

施氮量及抑制剂配比对双季稻生长期温室气体排放的影响

刘昭兵^{1,2}, 纪雄辉^{1,2*}, 彭华^{1,2}, 石丽红^{1,2}, 田发祥^{1,3}, 石生伟⁴

1. 湖南省农业科学院土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125; 2. 湖南省农业科学院农业环境研究中心, 湖南 长沙 410125;

3. 中南大学研究生院隆平分院, 湖南 长沙 410125; 4. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

摘要:采用静态箱-气相色谱法研究了南方稻田不同施氮量及抑制剂配比对双季稻生长期内 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放的影响。结果表明, 双季稻田施氮与抑制剂配合施用的 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 总排放量明显低于对照(常规施肥), 其中 CH_4 总排放量降低了 7.6%~36.4%, N_2O 降低了 25.8%~29.9%, CO_2 降低了 17.7%~30.4%。早稻收获后各处理土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量存在明显差异, 添加抑制剂处理的土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量均高于对照, 增幅为 25.1%~77.0%, 土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 以早稻移栽前基施 N 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 配合 12‰NAM 和晚稻追施 N 30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理比对照降低了 61.8%($P < 0.05$), 而基施 N 330 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 配合 8‰NAM 处理可能因早稻施氮过量反而高于对照。表明合理的施氮量及抑制剂添加比例能有效提高土壤中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量, 减少 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 残留, 从而达到降低双季稻期间稻田温室气体排放的效果, 为进一步利用抑制剂(NAM)与 N、P、K 化肥合理配比并形成复配肥, 构建南方双季稻田温室气体减排的新型施肥模式提供技术支撑。

关键词: 施氮量; 抑制剂; 双季稻; 温室气体

中图分类号: X16

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 04-0919-07

CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是导致全球气候变暖的几种重要温室气体之一^[1]。虽然大气中 CH_4 和 N_2O 的浓度远低于 CO_2 , 但两者单分子的增温潜势却分别是 CO_2 的 23 倍和 296 倍^[2]。稻田被认为是大气 CH_4 和 N_2O 的重要排放源之一, 其中 CH_4 排放量占全球总排放量的 5%~19%^[3], 因此, 稻田温室气体效应已成为农业排放源中的研究热点。中国是世界上最大的水稻生产国, 水稻种植面积约占世界稻田总面积的 22%, 产量约占世界水稻产量的 38%^[4]。湖南为我国水稻生产大省, 也是南方典型的双季稻生产区, 观测双季稻期间稻田 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放对进一步了解南方双季稻期间稻田温室气体排放特征及规律具有重要意义。

目前国内外已有不少关于施氮肥对温室气体排放影响的研究报道^[5-11], 研究内容包括施肥方式和肥料用量等对温室气体排放的影响, 但在肥料中添加抑制剂施用对稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 三种温室气体排放的影响尚鲜有报道。本文针对南方典型的双季稻生产区, 在田间条件下研究了不同施氮量及抑制剂配比对双季稻生长期间稻田 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放的影响, 以探索稻田温室气体减排新措施, 为进一步了解双季稻生长期内稻田温室气体排放规律提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地点位于湖南省长沙县干杉乡 (N 28°8'31", E 113°12'5"), 海拔 42 m, 年平均温度为 17.1 °C, 年降水量 1500 mm, 年 ≥10 °C 积温 5 300~6 500 °C, 为南方典型的双季稻生产区。土壤类型为第四纪红壤发育的红黄泥水稻土, 化学性状: 有机质 28.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮为 1.78 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 10.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效钾 315.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 5.90。

1.2 供试材料

抑制剂(商品名: NAM)成分中含有一定比例的脲酶抑制剂和硝化抑制剂, 为沈阳中科新型肥料有限公司生产。各处理施用量以每 100 kg 肥料含 N、 P_2O_5 、 K_2O 各 40 kg 作为标准的抑制剂施用比例折算, 与肥料混匀后施用。供试早稻品种为中嘉早 7 号, 2009 年 4 月 28 日插秧, 7 月 16 日收割, 晚稻品种为岳优 360, 2009 年 7 月 20 日插秧, 10 月 3 日收割。

