

王国强, 常玉妍, 宋星星, 等. 稻草还田下添加 DCD 对稻田  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2431-2439.

WANG Guo-qiang, CHANG Yu-yan, SONG Xing-xing, et al. Effects of DCD addition on  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  emissions from paddy field under rice straw incorporation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2431-2439.

# 稻草还田下添加 DCD 对稻田 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{CO}_2$ 排放的影响

王国强<sup>1,2</sup>, 常玉妍<sup>1</sup>, 宋星星<sup>1</sup>, 朱思明<sup>1</sup>, 毛艳玲<sup>1\*</sup>

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 西藏职业技术学院农业科学技术学院, 拉萨 850030)

**摘要:**为研究秸秆还田下硝化抑制剂的效应, 本研究借助温室盆栽, 设置 5 个处理: 不施肥(CK)、传统施肥(CF)、传统施肥配施硝化抑制剂双氰胺 DCD(CF+DCD)、传统施肥稻草还田(CF+S)、传统施肥稻草还田配施 DCD(CF+S+DCD), 探讨秸秆还田下施用 DCD 对水稻整个生育期土壤  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放的影响。结果表明: 整个生育期,  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  排放量以 CF+S 最高, CF+S+DCD 次之, 而 CK 最低;  $\text{N}_2\text{O}$  排放量以 CF 最高, CF+DCD 次之, 而 CF+S+DCD 最低。与 CF 和 CF+S 相比, 施用硝化抑制剂后  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  减排效果显著, 而  $\text{CO}_2$  减排不显著。就水稻产量、综合温室效应(GWP)、温室气体强度(GHGI)和净生态系统经济预算(NEEB)而言, 秸秆还田和硝化抑制剂施用, 都可显著提高水稻产量和 NEEB, 而降低 GWP 和 GHGI; 与 CF 和 CF+S 相比, 施用硝化抑制剂后, CF+DCD 和 CF+S+DCD 分别增产 9.5% 和 10.0%, NEEB 增加 16.8% 和 20.1%; GWP 分别降低 23.7% 和 21.0%, GHGI 降低 23.7% 和 21.1%。可见, 无论稻草还田与否, 硝化抑制剂对温室气体排放及水稻产量的影响效应比较稳定。因此, 稻草还田配施 DCD(即 CF+S+DCD 处理)在保证水稻产量的基础上, 显著降低稻田土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 是一种经济可行的温室气体减排措施。

**关键词:** 稻草还田; 双氢胺(DCD); 综合温室效应; 温室气体强度; 净生态系统经济预算

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)12-2431-09 doi:10.11654/jaes.2016-0877

## Effects of DCD addition on $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2\text{O}$ and $\text{CO}_2$ emissions from paddy field under rice straw incorporation

WANG Guo-qiang<sup>1,2</sup>, CHANG Yu-yan<sup>1</sup>, SONG Xing-xing<sup>1</sup>, ZHU Si-ming<sup>1</sup>, MAO Yan-ling<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Department of Agricultural Science and Technology, Tibet Vocational Technical College, Lhasa 850030, China)

**Abstract:** Incorporation of crop residues in agricultural soils can maintain soil organic matter, but simultaneously stimulates greenhouse gas emission. The application of the nitrification inhibitor has been demonstrated to inhibit effectively greenhouse gas emission. However, it remains largely unknown in effects of the nitrification inhibitor application on soil  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  emissions under straw return in farmland. In the present study, the emissions of farmland soil  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  under rice straw return were investigated and estimated when the nitrification inhibitor (dicyandiamide, abbreviated DCD) was applied during the whole rice growing season through the pot experiment. The experiment included five treatments: conventional fertilization (CF), conventional fertilization plus DCD (CF+DCD), conventional fertilization plus straw return (CF+S), conventional fertilization plus straw return and DCD (CF+S+DCD), and no input of fertilizers as control (CK). The results showed that  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  emissions during the whole rice growing season were highest in the CF+S treatment, followed by CF+S+DCD treatment, and lowest in CK treatment. In contrast,  $\text{N}_2\text{O}$  during the whole rice growing season were highest in the CF treatment, followed by CF+DCD treatment, and lowest in CF+S+DCD treatment. Compared with CF and CF+S treatments, the application of nitrification inhibitor significantly reduced  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions. In general, both straw return and nitrification inhibitor application significantly in-

收稿日期: 2016-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(30972346); 国家科技支撑计划项目(2014BAD15B01)

作者简介: 王国强(1979—), 男, 河南南阳人, 博士, 副教授, 主要从事稻田温室气体排放研究。E-mail: wgq430@163.com

\* 通信作者: 毛艳玲 E-mail: fafum@126.com

creased rice yield and net ecosystem economic budget (NEEB) but decreased global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI). Compared with CF and CF+S treatments, the application of nitrification inhibitor increased crop yield by 9.5% and 10.0%, and NEEB by 16.8% and 20.1%, but decreased GWP by 23.7% and 21.0%, and GHGI by 23.7% and 21.1%. Thus, the application of nitrification inhibitor can significantly decrease greenhouse gas and sustain crop yield irrespective of straw return. Our results suggest that the combined of straw return and DCD application can be an effective greenhouse gas mitigation strategy without sacrifice crop yield.

**Keywords:** rice straw incorporation; dicyandiamide (DCD); global warming potential; greenhouse gas intensity; net ecosystem economic budget

温室气体排放引起的全球气候变化已成为当今国际社会普遍关注的全球性问题,也是全人类面临的最为严峻的全球性环境问题。IPCC 第五次评估报告(2013)更明确地指出人类活动极可能是导致气候变暖的主要原因<sup>[1]</sup>。2011 年大气中  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  浓度分别为  $1803.324 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $391 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ , 相比工业革命前分别提高了 150%、20% 和 40%, 每年还以  $4 \sim 5$ 、 $0.73 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $2.0 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$  的速度在持续增加<sup>[1-2]</sup>, 农业活动排放的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  约占全球人为排放量的 52% 和 84%<sup>[3]</sup>。水稻种植是人类活动过程中温室气体( $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ )的主要排放源之一<sup>[4]</sup>。稻田每年排放  $33 \sim 40 \text{ Tg}$  的  $\text{CH}_4$ , 占人为  $\text{CH}_4$  排放总量的 11.7%~26.2%, 占农业活动  $\text{CH}_4$  排放总量的 22.5%~50.4%<sup>[5-6]</sup>。通过施肥直接或间接从农田释放出来的  $\text{N}_2\text{O}$  排放量占农业源  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的 80%<sup>[7-8]</sup>。中国是世界上最主要的水稻生产国, 水稻种植面积为  $3.014 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 约为世界水稻种植面积的 20%, 占我国作物种植面积的 28%, 总产量占全球 30%<sup>[9]</sup>。因此, 减少稻田温室气体排放对缓解全球温室效应具有重要意义, 已成为国内外研究的热点。

