高于种植小白菜时的



箭头表示施氮肥时间  
图 1 N<sub>2</sub>O 排放通量的动态变化  
Fig. 1 Daily N<sub>2</sub>O emissions

N<sub>2</sub>O 排放通量[图 1(a) 和 1(b)]. 施氮处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量变化范围为 18.9 ~ 259 μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>, 施用 DCD 后则减少至 11.7 ~ 115.0 μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>

[图 1(b)]. 未施氮处理下土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量较低, 施用 DCD 和未施用 DCD 处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量在整个试验期间均小于 22 μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>.

2.2 土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量和排放系数

由表 1 可知, 种植小白菜期间, 未施用 DCD 时施氮处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量 (以 N 计) 为 0.22 kg·hm<sup>-2</sup>, 施用 DCD 后则显著减少至 0.11 kg·hm<sup>-2</sup> (P < 0.05), 相当于减少了 49.33% 的土壤 N<sub>2</sub>O 排放. 种植辣椒期间, N<sub>2</sub>O 排放总量要高于种植小白菜期间的 N<sub>2</sub>O 排放总量, 未施用 DCD 时施氮处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量为 2.32 kg·hm<sup>-2</sup>, 施用 DCD 后则显著减少至 1.14 kg·hm<sup>-2</sup> (P < 0.05), 相当于减少了 50.9% 的土壤 N<sub>2</sub>O 排放量.

未施氮处理时, 土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量较低, 未施用 DCD 时为 0.036 kg·hm<sup>-2</sup> (小白菜) 和 0.35 kg·hm<sup>-2</sup> (辣椒); 施用 DCD 时, 则减少至 0.024 kg·hm<sup>-2</sup> (小白菜) 和 0.23 kg·hm<sup>-2</sup> (辣椒), DCD 分别减少了 33.5% (小白菜) 和 33.4% (辣椒) N<sub>2</sub>O 排放. 此外, 种植小白菜时土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数比种植辣椒时低 (表 1). 小白菜未施用 DCD 时施氮土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数 (EF) 为 0.15%, 当施入 DCD 时, 则减少到 0.07%; 辣椒未施用 DCD 时施氮土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数为 0.99%, 当施入 DCD 时, 则减少到 0.52%.

表 1 N<sub>2</sub>O-N 总排放量、DCD 减排量、排放系数  
Table 1 N<sub>2</sub>O-N emissions, reductions by DCD and emission factor

| 类型  | 处理            | 总 N <sub>2</sub> O-N 排放量 (±SEM) <sup>1)</sup> | DCD 减排量 | 排放系数 |
|-----|---------------|-----------------------------------------------|---------|------|
|     |               | /kg·hm <sup>-2</sup>                          | /%      | /%   |
| 小白菜 | Urea          | 0.215 (0.06) a                                | —       | 0.15 |
|     | Urea + DCD    | 0.109 (0.04) b                                | 49.3    | 0.07 |
|     | Control       | 0.036 (0.007) c                               | —       | —    |
|     | Control + DCD | 0.024 (0.01) d                                | 33.5    | —    |
| 辣椒  | Urea          | 2.32 (0.72) a                                 | —       | 0.99 |
|     | Urea + DCD    | 1.14 (0.37) b                                 | 50.9    | 0.52 |
|     | Control       | 0.35 (0.14) c                                 | —       | —    |
|     | Control + DCD | 0.23 (0.97) d                                 | 33.4    | —    |

1) 标准误

3 讨论

丁一汇等<sup>[17]</sup>研究表明, 近 50 年中国增暖尤其明显, 全国年平均地表气温增加 1.1℃, 增温速率为 0.22℃·(10a)<sup>-1</sup>, 而这急剧变暖的主要原因是来自大气中温室气体 (CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 等) 的增加<sup>[2]</sup>. 其中, 据董红敏等<sup>[18]</sup>分析表明, 中国农业活动产生的 N<sub>2</sub>O 占全国 N<sub>2</sub>O 排放量的 92.47%, 其中氮肥施用是土壤产生 N<sub>2</sub>O 的主要因素<sup>[19-21]</sup>. 本试验结果也

说明氮肥施用显著提高了土壤 N<sub>2</sub>O 的排放, 即与对照相比, 施氮显著增加了小白菜和辣椒两季作物下土壤 N<sub>2</sub>O 排放 (图 1), 且每次施用氮肥后土壤 N<sub>2</sub>O 排放均出现一个排放高峰.

虽然氮肥施用显著提高了 N<sub>2</sub>O 的排放, 但同时有研究表明, 硝化抑制剂如双氰胺 (DCD) 等能有效减少土壤 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[5-12]</sup>. 本研究结果表明, 施用硝化抑制剂 DCD 显著减少了菜地 (小白菜和辣椒) 农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放, 在施用氮肥基础上施用 DCD 分别