1.3 试验设计

采用田间小区试验, 设置 4 个处理: 1) N150+N180(常规施肥): 早晚稻施氮量分别为 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 均按基 N 80%、蘖 N 20% 的比例施入。2) N300+8‰NAM: 氮用量为 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 并添加 8‰NAM 与 NPK 化肥混匀后作为早稻一次性基肥施入。3) N330+8‰NAM: 氮用量为 330 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 添加 8‰NAM 与 NPK 肥混匀后作为早稻一次性基肥施入。4) N240+N30+12‰NAM:

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2007BAD89B11; 2008BAD95B02)

作者简介: 刘昭兵(1979 年生), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事农业生态环境方面的研究。E-mail: liuzhaobing_168@yahoo.com.cn

*通讯作者: 纪雄辉, 研究员, 博士。E-mail: jixionghui@sohu.com

收稿日期: 2010-02-23

早稻施氮量为 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 并添加 12‰NAM 与 NPK 化肥混匀后作为一次性基肥施入, 晚稻分蘖期追施氮 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。肥料品种为尿素、过磷酸钙和氯化钾, 所有处理早晚稻 P_2O_5 施用量均为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 早晚稻 K_2O 施用量分别为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。每个处理重复 3 次, 共 12 个小区 ($4 \text{ m} \times 5 \text{ m}=20 \text{ m}^2$), 采用早稻翻耕, 晚稻免耕, 除施肥外其他田间管理措施按照当地习惯。

1.4 采样方法及测定指标

采用静态暗箱—气相色谱法监测温室气体排放。采样箱为玻璃钢材料制成, 每次采样前在底座水槽内加水以保证密封, 在箱体与底座密封 0、5、10、15、20 min 时采用 60 mL 注射器采集气样, 同时记录每个小区的水层深度。秧苗移栽后第二天开始采样, 时间为早上 9:00~10:30, 在水稻生长期每隔 3 天采样 1 次, 采样过程参考文献[12]。土壤温度 (5 cm) 和箱内气体温度 (离地面 10 cm) 采用双探头温度记录仪 (HOBO Pro-U23003, 美国) 测定。 CH_4 和 CO_2 浓度采用气相色谱(Agilent7890A, 美国) 测定, 检测器为火焰离子检测器, 温度 200°C , 柱温 55°C , N_2O 检测器为电子捕获检测器, 温度为 330°C , 标准气体由国家标准物质中心提供。早稻收获时每小区取 0~10 cm 耕层混合样, 用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCL 溶液 (液土比 5:1) 振荡浸提 1 h 后用流动分析仪 (Foss, 瑞典) 测定 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度, 同步测定土壤水分含量以折算成干土含量。

1.5 计算及统计方法

稻田 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 排放通量计算公式如下 [13]:

$$F = \rho \cdot h \cdot dc/dt \cdot 273/(273+T)$$

F 为排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), ρ 为 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 在标准状态下的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), h 是采样箱高度 (m), dc/dt 为采样过程中采样箱内 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 的浓度变化率 ($\text{ppmv} \cdot \text{h}^{-1}$), T 为采样箱内的平均温度 ($^\circ\text{C}$)。运用 Excel 2003 和 DPS 3.0 进行统计和方差分析 (LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥用量添加抑制剂处理的土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的质量分数差异

2.1.1 NO_3^- -N

由表 1 可以看出, 不同氮肥 (尿素) 用量添加抑制剂处理对土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的质量分数有显著影响。以 N150+N180 (常规施肥) 处理为对照, 与其相比, N300+8‰NAM 处理的土壤 NO_3^- -N 的质量分数有所降低, 降幅为 28.5% ($P > 0.05$), 虽然该处理早稻施氮量高出对照 1 倍, 但早稻收获后土壤中 NO_3^- -N 的质量分数却低于对照, 说明添加 8‰

表 1 早稻收获后各处理土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的质量分数

Table 1 NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents in soil after early rice harvested
 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