我国稻草资源丰富, 其总量达  $1.84 \times 10^8 \text{ t}$ , 占全国秸秆总量的 21%<sup>[10]</sup>。稻草还田可以提高土壤有机质含量和改善土壤结构, 是保持和提高土壤质量和生产力的重要物质基础, 也是稻草资源综合利用、促进稻田生态系统良性循环的一种重要方式。但稻草还田增加稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的排放, 而对  $\text{N}_2\text{O}$  的排放影响较小<sup>[11-12]</sup>。Zhang 等<sup>[13]</sup>研究发现, 与稻草不还田相比, 稻草还田全年  $\text{CH}_4$  排放量显著增加 35%, 而对  $\text{N}_2\text{O}$  排放量不产生影响; 全年综合温室效应增加 32%, 全年温室气体排放强度增加 31.1%。因此, 稻草还田措施下降低稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放, 维持或提高水稻产量和保护生态环境的可持续性, 是迫切需要解决的问题。已有研究表明, 硝化抑制剂特别是双氰胺 (DCD) 能减少稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量<sup>[14-16]</sup>。Linguist 等<sup>[17]</sup>研究发现稻田施用双氰胺,  $\text{CH}_4$  排放量减少 18%,  $\text{N}_2\text{O}$  排放量减少 29%。目前有关稻草还田和施用 DCD 对稻田

$\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响已做了大量的研究报道; 而关于稻草还田和施用 DCD 对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的共同影响及交互作用还未见报道。为此, 本研究通过盆栽试验研究稻草还田和施用 DCD 及其相互作用对稻田  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放的影响, 为科学合理利用稻草资源和减缓稻田温室气体排放提供决策依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤和稻草均采自福建省闽侯县白沙镇 ( $26^\circ 13' \text{ N}$ ,  $119^\circ 04' \text{ E}$ ) 水稻田。土壤采集深度为 20 cm, 采集时间为 2015 年 6 月 8 日, 土壤风干后挑去石块、石砾和动植物残体, 过 2 mm 孔径筛。供试土壤基本性质为: 有机质  $22.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $1.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷  $0.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全钾  $11.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , pH4.7 (土水比 1:2.5)。稻草采集后剪下穗部, 切割成 3~5 cm 长, 置于鼓风干燥箱中  $45^\circ \text{C}$  条件下烘干粉碎, 过 2 mm 孔径筛。供试稻草的基本性质为: 有机质  $645.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $10.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷  $3.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全钾  $20.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

试验为盆栽试验, 盆钵直径 25 cm、高 35 cm, 每盆装土 6 kg。共设置 5 个处理: 不施肥 (CK)、传统施肥 (CF)、传统施肥配施 DCD (CF+DCD)、传统施肥稻草还田 (CF+S)、传统施肥稻草还田配施 DCD (CF+S+DCD)。每个处理设 3 个重复, 共 15 个盆钵, 随机排列。每盆稻草施入量为  $38.56 \text{ g}$ , 折合大田施用量为  $6000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在水稻移栽前 7 d 全部施用; 每盆 DCD 施用量为设计施氮量的 4%, 与基肥混施。2015 年 6 月 23 日水稻移栽前按处理将秸秆与土壤充分混匀装入盆钵中, 进行淹水处理。6 月 29 日将 4 叶 1 心水稻幼苗分别移栽于盆钵中, 每个盆钵种植 3 穴, 每穴 1 株。

### 1.3 水肥管理

水分管理采用传统的前期淹水 (2015 年 6 月 29 日—7 月 28 日)、中期烤田 (2015 年 7 月 29 日—8 月 12 日) 和后期干湿交替 (2015 年 8 月 13 日—水稻

成熟)的管理模式。水稻整个生育期各处理施用化肥量保持一致,施氮量为 103.5 kg N·hm<sup>-2</sup>,磷、钾分别为 27 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>、135 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>,供试化肥分别用尿素、过磷酸钙、氯化钾。尿素、氯化钾的 50%和过磷酸钙全部作为基肥施用,剩余 50%的尿素和氯化钾作为分蘖追肥在移栽后 20 d 左右施用。

#### 1.4 样品采集与测定

CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 气体样品采用静态暗箱观测法采集。采样箱为有机玻璃制成,规格为 50 cm×50 cm×100 cm,外部包有海绵和锡箔纸,以防止太阳照射导致箱内气温升高过快。箱内顶部装有 12 V 小风扇用于混匀气体,箱体中部安装抽气孔和插温度计孔用于采集气体和观测箱内温度变化。采样底座为桌面正中间一个略大于盆栽桶外径的圆孔带凹槽有机玻璃桌子,凹槽高度 5 cm,采集气体时将采样箱置于底座凹槽内,凹槽内加水密封防止漏气;沿圆孔四周粘上 5 cm 厚的硅橡胶圈,胶圈周围有 5 cm 深的凹槽,采集气体时加水密封,以便桶沿压上后造成桶沿和桌孔间相对局部密封条件。每 7 d 采集气体 1 次,每次采集均在上午 9:00—11:00 完成。分别在罩箱后的 0、10、20、30 min 用 50 mL 注射器从箱中抽取气体,来回抽 3 次以完全混匀气体,抽出 50 mL 通过旋转三通阀转移到 0.5 L 气体采样袋备测,并同步测定采样箱内温度。CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 由带有氢火焰离子检测器的气相色谱仪(岛津 GC2010)测定,N<sub>2</sub>O 由带有 Ni<sup>63</sup> 电子捕获检测器的气相色谱仪(岛津 GC2014)测定。水稻收获后使用土钻在每个盆内取 0~20 cm 深混合样,带回实验室测定土壤养分指标。土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定,土壤全氮采用半微量开氏法测定,土壤铵态氮和硝态氮采用流动分析仪测定,土壤速效磷采用 0.03~0.025 mol·L<sup>-1</sup> HCl 法测定,土壤速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提火焰光度法测定。

#### 1.5 数据处理与分析方法

##### 1.5.1 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放通量计算

CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放通量计算公式如下:

$$F = \rho \frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt} \cdot \frac{273}{273+T} \quad (1)$$

式中:F 为 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放通量,单位分别为 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>、μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 和 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;ρ 为标准状态下 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 密度,其值分别是 0.714、1.25 kg·m<sup>-3</sup> 和 1.96 kg·m<sup>-3</sup>;V 为采样箱内温室气体所能容纳的有效体积,m<sup>3</sup>;A 为盆栽桶内土面面积,m<sup>2</sup>;dC/dt 为单位时间内采样箱内 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 浓度变化率;T 为采样

过程中采样箱内的平均温度,℃;CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放通量用 3 个重复的平均值表示,季节平均排放量则是将 3 个重复的每次观测值按时间间隔加权平均后再平均。