减少了 49.3% 和 50.1% 的 N<sub>2</sub>O 排放,未施用氮肥时,硝化抑制剂 DCD 则分别减少了 33.5% 和 33.4% 的土壤 N<sub>2</sub>O 排放(表 1),如种植辣椒期间未施用 DCD 时施氮处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量为 2.32 kg·hm<sup>-2</sup>,施用 DCD 后则减少至 1.14 kg·hm<sup>-2</sup>.故本研究说明施用硝化抑制剂 DCD 是减少蔬菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放的一项有效措施.在其他不同利用类型的农田土壤上,其他研究者也有类似报导,如 Smith 等<sup>[22]</sup>研究表明牧草地施用 DCD 后 N<sub>2</sub>O 年排放总量减少 30%~45%,Qiu 等<sup>[9]</sup>研究表明夏季施用 DCD 后牧草地 N<sub>2</sub>O 排放总量减少了 40%,冬季则减少了 69%.然而,本试验研究结果较国内研究施用 DCD 对其他粮食作物生态系统中土壤 N<sub>2</sub>O 排放的减排效果好,如 Li 等<sup>[11]</sup>研究在不同施肥时期施用脲酶抑制剂(hydroquinone, HQ)和 DCD 对水稻土 N<sub>2</sub>O 排放的影响,结果表明在施用基肥、分蘖肥以及幼穗分化肥时施用 DCD 比对照分别减少了 24%、56% 和 17% 的 N<sub>2</sub>O 排放.因此,亦有的研究结果说明硝化抑制剂 DCD 能够有效降低农田土壤(草地、菜地、旱地、水田等)N<sub>2</sub>O 的排放量,是减少温室气体 N<sub>2</sub>O 排放的有效措施.

#### 4 结论

(1) 施用 DCD 能显著降低菜地土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量和 N<sub>2</sub>O 排放总量,施氮处理下施用 DCD 减少了 49.3% (小白菜)和 50.9% (辣椒)的土壤 N<sub>2</sub>O 排放量.

(2) 施用 DCD 降低了土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数,小白菜未施用 DCD 时土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数为 0.15%,施 DCD 时则减少到 0.07%;辣椒未施用 DCD 时土壤 N<sub>2</sub>O 排放系数为 0.99%,施入 DCD 则减少到 0.52%.

(3) 未施氮处理时,土壤 N<sub>2</sub>O 排放量小,种植小白菜和辣椒期间,施用和未施用 DCD 处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量分别小于 9 μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup> 和 22 μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,但施用 DCD 依然减少了 33.5% (小白菜)和 33.4% (辣椒)N<sub>2</sub>O 的排放.

#### 参考文献:

[1] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century [J]. Science, 2009, **326**(5949): 123.  
[2] Solomon D, Qin M, Manning Z, et al. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working

Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.  
[3] WMO. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002 [R]. Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 47, World Meteorological Organization, Geneva. 2003. 498.  
[4] Xu X, Tian H, Hui D. Convergence in the relationship of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O exchanges between soil and atmosphere within terrestrial ecosystems [J]. Global Change Biology, 2008, **14**(7): 1651-1660.  
[5] Akiyama H, Yan X Y, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N<sub>2</sub>O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2010, **16**(6): 1837-1846.  
[6] Di H J, Cameron K C. Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor-a lysimeter study [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, **79**(3): 281-290.  
[7] De Klein C A M, Eckard R J. Targeted technologies for nitrous oxide abatement from animal agriculture [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2008, **48**(2): 14-20.  
[8] Kelly K B, Phillips F A, Baigent R. Impact of dicyandiamide application on nitrous oxide emissions from urine patches in northern Victoria, Australia [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2008, **48**(2): 156-159.  
[9] Qiu W H, Di H J, Cameron K C, et al. Nitrous oxide emissions from animal urine as affected by season and a nitrification inhibitor dicyandiamide [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(7): 1229-1235.  
[10] Xu X, Boeckx P, Van Cleemput O, et al. Urease and nitrification inhibitors to reduce emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in rice production [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, **64**(1): 203-211.  
[11] Li X G, Zhang G B, Xu H, et al. Effect of timing of joint application of hydroquinone and dicyandiamide on nitrous oxide emission from irrigated lowland rice paddy field [J]. Chemosphere, 2009, **75**(10): 1417-1422.  
[12] Ding W X, Yu H Y, Cai Z C. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain [J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, doi: 10.1007/s00374-010-0504-6.  
[13] 许超,吴良欢,张立民,等.含硝化抑制剂 DMPP 氮肥对小白菜硝酸盐累积和营养品质的影响[J].植物营养与肥料学报, 2005, **11**(1): 137-139.  
[14] 伍少福,吴良欢,石其伟.硝化抑制剂对降低蔬菜硝酸盐积累的影响及其影响因素的研究进展[J].土壤通报, 2006, **37**(6): 1236-1242.  
[15] 赵长盛.武汉城郊菜地土壤氮素的转化与淋失研究[D].武汉:华中农业大学,2009.  
[16] 王跃思.大气中痕量化学成分的分析方法研究及实际应用[D].北京:中国科学院大气物理研究所,1998.  
[17] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):

- 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, **2**(1): 3-8.
- [18] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(10): 269-273.
- [19] 郑循华, 金继生. 华东稻麦轮作生态系统的  $N_2O$  排放研究[J]. 应用生态学报, 1997, **8**(5): 495-499.
- [20] 黄丽华, 沈根祥, 顾海蓉, 等. 肥水管理方式对蔬菜田  $N_2O$  释放影响的模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(6): 1319-1324.
- [21] Gregorich E G, Rochette P, VandenBygaart A J, *et al.* Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada [J]. Soil & Tillage Research, 2005, **83**(1): 53-72.
- [22] Smith L C, de Klein C A M, Catto W D. Effect of dicyandiamide applied in a granular form on nitrous oxide emissions from a grazed dairy pasture in Southland, New Zealand [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2008, **51**(4): 387-396.