处理	NO_3^- -N	NH_4^+ -N
N150+N180	7.26 ± 1.78 ab	9.32 ± 1.60 b
N300+8‰NAM	5.19 ± 2.27 bc	11.66 ± 1.87 ab
N330+8‰NAM	9.62 ± 2.17 a	13.39 ± 2.74 ab
N240+N30+12‰NAM	2.77 ± 0.50 c	16.50 ± 3.69 a

同列数据后小写字母代表 LSD 法多重比较差异显著 ($P < 0.05$)。

抑制剂处理明显抑制了尿素的水解及 NH_4^+ -N 的硝化, 减少了土壤中 NO_3^- -N 残留。而 N330+8‰NAM 处理的土壤 NO_3^- -N 的质量分数比对照处理增加 32.5% ($P > 0.05$), 可能是该处理氮肥过量, 虽然添加 8‰抑制剂处理能够在一定程度上抑制尿素的水解和 NH_4^+ -N 的硝化, 但土壤中仍有较多的 NO_3^- -N 残留。N240+N30+12‰NAM 处理的土壤 NO_3^- -N 的质量分数最低, 比对照处理降低 61.8% ($P < 0.05$), 说明添加 12‰抑制剂处理能显著减少土壤中 NO_3^- -N 残留。

2.1.2 NH_4^+ -N

早稻收获后各处理土壤 NH_4^+ -N 的质量分数情况与 NO_3^- -N 有所不同, 表现为所有添加抑制剂处理的土壤 NH_4^+ -N 的质量分数均高于对照。其中 N300+8‰NAM 和 N330+8‰NAM 处理的土壤 NH_4^+ -N 的质量分数分别高出对照处理 25.1% ($P > 0.05$) 和 43.7% ($P > 0.05$), 表明在抑制剂添加比例相同的条件下, 施氮量越高, 土壤中 NH_4^+ -N 的质量分数也越高, 可能是脲酶抑制剂延缓尿素水解和硝化抑制剂控制铵硝化的综合作用所致。N240+N30+12‰NAM 处理的土壤 NH_4^+ -N 的质量分数高出对照 77.0% ($P < 0.05$), 与 N300+8‰NAM、N330+8‰NAM 处理相比, 虽然前者的早稻施氮量明显低于后两个处理, 但其土壤中 NH_4^+ -N 的质量分数却高于后两个处理, 说明提高抑制剂与肥料的用量配比, 通过延缓尿素的水解和铵的硝化, 可提高土壤中 NH_4^+ -N 的质量分数。

2.2 不同氮肥用量添加抑制剂处理的稻田 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放动态及排放总量差异

2.2.1 早晚稻生长期田间气温、土温和水层厚度变化

由图 1 可以看出, 早晚稻生长期土温和气温的趋势基本一致, 但早稻生长期温度较晚稻生长期波动幅度大。从田间水分情况来看, 早稻生长前期水层较厚, 后期落干, 干湿交替较为频繁, 晚稻生长期水层厚度变化不大, 趋势较为平缓。