##### 1.5.2 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 累积排放量计算

$$\text{累积排放量} = \sum_{i=1}^n F_i \times D_n \times 24 \quad (2)$$

式中:F<sub>i</sub> 表示各生长期 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 平均排放通量;D<sub>n</sub> 表示各生长期的天数。

##### 1.5.3 增温潜势和综合温室效应计算

综合温室效应通常用来估算不同温室气体对气候变化的综合效应<sup>[18]</sup>。据 IPCC 统计,在 100 年时间尺度上,CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势分别为 CO<sub>2</sub> 的 25 倍和 298 倍<sup>[19]</sup>。CH<sub>4</sub> 增温潜势(GWP<sub>CH<sub>4</sub></sub>)、N<sub>2</sub>O 增温潜势(GWP<sub>N<sub>2</sub>O</sub>)和综合温室效应(GWP)的计算公式分别为:

$$\text{GWP}_{\text{CH}_4} = 25 \times R_{\text{CH}_4} \quad (3)$$

$$\text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}} = 298 \times R_{\text{N}_2\text{O}} \quad (4)$$

$$\text{GWP} = \text{GWP}_{\text{CH}_4} + \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}} = 25 \times R_{\text{CH}_4} + 298 \times R_{\text{N}_2\text{O}} \quad (5)$$

式中:R<sub>CH<sub>4</sub></sub> 为 CH<sub>4</sub> 季节累积排放量,kg·hm<sup>-2</sup>;R<sub>N<sub>2</sub>O</sub> 为 N<sub>2</sub>O 季节累积排放量,kg·hm<sup>-2</sup>。

##### 1.5.4 温室气体排放强度计算

温室气体排放强度是 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 总增温潜势与作物产量的比值,是综合评价各处理温室效应的指标<sup>[20]</sup>。

$$\text{GHGI} = \text{GWP} / \text{产量} \quad (6)$$

式中:GHGI 为温室气体强度,kg CO<sub>2</sub>-eq·kg<sup>-1</sup>;GWP 为 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 总增温潜势,kg CO<sub>2</sub>-eq·hm<sup>-2</sup>;产量为各处理单位面积平均产量,kg·hm<sup>-2</sup>。

##### 1.5.5 净生态系统经济预算

净生态系统经济预算(NEEB)是作物生产和农业活动的主要考虑因素,可以对实施不同措施的农田进行经济可行性评价<sup>[13]</sup>。

$$\text{NEEB} = \text{产量收益} - \text{农业活动成本} - \text{GWP 成本} \quad (7)$$

式中:NEEB 单位为元·hm<sup>-2</sup>,产量收益用当前水稻价格(2260 元·t<sup>-1</sup>)和水稻产量来计算;农业活动成本根据现行定价包括机械耕作费用(1200 元·hm<sup>-2</sup>)、秸秆还田费用(1250 元·hm<sup>-2</sup>)、种子(1250 元·hm<sup>-2</sup>)、化肥(2282 元·hm<sup>-2</sup>)、硝化抑制剂(DCD)(495 元·hm<sup>-2</sup>)、农药和除草剂(1125 元·hm<sup>-2</sup>)、机械收获(1200 元·hm<sup>-2</sup>);GWP 成本根据碳交易价格(103.7 元·t<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>-eq)和 GWP 计算<sup>[24]</sup>。

##### 1.5.6 数据处理

运用 Excel 软件和 SPSS 16.0 软件进行数据统计

与分析,所有数据的测定结果均以平均值 $\pm$ 标准差的形式表示,用LSD进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻草还田下添加DCD对稻田 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 排放通量季节变化的影响

各处理在水稻生育期内 $\text{CH}_4$ 排放通量变化趋势基本相同,具有明显的季节性变化特征,呈现双峰型排放规律(图1)。 $\text{CH}_4$ 排放通量最高峰出现在分蘖期;中期烤田后, $\text{CH}_4$ 排放通量逐渐降低;重新灌水以后,孕穗期又出现一个短暂且微弱的排放峰,随后 $\text{CH}_4$ 排放通量均下降,至成熟期, $\text{CH}_4$ 排放通量几乎为零。最大峰值出现时, $\text{CH}_4$ 排放通量为 $\text{CF}+\text{S}>\text{CF}+\text{S}+\text{DCD}>\text{CF}>\text{CF}+\text{DCD}>\text{CK}$ ,分别达到36.46、31.82、27.42、23.91、20.46  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。 $\text{CH}_4$ 排放通量高峰出现在水稻分蘖期,可能是由于这一时期水稻生长最为旺盛,光合作用最强,生成的光合作用产物多,向根系输送光合产物也多,并且该时期土壤温度较高,水稻完全处于淹水状态,土壤处于还原环境条件下,这些条件有利于稻田产甲烷菌的快速增长和活性提高,从而导致大量

$\text{CH}_4$ 排放<sup>[22-23]</sup>。第二个排放峰出现在水稻孕穗期,可能与该时期水稻重新淹水有关,同时由于水稻根系和腐烂物质给土壤提供了较多的产 $\text{CH}_4$ 基质,有利于 $\text{CH}_4$ 的生成,此时 $\text{CH}_4$ 排放通量虽然小于水稻分蘖期,但却大于生育后期<sup>[24]</sup>。

水稻生长期内 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量季节变化规律与 $\text{CH}_4$ 完全不同(图2)。水稻生育前期 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量非常微弱;中期烤田后在开始干湿交替管理模式下,CK、CF和CF+DCD出现较大排放峰,此时排放通量为 $\text{CF}>\text{CK}>\text{CF}+\text{DCD}$ ,分别达到129.64、73.13  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和59.98  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;一周之后,CF+S和CF+S+DCD出现微弱排放峰,此时排放通量为 $\text{CF}+\text{S}>\text{CF}+\text{S}+\text{DCD}$ ,分别达到55.64  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和36.66  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;水稻生育后期 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量相对在逐渐减弱。

水稻生长期内 $\text{CO}_2$ 排放通量动态变化趋势相同(图3)。返青期 $\text{CO}_2$ 排放通量较小;进入分蘖期 $\text{CO}_2$ 排放通量逐渐增大,至水稻孕穗期、烤田期间出现最大排放峰,此时排放通量为 $\text{CF}+\text{S}+\text{DCD}>\text{CF}+\text{S}>\text{CF}+\text{DCD}>\text{CF}>\text{CK}$ ,分别达到1 683.38、1 651.66、1 387.36、1 329.62、662.02  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;水稻生育后期 $\text{CO}_2$ 排放