2.2.2 CH_4 排放动态

早晚稻期间稻田 CH_4 排放动态变化如图 2 所示。总体上看, 各处理 CH_4 排放主要集中在早稻生

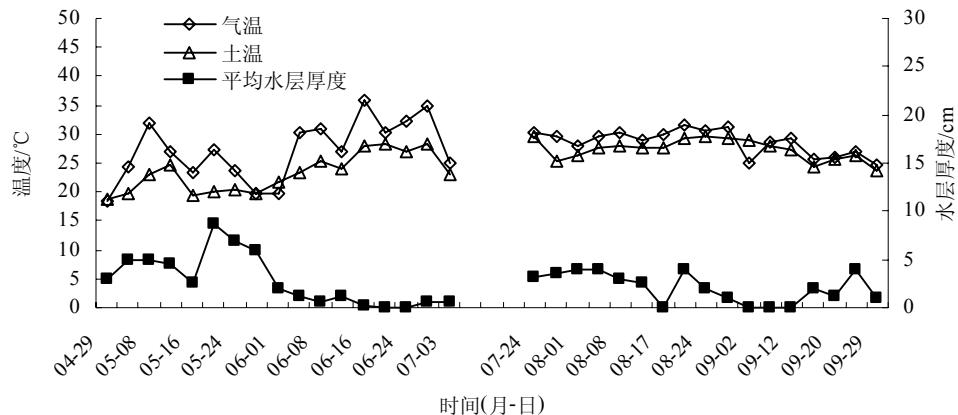
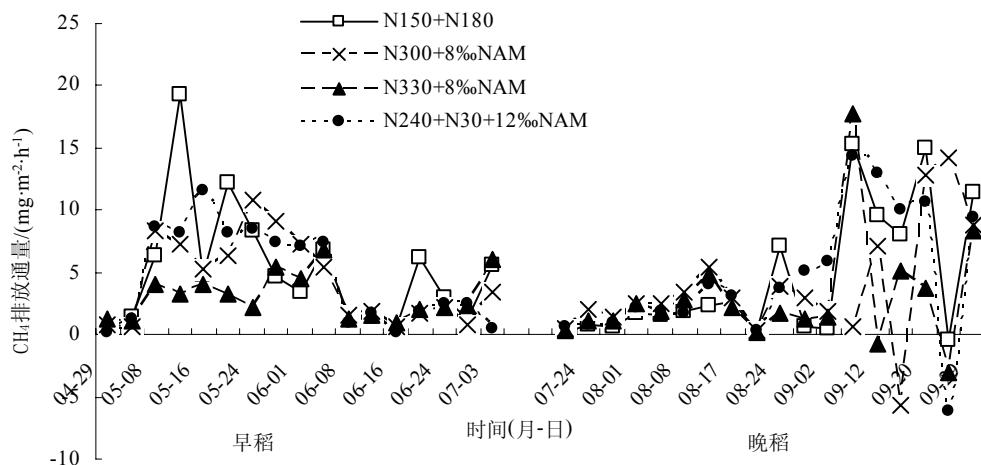


图 1 双季稻生长期的田间气温、土温及水层厚度变化

Fig.1 Changes of air temperature, soil temperature and water layer thickness during double-rice growing season

图 2 双季稻生长期间 CH_4 排放动态Fig.2 The CH_4 emission dynamics from paddy field during double-rice growing season

长前期(分蘖期和抽穗期)和晚稻生长后期(灌浆期和乳熟期)。早稻插秧后第11天各处理同时出现 CH_4 排放峰值, CH_4 强排放维持了29天,在此期间N150+N180、N300+8‰NAM、N330+8‰NAM和N240+N30+12‰NAM处理的 CH_4 排放量分别占相应处理早稻排放总量的58.9%、63.7%、48.3%和66.4%,排放通量表现为:N150+N180>N240+N30+12‰NAM>N300+8‰NAM>N330+8‰NAM。说明添加抑制剂处理明显抑制了该时期的 CH_4 排放。晚稻各处理 CH_4 排放峰值出现在插秧后第49天, CH_4 强排放维持了15天,较早稻时间短。该时期的排放通量为:N150+N180>N240+N30+12‰NAM>N330+8‰NAM>N300+8‰NAM。表明添加抑制剂处理同样对晚稻 CH_4 排放有抑制作用。而该时期为晚稻 CH_4 排放的决定时期,各处理 CH_4 排放量分别占晚稻排放总量的52.8%、55.9%、43.1%和19.4%。

早稻各处理 CH_4 排放出现最大峰值的时间不同,N150+N180、N300+8‰NAM、N330+8‰NAM和N240+N30+12‰NAM处理分别出现在插秧后第

15天、第27天、第39天和第19天。由此可见,添加抑制剂处理延迟了早稻 CH_4 排放出现最大峰值的时间。晚稻除N300+8‰NAM处理的 CH_4 排放最大峰值出现在插秧后第67天,其余3个处理均出现在插秧后第49天,说明晚稻已无明显差异。

2.2.3 N_2O 排放动态

由水稻生长期稻田 N_2O 排放动态可以看出,早稻插秧后第15天 N_2O 排放开始出现明显峰值,强排放维持了44天,这与该时期的水热状况相吻合(图3)。在此期间,N150+N180、N300+8‰NAM、N330+8‰NAM和N240+N30+12‰NAM处理的 N_2O 排放量分别占相应处理早稻排放总量的72.4%、64.3%、62.5%和63.9%。 N_2O 排放通量为:N150+N180>N330+8‰NAM>N240+N30+12‰NAM>N300+8‰NAM。说明添加抑制剂处理明显抑制了早稻该时期的 N_2O 排放。晚稻 N_2O 排放很少,主要出现在插秧后的1周左右,无明显规律,甚至出现吸收现象。早稻各处理 N_2O 排放出现最大峰值的时间基本一致,除N330+8‰NAM的最大峰值出现