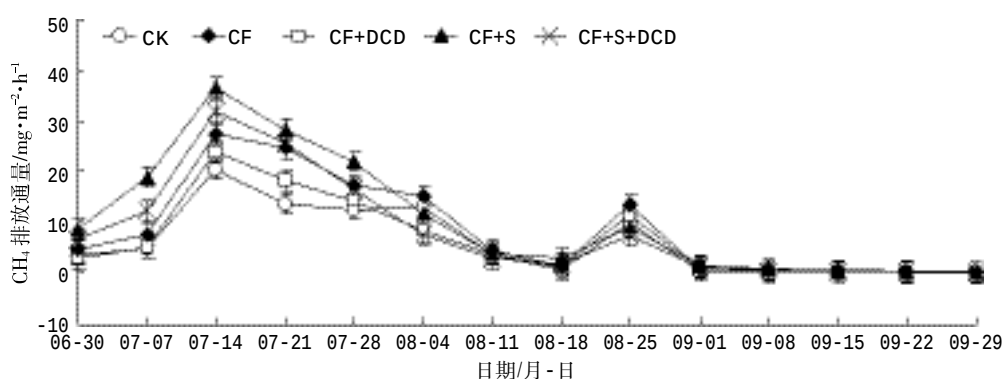


图1 稻草还田下添加DCD稻田 $\text{CH}_4$ 排放通量季节变化

Figure 1  $\text{CH}_4$  fluxes of DCD addition under rice straw return during rice growth

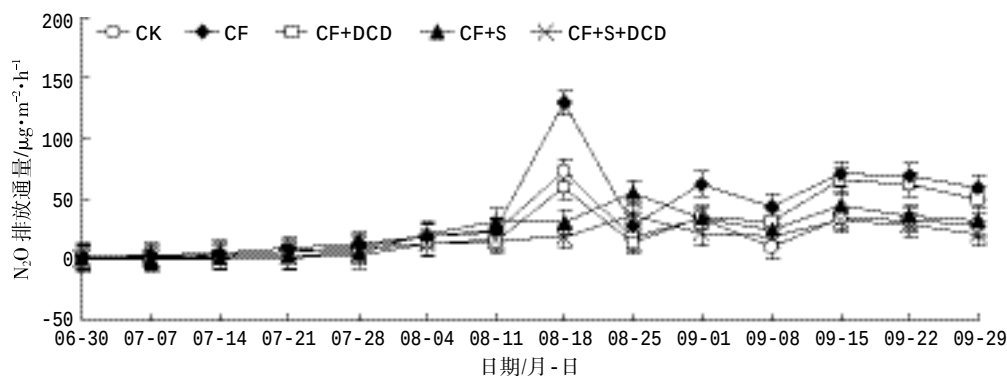


图2 稻草还田下添加DCD稻田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量季节变化

Figure 2  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes of DCD addition under rice straw return during rice growth

通量维持在较高状态。

## 2.2 稻草还田下添加 DCD 对稻田 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{CO}_2$ 累积排放量、增温潜势和 GWP 的影响

由图 4 可知, 稻田  $\text{CH}_4$  累积排放量以分蘖期占季节排放总量比例最大, 占排放总量的 46.2%~49.2%, 成熟期比例最低; 水稻成熟期  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量占季节排放总量比例最大, 占排放总量的 43.7%~63.5%, 返青期比例最低。添加 DCD 水稻分蘖期  $\text{CH}_4$  排放量是无添加 DCD 处理的 73.8%~81.8%, 添加 DCD 水稻成熟期稻田  $\text{N}_2\text{O}$  排放量是无添加 DCD 处理的 74.1%~81.3%, 表现出添加 DCD 对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的显著抑制作用。在整个水稻生长季节稻田  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量较为微弱,  $\text{N}_2\text{O}$  的累积排放主要集中在水稻生育后期。

从表 1 可以看出,  $\text{CH}_4$  季节累积排放量、 $\text{CH}_4$  季节增温潜势和综合温室效应大小顺序一致, 均为  $\text{CF}+$

$\text{S} > \text{CF} > \text{CF} + \text{S} + \text{DCD} > \text{CF} + \text{DCD} > \text{CK}$ 。  $\text{CH}_4$  季节累积排放量范围为  $135.14 \sim 231.43 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 添加 DCD 均极显著 ( $P < 0.01$ ) 降低  $\text{CH}_4$  排放。CF 与  $\text{CF} + \text{DCD}$  相比, 降幅为 23.2%;  $\text{CF} + \text{S}$  和  $\text{CF} + \text{S} + \text{DCD}$  相比, 降幅为 20.7%。添加 DCD 均极显著 ( $P < 0.01$ ) 降低  $\text{N}_2\text{O}$  排放, CF 与  $\text{CF} + \text{DCD}$  相比, 降幅为 33.3%;  $\text{CF} + \text{S}$  和  $\text{CF} + \text{S} + \text{DCD}$  相比, 降幅为 31.9%。添加 DCD 对水稻生育期内  $\text{CO}_2$  排放影响不明显。添加 DCD 均显著 ( $P < 0.01$ ) 降低  $\text{CH}_4$  季节增温潜势, CF 与  $\text{CF} + \text{DCD}$  相比降幅为 23.1%,  $\text{CF} + \text{S}$  和  $\text{CF} + \text{S} + \text{DCD}$  相比, 降幅为 20.7%。  $\text{N}_2\text{O}$  季节累积排放量范围为  $0.36 \sim 0.91 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 大小顺序为  $\text{CF} > \text{CF} + \text{DCD} > \text{CF} + \text{S} > \text{CK} > \text{CF} + \text{S} + \text{DCD}$ , 秸秆还田可以减少稻田  $\text{N}_2\text{O}$  的排放并且减排效果明显。添加 DCD 均极显著 ( $P < 0.01$ ) 降低  $\text{N}_2\text{O}$  排放。CF 与  $\text{CF} + \text{DCD}$  相比, 降幅为 33.3%;  $\text{CF} + \text{S}$  和  $\text{CF} + \text{S} + \text{DCD}$  相比, 降幅为 31.9%。