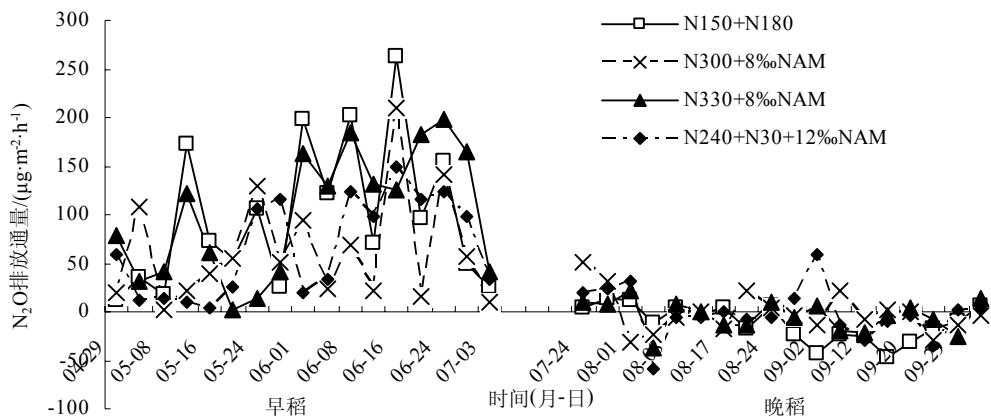


Fig.3 The N_2O emission dynamics from paddy field during double-rice growing season

在插秧后第58天外，其余3个处理的最大峰值均出现在插秧后第50天。

2.2.4 CO_2 排放动态

采用静态箱所测的 CO_2 排放通量实际为土壤排放与植株吸收量之差。从水稻生长期稻田 CO_2 排放动态(图4)可以看出，早稻插秧后第35天开始出现 CO_2 排放峰值， CO_2 强排放维持了33天，在此期间N150+N180、N300+8%NAM、N330+8%NAM和N240+N30+12%NAM处理的 CO_2 排放量分别占相应处理早稻排放总量的67.8%、65.5%、63.6%和70.2%，其排放通量为：N150+N180>N240+N30+12%NAM>N300+8%NAM>N330+8%NAM。晚稻在插秧后第16天开始出现 CO_2 排放峰值，强排放维持了26天，期间的 CO_2 排放通量为：N150+N180>N240+N30+12%NAM>N330+8%NAM>N300+8%NAM。此后 CO_2 排放明显减弱，甚至出现吸收现象。可见，添加抑制剂处理对早晚稻这两个时期 CO_2 排放的影响与 CH_4 、 N_2O 类似，均表现为较常规施肥排放减少。

2.2.5 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 的排放总量

由表2、3可知，各处理早稻和晚稻的 CH_4 排放总量与两季的总排放量趋势一致，均为N150+N180>N240+N30+12%NAM>N300+8%NAM>N330+8%NAM。其中添加抑制剂处理的 CH_4 总排放量均低于常规施肥处理，由此可见，添加抑制剂处理有利于降低稻田 CH_4 排放。就早稻生长季 CH_4 排放而言，随着早稻施氮量的增加， CH_4 排放减少。在抑制剂添加比例相同，氮用量不同的条件下，N330+8%NAM较N300+8%NAM处理的 CH_4 排放总量要低，说明增加氮肥施用量反而降低 CH_4 排放。

N_2O 在稻田排放量很少，早晚稻总排放量为：N330+8%NAM>N150+N180>N240+N30+12%NAM>N300+8%NAM。由于试验中稻季之间 N_2O 排放总量差异较大，早稻明显高于晚稻，因此早稻为 N_2O 排放的决定时期。从不同处理来看，N330+8%NAM处理的早稻施氮量最高，可能因早稻期间稻田干湿交替较为频繁导致土壤中发生剧烈的硝化与反硝化作用， N_2O 排放也随之较高。常规施肥处理(N150+N180)因尿素水解和铵硝化未被抑制，因此早稻期间的 N_2O 排放也较高。与常规