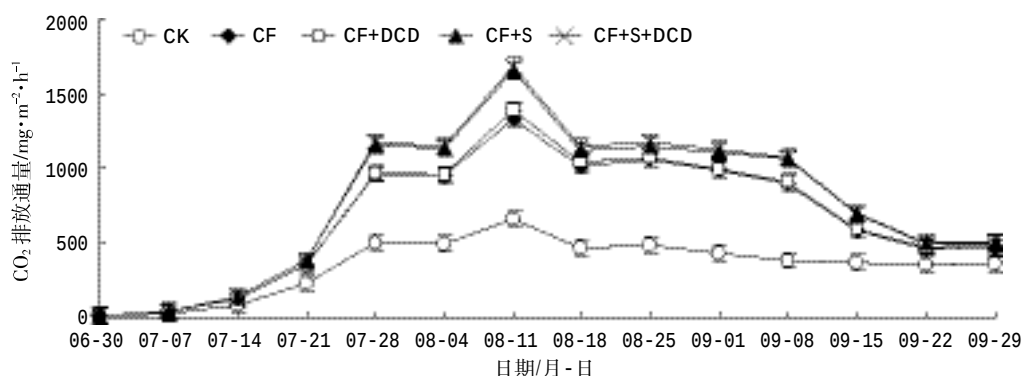
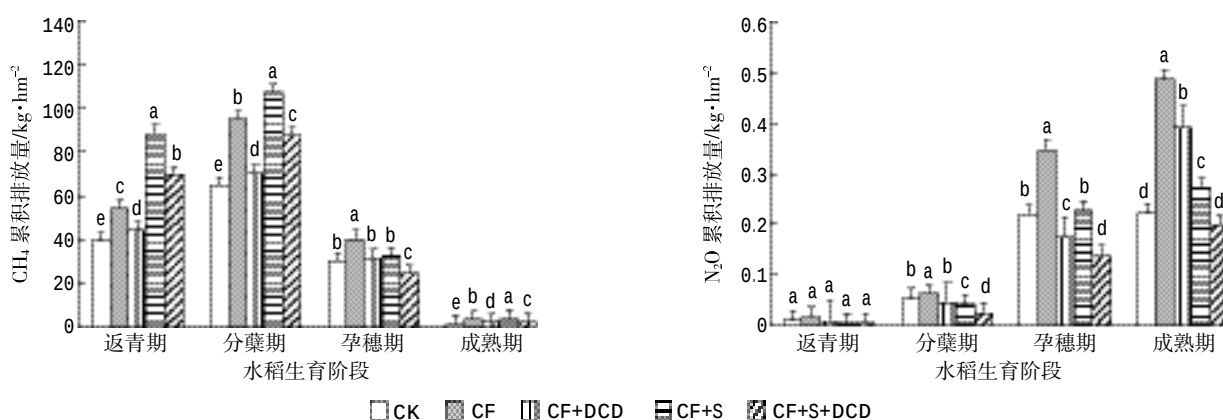


图 3 稻草还田下添加 DCD 稻田  $\text{CO}_2$  排放通量季节变化

Figure 3  $\text{CO}_2$  fluxes of DCD addition under rice straw return during rice growth



不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Data with different letters mean significant difference at 0.05 level

图 4 水稻不同生育期  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放量

Figure 4 Cumulative fluxes of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in different growth stages during rice growth

$N_2O$  季节增温潜势大小为  $CF > CF + DCD > CF + S > CK > CF + S + DCD$ 。添加 DCD 均极显著 ( $P < 0.01$ ) 降低  $N_2O$  季节增温潜势, CF 与  $CF + DCD$  相比降幅为 32.1%,  $CF + S$  和  $CF + S + DCD$  相比, 降幅为 33.1%。 $CH_4$  是稻田温室效应的最主要贡献者, 它对稻田温室效应的贡献远大于  $N_2O$  气体, 而  $N_2O$  对温室效应的贡献率小于 6%。添加 DCD 对综合温室效应产生显著影响,  $CF + S + DCD$  的综合温室效应分别比 CF 和  $CF + S$  降低了  $391.10 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $1\,249.14 \text{ kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 降幅为 7.68% 和 21.01%。该盆栽试验温室气体减排措施的减排效果均达到了极显著性差异 ( $P < 0.01$ )。

### 2.3 稻草还田下添加 DCD 对水稻产量、温室气体排放强度和净生态系统经济预算的影响

从表 2 可以看出, 添加 DCD 显著增加水稻产量,  $CF + DCD$  和  $CF + S + DCD$  与 CF 相比, 水稻产量分别提高了 9.5% 和 25.0%, 均达到极显著性差异。添加 DCD 可以显著降低温室气体排放强度, 温室气体排放强度大小顺序为  $CK > CF + S > CF > CF + S + DCD > CF + DCD$ ,  $CF + S + DCD$  和  $CF + DCD$  相比 CF 处理分别减少了 26.9% 和 31.2%, 均达到极显著差异性。由此得出,  $CF + S + DCD$  和  $CF + DCD$  为在增加水稻产量基础上减少温室气体排放的较优施肥措施。

在影响净生态系统经济预算 (NEEB) 的因素中,

农业活动成本在试验设计时已经是固定的。然而  $CF + DCD$ 、 $CF + S$  和  $CF + S + DCD$  的农业活动成本比 CK 多 495、1250 元和 1745 元, 是因为  $CF + DCD$  需要施用 DCD,  $CF + S$  需要稻草还田,  $CF + S + DCD$  需要稻草还田和施用 DCD。产量收益和 GWP 成本分别根据试验中水稻产量和综合温室效应 (GWP) 计算获得。净生态系统经济预算大小顺序为  $CF + S + DCD > CF + DCD > CF + S > CF > CK$ ,  $CF + S + DCD$  的净生态系统经济预算相比 CF 增加了 29.0%, 达到极显著差异性。添加 DCD 显著增加水稻产量和降低 GWP 成本。另外, 在同样的施肥条件下添加 DCD 使净生态系统经济预算显著增加 16.8%~20.1%。

### 2.4 温度与水位对稻田 $CH_4$ 、 $N_2O$ 和 $CO_2$ 排放相关性分析

稻田  $CH_4$ 、 $N_2O$  和  $CO_2$  排放受土壤类型、施肥种类及施用量、土壤温度、土壤水分等诸多因素的影响。温度和水位是影响  $CH_4$ 、 $N_2O$  和  $CO_2$  排放的重要环境因素。本试验条件下,  $CH_4$ 、 $N_2O$  和  $CO_2$  温室气体数据表明, 箱内温度与稻田水位对  $CH_4$ 、 $N_2O$  和  $CO_2$  的排放存在一定的影响 (表 3)。在淹水条件下, 箱内温度和稻田水位与稻田  $CH_4$  的排放均呈极显著线性正相关关系。在整个水稻生长期间, 温度和水位对  $N_2O$  排放的影响则与  $CH_4$  不一致, 温度和水位与  $N_2O$  排放之

表 1  $CH_4$ 、 $N_2O$ 、 $CO_2$  累积排放量和温室效应

Table 1 Cumulative emissions of  $CH_4$ ,  $N_2O$  and  $CO_2$  and global warming potential (100 a) during rice growth

| 处理 Treatment | $CH_4$ 累积排放量<br>$CH_4\text{-C/kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ | $N_2O$ 累积排放量<br>$N_2O\text{-N/kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ | $CO_2$ 累积排放量<br>$CO_2\text{-C/kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ | $CH_4$ 增温潜势 $GWP_{CH_4}/$<br>$\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ | $N_2O$ 增温潜势 $GWP_{N_2O}/$<br>$\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ | 综合温室效应 $GWP/$<br>$\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ |
|--------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| CK           | 135.14±0.44d                                          | 0.50±0.02c                                            | 8 166.08±3.05c                                        | 3 378.55±11.11d                                                            | 149.45±0.04d                                                               | 3 526.96±11.07e                                                |
| CF           | 192.72±2.23b                                          | 0.91±0.04a                                            | 15 505.72±11.21b                                      | 4 818.04±58.10b                                                            | 271.02±0.45a                                                               | 5 089.26±58.18b                                                |
| CF+DCD       | 147.99±0.23c                                          | 0.62±0.03b                                            | 15 775.91±2.49b                                       | 3 699.75±5.83c                                                             | 184.03±0.34b                                                               | 3 884.12±5.60d                                                 |
| CF+S         | 231.43±1.33a                                          | 0.54±0.03c                                            | 17 827.08±5.12a                                       | 5 785.76±33.26a                                                            | 161.35±0.34c                                                               | 5 945.89±32.97a                                                |
| CF+S+DCD     | 183.60±2.51b                                          | 0.36±0.02d                                            | 18 141.63±4.95a                                       | 4 589.99±62.79b                                                            | 107.97±0.29e                                                               | 4 696.98±63.01c                                                |

注: 平均值±标准差, n=3。同列不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Means±SD, n=3. Different letters in the same column mean significant difference at  $\alpha=0.05$  level between treatments. The same below.

表 2 不同处理下水稻产量、温室气体排放强度和净生态系统经济预算变化

Table 2 Changes in crop grain yields, GHGI and NEEB under different treatments

| 处理 Treatment | 产量 Yield/<br>$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ | 温室气体强度 GHGI/<br>$\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 产量收益 Economic<br>income/元· $\text{hm}^{-2}$ | 农业活动成本 Agriculture<br>activity costs/元· $\text{hm}^{-2}$ | GWP 成本 GWP costs/<br>元· $\text{hm}^{-2}$ | 净生态系统经济预<br>算 NEEB/元· $\text{hm}^{-2}$ |
|--------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| CK           | 3434±83d                                    | 1.03±0.03a                                                    | 7760±187.36d                                | 7057                                                     | 366±1.15e                                | 337±188.06e                            |
| CF           | 5508±262c                                   | 0.93±0.05b                                                    | 12 447±591.26c                              | 7057                                                     | 528±6.03b                                | 4862±594.94d                           |
| CF+DCD       | 6032±93b                                    | 0.64±0.01c                                                    | 13 633±209.82b                              | 7552                                                     | 403±0.58d                                | 5678±210.25b                           |
| CF+S         | 6259±172b                                   | 0.95±0.02b                                                    | 14 145±389.47b                              | 8307                                                     | 617±3.42a                                | 5221±386.87c                           |
| CF+S+DCD     | 6885±219a                                   | 0.68±0.02c                                                    | 15 560±494.03a                              | 8802                                                     | 487±6.53c                                | 6271±492.86a                           |

表 3 温度和水位与稻田 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放相关分析  
Table 3 Correlation analysis of temperature and water level with CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions in paddy field

| 气体排放<br>Gas emission | 温度 Temperature        |                |          |     | 水位 Water level        |                |          |     |
|----------------------|-----------------------|----------------|----------|-----|-----------------------|----------------|----------|-----|
|                      | 回归曲线 Regression curve | R <sup>2</sup> | P        | n   | 回归曲线 Regression curve | R <sup>2</sup> | P        | n   |
| CH <sub>4</sub>      | y=2.53x-71.98**       | 0.478 7        | <0.000 1 | 165 | y=5.28x-7.87**        | 0.288 0        | 0.000 6  | 165 |
| N <sub>2</sub> O     | y=-4.35x+161.79**     | 0.314 6        | <0.000 1 | 210 | y=-4.74x+37.33**      | 0.101 8        | <0.000 1 | 210 |
| CO <sub>2</sub>      | y=62.36x-1 056.75**   | 0.316 1        | <0.000 1 | 150 | y=-103.69x+911.62**   | 0.141 6        | <0.000 1 | 210 |

注: \* 表示 P<0.05, \*\* 表示 P<0.001。  
Note: \*mean P<0.05, \*\*mean P<0.001.

表 4 不同处理下土壤养分状况  
Table 4 Soil nutrient contents under different treatments

| 处理 Treatment | pH         | 有机质 Organic matter/g·kg <sup>-1</sup> | 全氮 Total N/g·kg <sup>-1</sup> | 硝态氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /mg·kg <sup>-1</sup> | 铵态氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /mg·kg <sup>-1</sup> | 速效磷 Available P/mg·kg <sup>-1</sup> | 速效钾 Available K/mg·kg <sup>-1</sup> |
|--------------|------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| CK           | 4.64±0.01b | 21.32±0.27b                           | 1.62±0.003b                   | 3.26±0.12c                                            | 23.43±1.37c                                           | 13.08±0.16a                         | 83.95±1.23c                         |
| CF           | 4.68±0.04b | 22.19±0.16b                           | 1.70±0.001b                   | 3.78±0.21b                                            | 27.16±2.15b                                           | 13.29±0.06a                         | 94.35±0.72b                         |
| CF+DCD       | 4.81±0.08b | 22.28±0.09b                           | 1.71±0.002b                   | 3.59±0.08b                                            | 27.94±1.82b                                           | 13.42±0.25a                         | 91.36±0.85b                         |
| CF+S         | 4.86±0.02b | 25.46±0.41a                           | 1.79±0.004a                   | 4.27±0.16a                                            | 29.32±1.67a                                           | 13.41±0.19a                         | 105.44±2.19a                        |
| CF+S+DCD     | 5.17±0.03a | 25.72±0.23a                           | 1.80±0.002a                   | 4.02±0.05a                                            | 30.61±3.08a                                           | 13.49±0.10a                         | 105.72±0.85a                        |

间均呈极显著负相关关系。CO<sub>2</sub> 排放与温度之间呈极显著正相关关系,与水位之间呈极显著负相关关系。

2.5 稻草还田下添加 DCD 对土壤养分状况的影响

从表 4 可以看出,不施氮肥处理由于地力的消耗使稻田土壤的养分含量逐渐减少。与 CF 相比,CF+S 和 CF+S+DCD 显著提高土壤有机质、全氮、硝态氮、铵态氮和速效钾含量。pH 值、有机质、全氮、铵态氮、速效磷和速效钾含量均在 CF+S+DCD 处理中最高,秸秆还田下添加 DCD 在提高土壤养分方面的作用最为明显。与不添加 DCD 相比,添加 DCD 可降低硝态氮含量,提高铵态氮含量。

3 讨论

3.1 添加 DCD 对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响

稻田 CH<sub>4</sub> 排放主要由甲烷产生、甲烷氧化和甲烷从土壤传送到大气三个过程决定。甲烷产生过程由产甲烷菌来完成,施入 DCD 可有效控制稻田 CH<sub>4</sub> 排放,其原因可能是 DCD 抑制产甲烷菌和甲烷氧化菌的活性<sup>[25-26]</sup>。CH<sub>4</sub> 氧化过程能消耗掉稻田土壤产生 CH<sub>4</sub> 总量的 50%~90%<sup>[27]</sup>,主要发生在根际土壤界面和水土界面这两个氧气较富足的区域,而其氧化过程主要由 CH<sub>4</sub> 氧化菌和氨氧化菌完成。本研究中施用 DCD 可提高稻田土壤铵态氮含量,可能是因为施入 DCD 可延缓 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的形成并削弱硝化作用,使土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量增加,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>浓度增大,而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>促进甲烷氧化菌的生长和甲烷氧化,从而导致 CH<sub>4</sub> 排放减少<sup>[28]</sup>。