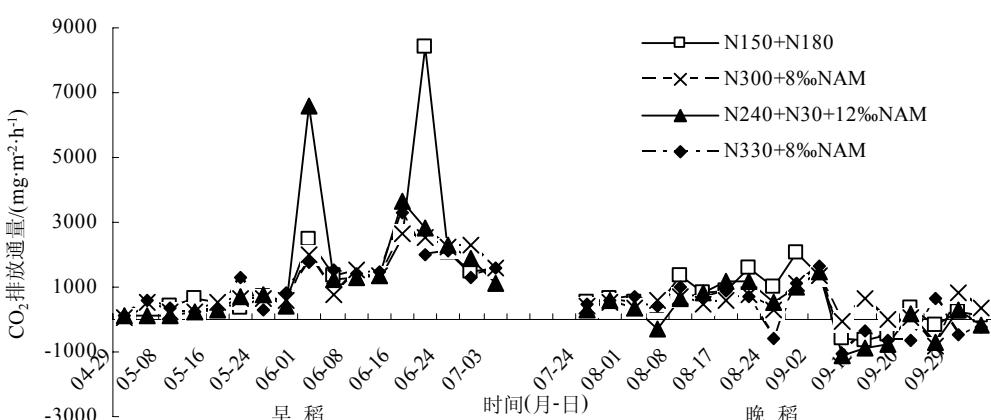


Fig.4 The CO_2 emission dynamics from paddy field during double-rice growing season

表 2 早晚稻期间不同氮肥用量添加 NAM 处理的 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放情况Table 2 The CH₄, N₂O and CO₂ emissions in different amount of nitrogen and NAM ratio treatment during early-late rice growing season

稻季	处理	CH ₄		N ₂ O		CO ₂	
		平均通量/(mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	总排量/(kg·hm ⁻²)	平均通量/(μg·m ⁻² ·h ⁻¹)	总排量/(kg·hm ⁻²)	平均通量/(mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	总排量/(kg·hm ⁻²)
早稻	N150+N180	5.13	97.34	98.22	1.86	1 548.7	29 364.1
	N300+8‰NAM	4.31	81.74	62.81	1.19	1 200.5	22 761.3
	N330+8‰NAM	3.17	60.12	100.65	1.91	1 200.9	22 770.0
	N240+N30+12‰NAM	4.63	87.85	66.88	1.27	1 467.8	27 829.1
晚稻	N150+N180	4.42	81.70	-11.15	-0.21	557.8	10 308.5
	N300+8‰NAM	3.75	69.35	-1.61	-0.03	454.9	8 405.7
	N330+8‰NAM	2.90	53.68	-3.01	-0.06	263.1	4 861.7
	N240+N30+12‰NAM	4.19	77.52	-2.10	-0.04	260.0	4 804.6

表 3 早晚稻期间不同 N 用量添加 NAM 处理的 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放总计Table 3 Total CH₄, N₂O and CO₂ emissions in different amount of nitrogen and NAM ratio treatment during early-late rice growing season

处理	CH ₄ /减排/(kg·hm ⁻²)		N ₂ O/减排/(kg·hm ⁻²)		CO ₂ /减排/(kg·hm ⁻²)	
	(kg·hm ⁻²)	%	(kg·hm ⁻²)	%	(kg·hm ⁻²)	%
N150+N180	179.0	—	1.66	—	39 672.6	—
N300+8‰NAM	151.1	15.6	1.16	29.9	31 167.0	21.4
N330+8‰NAM	113.8	36.4	1.85	-11.9	27 631.7	30.4
N240+N30+12‰NAM	165.4	7.6	1.23	25.8	32 633.7	17.7

施肥处理相比, 减少施氮量和增加抑制剂用量配比的早晚稻 N₂O 总排放量显著减少。

观测结果表明, 早晚稻 CO₂ 的总排放量表现为: N150+N180>N240+N30+12‰NAM>N300+8‰NAM>N330+8‰NAM, 与 CH₄ 的趋势相同。与常规施肥处理相比, 添加抑制剂处理的早晚稻 CO₂ 总排放量明显减少。

3 讨论

(1) 施氮量对温室气体排放的影响。大量施用氮肥是全球大气 N₂O 浓度增加的一个重要因素^[5-6]。而施氮肥对稻田 CH₄ 排放的影响有增加和减少两种结果, 目前结论尚不一致^[14-16]。鲁春霞等^[7]的观测结果表明, 在不同施氮处理条件下, 稻田 CH₄ 排放强度随着施氮量的增加而减少, N₂O 表现出相同趋势。本试验中添加抑制剂比例相同, 而施氮量不同的两个处理的早晚稻 CH₄、N₂O 和 CO₂ 总排放量差异明显, 其中 CH₄ 和 CO₂ 的趋势相同, 随施氮量的增加而减少, 这与王毅勇等^[17]的研究结果一致。而 N₂O 排放则随施氮量的增加而升高, 这与大多数研究者得出的随着施氮量的增加稻田 N₂O 排放增加的结论相符^[18-20]。施氮量不同所导致的 CH₄ 排放差异可能与土壤中 C/N 及水稻生长状况有关, 适宜的 C/N 有利于产甲烷细菌生产 CH₄, 而合理的施氮量有利于水稻生长。施氮量对 N₂O 排放的影响则更直接, 因为土壤中氮素含量状况与生成 N₂O 的硝化、

反硝化作用强度密切相关。而施氮量对 CO₂ 排放的影响可能较为复杂, 主要是影响了水稻生长及土壤微生物的活性等。因此, 施氮量是影响三种温室气体排放的一个重要因子。

(2) 抑制剂对温室气体排放的影响。试验结果表明, 在氮肥(尿素)与抑制剂(NAM)配合使用的条件下, 均表现为抑制稻田 CH₄、N₂O 和 CO₂ 的排放。从不同试验处理来分析, 施氮量与抑制剂用量配比都是影响 CH₄、N₂O 和 CO₂ 排放的关键因子, 而抑制剂是通过抑制尿素的水解和铵态氮的硝化来影响三种温室气体的排放。抑制剂可能通过以下两种途径对稻田 CH₄ 排放产生影响。一方面抑制剂与肥料配施后对尿素水解具有明显的抑制效果, 这种抑制作用将会对水稻生长及土壤微生物产生重要影响。因为植株参与条件下的稻田 CH₄ 排放与植株生长状况密切相关, 植株直接影响了 CH₄ 的传输, 而抑制尿素水解又将直接影响到微生物可利用的氮素, 进而影响微生物的活性等。另一方面, 抑制剂抑制了土壤中铵态氮的硝化, 可能通过土壤中的铵态氮含量影响 CH₄ 排放。有研究表明, CH₄ 排放量与土壤铵态氮含量之间表现为显著的负相关^[21]。其解释是土壤铵态氮控制稻田水土界面的 CH₄ 氧化^[22]。

抑制剂对 N₂O 排放的影响, 也是通过抑制尿素的水解和铵态氮的硝化来实现。本试验中, 常规施肥处理的稻田 N₂O 排放明显高于添加抑制剂处理。由此推测, 常规施肥处理可能是尿素水解以及铵硝化没有得到抑制, 导致在 N₂O 主要排放期出现剧烈的硝化和反硝化作用, 表现为 N₂O 强排放。而添加抑制剂处理的 N₂O 排放相对较低, 并且提高抑制剂配比这种趋势更为明显。由此可见, 添加抑制剂处理对稻田 N₂O 排放具有一定抑制效果。添加抑制剂处理同时对稻田 CO₂ 的排放也表现出一定的抑制作用, 这种影响机制较为复杂, 主要可能是影响了土壤微生物呼吸、植物呼吸以及植物光合作用, 是三者达到动态平衡后综合作用的结果, 而这种影响也