也有研究发现大量存在的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>抑制 CH<sub>4</sub> 氧化,抑制的原因是 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和 CH<sub>4</sub> 具有相似的分子结构,竞争 CH<sub>4</sub> 氧化菌酶系统相同的位点,降低了 CH<sub>4</sub> 氧化酶的活性,从而抑制 CH<sub>4</sub> 氧化的作用,促进 CH<sub>4</sub> 的排放<sup>[29-30]</sup>。水稻在淹水厌氧情况下施入 DCD 可减少 CH<sub>4</sub> 的排放,可能是因为 DCD 与尿素混施显著增加地上部分水稻植株生物量,水稻根际呈现较强的氧化状态,提高水稻根际氧化 CH<sub>4</sub> 能力,从而降低 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[31]</sup>。研究还发现施入 DCD 能提高水稻根际的土壤 Eh,特别是水稻生长旺盛的分蘖期,土壤 Eh 越高,CH<sub>4</sub> 排放越少<sup>[32]</sup>。

稻田 N<sub>2</sub>O 排放是由 N<sub>2</sub>O 产生、转化和传输三个过程共同作用的结果。稻田 N<sub>2</sub>O 产生是一个复杂的物理、化学和生物学过程,主要是在土壤微生物的参与下,通过硝化作用、反硝化作用、硝态氮异化还原成铵作用(DNRA)及化学反硝化作用完成的。在水稻生长季节淹水期间,由于极端土壤还原条件,土壤产生的 N<sub>2</sub>O 可被进一步还原转化为 N<sub>2</sub>。添加 DCD 对 N<sub>2</sub>O 的排放具有明显的抑制作用,可能是由于 DCD 通过抑制硝化细菌的氨单加氧酶(AMO)活性延缓 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>氧化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的进程,从而延缓了 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的形成,影响 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的转化过程,降低微生物的硝化作用,因此也降低了后续反硝化 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的可用性。已有研究发现,DCD 能有效抑制土壤中硝化和反硝化作用的进行,降低 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 转化过程进而减少 N<sub>2</sub>O 的产生<sup>[33]</sup>。本研究中添加 DCD 土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量增加,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量降低就证明了这一点(表

4)。此外,硝化产物中  $\text{N}_2\text{O}$  比例下降可能是  $\text{N}_2\text{O}$  排放降低的另一原因<sup>[34]</sup>。Lan 等<sup>[14]</sup>报道 DCD 除了对硝化进程产生影响外,同样可减少硝化产物中  $\text{N}_2\text{O}$  的比例。本研究中施用 DCD 可提高稻田土壤 pH 值,可能是因为施用 DCD 削弱了硝化作用,减弱了硝化过程产生的氢离子引起的酸化作用,从而使土壤 pH 值升高。翟胜等<sup>[35]</sup>报道土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量随酸化程度的加深而增加。本研究也发现在酸性土壤中添加 DCD 能提高土壤 pH 值,减少  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。因此,酸性土壤施用 DCD 对抑制  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放有较好的效果。

### 3.2 添加 DCD 对水稻产量、GWP、GHGI 和 NEEB 的影响

添加 DCD 显著增加水稻产量可能是由于 DCD 能提高氮肥利用率,增加土壤氮的生物有效性和作物对氮的吸收,使土壤中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度升高,而水稻主要以  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  形式吸收氮,从而促进水稻生长。同时 DCD 也是一种缓释肥料(含氮量为 66.7%),在土壤中最最终被分解为  $\text{CO}_2$  和  $\text{NH}_4^+$ ,不会对土壤产生不良影响。Ghosh 等<sup>[36]</sup>研究发现,硝化抑制剂 DCD 与尿素混施可提高水稻产量和生物量,但水稻分蘖数几乎不受影响。本研究中,添加 DCD 可以显著降低 GWP 和 GHGI。与不添加 DCD 相比,传统施肥稻草还田下添加 DCD 可使 GWP 和 GHGI 降低的比例分别为 21.01% 和 28.42%。但该结果只是稻草还田下盆栽试验 1 年的表现,还需要长期的大田试验来证实。

NEEB 可用来表示不同农业措施下农艺生产力和环境可持续性之间的关系(例如,温室气体排放量),直接影响政府决策和农民参与的热情程度<sup>[24]</sup>,为政府部门指导农民制定相关农业政策提供科学依据<sup>[13]</sup>。但稻草还田下添加 DCD 对 NEEB 影响几乎没人关注。许多研究主要集中在添加抑制剂对水稻经济效益的影响<sup>[26,37]</sup>,然而这些研究在计算中没有包括 GWP 成本。稻草还田下添加 DCD 施肥技术的综合经济评价系统不仅要考虑水稻产量收益和农业活动成本,也要把 GWP 成本考虑进去。本研究发现,与 CF 相比 CF+S+DCD 显著增加 NEEB,表明稻草还田下添加 DCD 可能是水稻生产中提供高经济效益和环境效益最为合适的农业战略。

## 4 结论

添加 DCD 可有效控制稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放,而对  $\text{CO}_2$  排放影响不明显。与传统施肥稻草还田相比,

稻草还田下添加 DCD 未显著影响水稻生育期内稻田的  $\text{CO}_2$  排放,但可显著降低 20.7% 的  $\text{CH}_4$  排放和 31.9% 的  $\text{N}_2\text{O}$  排放,显著降低 21.01% 和 28.42% 的 GWP 和 GHGI,显著增加 10.0% 的水稻产量和 20.1% 的 NEEB。总的来看,稻草还田下添加 DCD 是一种科学有效和经济可行的温室气体减排措施。

**致谢:**中国科学院重庆绿色智能技术研究院的崔键副研究员和中国科学院南京土壤研究所的程宜副研究员在本文中英文摘要写作等上的建议和指导!

### 参考文献:

- [1] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), Climate Change 2013: The Physical Science Basis[C].
- [2] Sussmann R, Forster F, Rettinger M, et al. Renewed methane increase for five years (2007—2011) observed by solar FTIR spectrometry[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2012, 12(11): 4885-4891.
- [3] Smith B P. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2008, 363(1492): 789-813.
- [4] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, et al. Methane emissions from rice paddies natural wetlands, lakes in China: Synthesis new estimate[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 19-32.
- [5] Liu X B, Zeng Y Z, Wang H Y. Impact of long-term fertilization on the composition of denitrifier communities based on nitrite reductase analyses in a paddy soil[J]. *Microbial Ecology*, 2010, 60(4): 850-861.
- [6] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 118(1/2/3/4): 6-28.
- [7] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(9): 659-662.
- [8] Park S, Croteau P, Boering K A, et al. Trends and seasonal cycles in the isotopic composition of nitrous oxide since 1940[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(4): 261-265.
- [9] 朱德峰, 陈惠哲, 徐一成, 等. 我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策[J]. *中国稻米*, 2013, 19(4): 1-4.  
ZHU De-feng, CHEN Hui-zhe, XU Yi-cheng, et al. Double cropping rice production mechanization factors and development countermeasures in China[J]. *China Rice*, 2013, 19(4): 1-4.
- [10] 毕于运, 王红彦, 王道龙, 等. 中国稻草资源量估算及其开发利用[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(15): 137-143.  
BI Yu-yun, WANG Hong-yan, WANG Dao-long, et al. Estimation and utilization of rice straw resources in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(15): 137-143.
- [11] Hang X L, Zhang X, Song C L, et al. Differences in rice yield and  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions among mechanical planting methods with straw incorporation in Jianghuai area, China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 144(4): 205-210.
- [12] Wang J Y, Zhang X L, Xiong Z Q, et al. Methane emissions from a rice agroecosystem in South China: Effects of water regime, straw incorpora-



- tion and nitrogen fertilizer[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(1):103-112.
- [13] Zhang Z S, Guo L J, Liu T Q, et al. Effects of tillage practices and straw returning methods on greenhouse gas emissions and net ecosystem economic budget in rice-wheat cropping systems in Central China[J]. *Journal of Development Economics*, 2015, 65(2):291-306.
- [14] Lan T, Han Y, Roelcke M, et al. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on gross N transformation rates and mitigating  $\text{N}_2\text{O}$  emission in paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 67: 174-182.
- [15] Li X L, Zhang X Y, Hua X, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy soil as influenced by timing of application of hydroquinone and dicyandiamide[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 85(1):31-40.
- [16] 周礼恺, 徐星凯, 陈利军, 等. 氢醌和双氰胺对种稻土壤  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  排放的影响[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(2):189-192.  
ZHOU Li-kai, XU Xing-kai, CHEN Li-jun, et al. Effect of hydroquinone and dicyandiamide on  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  emissions from lowland rice soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(2):189-192.
- [17] Linquist B A, Adviento-Borbe M A, Pittelkow C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis[J]. *Field Crops Research*, 2012, 135(30):10-21.
- [18] Frolik S, Li C S, Braswell R, et al. Short- and long-term greenhouse gas and radioactive forcing impacts of changing water management in Asian rice paddies[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(7):1180-1196.
- [19] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing [C]//Climate change: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [20] Herzog T, Baumert K A, Pershing J. Target-Intensity: An analysis of greenhouse gas intensity targets [M]. Washington, USA: World Resources Institute, 2006.
- [21] Li B, Fan C H, Zhang H, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in Southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 100: 10-19.
- [22] 闵航, 陈美慈, 钱泽澍. 水稻田的甲烷释放及其生物学机理[J]. *土壤学报*, 1993, 30(2):129-130.  
MIN Hang, CHEN Mei-ci, QIAN Ze-shu. Release of methane in paddy soil and its biological mechanism[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(2):129-130.
- [23] 易琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8):1432-1437.  
YI Qiong, PANG Yu-wan, YANG Shao-hai, et al. Methane and nitrous oxide emissions in paddy field as influenced by fertilization[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8):1432-1437.
- [24] 刘金剑, 吴萍萍, 谢小立, 等. 长期不同施肥制度下湖南红壤晚稻田  $\text{CH}_4$  的排放[J]. *生态学报*, 2008, 28(6):2878-2886.  
LIU Jin-jian, WU Ping-ping, XIE Xiao-li, et al. Methane emission from late rice fields in Hunan red soil under different long-term fertilizing systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6):2878-2886.
- [25] Lindau C W, Bollich P K, Delaune R D, et al. Methane mitigation in flooded Louisiana rice fields[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1993, 15(3): 174-178.
- [26] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 氢醌、双氰胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5):917-924.  
LI Xiang-lan, XU Hua, CAI Zu-cong. Effect of combined use of hydroquinone and dicyandiamide on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from rice paddy field: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5):917-924.
- [27] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001:83-172.  
WANG Ming-xing. Methane emission from rice fields in China [M]. Beijing: Science Press, 2001:83-172.
- [28] Schimel J. Global change: Rice, microbes and methane[J]. *Nature*, 2000, 403:375-377.
- [29] Cai Z C, Mosier A R. Effect of  $\text{NH}_4\text{Cl}$  addition on methane oxidation by paddy soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(11/12):1537-1545.
- [30] Gulledge J, Doyle A P, Schimel J P. Different  $\text{NH}_4^+$  inhibition patterns of soil  $\text{CH}_4$  consumption: A result of distinct  $\text{CH}_4$  oxidizer populations across sites[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29(1):13-21.
- [31] Xu X K, Wang Y S, Zheng X H, et al. Methane emission from a simulated rice field ecosystem as influenced by hydroquinone and dicyandiamide[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 263(1/2/3):243-253.
- [32] Xu X, Boeckx P, Cleemput O V, et al. Mineral nitrogen in a rhizosphere soil and in standing water during rice (*Oryza sativa* L.) growth: Effect of hydroquinone and dicyandiamide[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 109(1/2):107-117.
- [33] 吴得峰, 姜继韶, 高兵, 等. 添加 DCD 对雨养区春玉米产量、氧化亚氮排放及硝态氮残留的影响研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1):30-39.  
WU De-feng, JIANG Ji-shao, GAO Bing, et al. Effects of DCD addition on grain yield,  $\text{N}_2\text{O}$  emission and residual nitrate-N of spring maize in rain-fed agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1):30-39.
- [34] Liu G, Yu H Y, Zhang G B, et al. Combination of wet irrigation and nitrification inhibitor reduced nitrous oxide and methane emissions from a rice cropping system[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 190(23):1-11.
- [35] 翟胜, 高宝玉, 王巨媛, 等. 农田土壤温室气体产生机制及影响因素研究进展[J]. *生态环境学报*, 2008, 17(6):2488-2493.  
ZHAI Sheng, GAO Bao-yu, WANG Ju-yuan, et al. Mechanism and impact factors of greenhouse gases generation from farmland[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6):2488-2493.
- [36] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India[J]. *Chemosphere*, 2003, 51(3): 181-195.
- [37] 贺非, 马友华, 杨书运, 等. 不同施肥技术对单季稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(10):2093-2098.  
HE Fei, MA You-hua, YANG Shu-yun, et al. Effects of different fertilization techniques on the emission of methane and nitrous oxide from single cropping rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10):2093-2098.