是通过抑制尿素的水解和铵态氮的硝化来实现。

(3) 施氮量与抑制剂对土壤中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量的影响。已有大量研究表明, 抑制剂与氮肥结合使用可以降低氮素损失, 提高氮肥利用率^[23-24]。脲酶抑制剂和硝化抑制剂协同作用可以对尿素氮转化过程进行控制, 其机理主要是抑制尿素的水解和铵态氮的硝化。尿素施入土壤后首先转化为铵态氮, 从早稻收获后土壤中的铵态氮含量情况来看, 添加抑制剂处理的其含量明显高于常规施肥处理, 而土壤硝态氮含量趋势相反, 这种趋势随抑制剂添加比例的提高更加明显, 说明抑制剂抑制了土壤中铵态氮的硝化是导致各处理出现明显差异的主要原因。而在抑制剂添加比例相同的条件下, 土壤中两种形态的氮素均表现出随施氮量的增加而增加, 说明两种形态的氮素也与施氮量密切相关。因此, 施氮量与抑制剂添加比例同为影响土壤中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量的两个重要因子, 而合理的氮用量与抑制剂用量配比可减少土壤中的 NO_3^- -N 残留, 提高 NH_4^+ -N 含量。两种形态的氮素中, NH_4^+ -N 易于被土壤胶体吸附因而移动性较小, 而 NO_3^- -N 的迁移性较强。因此, 利用抑制剂与氮肥(尿素)配合施用, 可减少土壤中的 NO_3^- -N 残留, 提高 NH_4^+ -N 含量, 从而提高作物的氮素利用率, 降低 NO_3^- -N 流失所引起的环境污染风险。

4 结论

与常规施肥处理相比, 早稻合理的氮用量与抑制剂添加比例能有效降低稻田土壤的 NO_3^- -N 残留, 提高土壤中 NH_4^+ -N 含量, 从而降低氮肥施用可能引起的环境污染风险。同时能降低 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 在早晚稻主要排放期的排放通量, 减少其双季稻期间的总排放量。可见, 利用抑制剂与 N、P、K 化肥配合使用可在一定程度上起到减少土壤氮的流失, 减排温室气体(CH_4 、 N_2O 和 CO_2)的效果, 从而构建稻田温室气体减排新技术体系。

参考文献:

- [1] 冯裕华. 气候变暖的风险与对策[J]. 上海环境科学, 2000, 19(6): 272-275.
FENG Yuhua. Risks and countermeasures of climate changes[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2000, 19(6): 272-275.
- [2] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis: Chapter 4: Atmosphere Chemistry and Greenhouse Gases[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] IPCC. Climate change 2007: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry[R/OL]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter7.pdf>
- [4] 杨光明, 武文明, 沙丽清. 西双版纳地区稻田甲烷的排放通量[J]. 山地学报, 2007, 25(4): 461-468.
YANG Guangming, WU Wenming, SHA Liqing. CH_4 emission from paddy fields in Xishuangbanna, SW China[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(4): 461-468.
- [5] MOSIER A, KROEZE C, NEVISON C, et al. Closing the global N_2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle: OECD/IPCC/IEA phase development of IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory methodology[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 52: 225-248.
- [6] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 294-298.
TIAN Guangming, HE Yunfeng, LI Yongxian. Effect of water and fertilization management on emission of CH_4 and N_2O in paddy soil[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(3): 294-298.
- [7] 鲁春霞, 吕耀, 谢高地, 等. 稻田温室气体排放的时空差异性与精准施肥[J]. 资源科学, 2002, 24(6): 86-90.
LU Chunxia, LÜ Yao, XIE Gaodi, et al. Different characteristics of greenhouse gas emission from rice paddy field and precision fertilization[J]. Resources Science, 2002, 24(6): 86-90.
- [8] 丁维新, 蔡祖聪. 氮肥对土壤甲烷产生的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 380-383.
DING Weixin, CAI Zucong. Effect of nitrogen fertilization on methane production in wetland soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(3): 380-383.
- [9] 刘合明, 刘树庆. 不同施氮水平对华北平原冬小麦土壤 CO_2 通量的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1125-1129.
LIU Heming, LIU Shuqing. Effect of different nitrogen levels on soil CO_2 fluxes of winter wheat in north China plain[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(3): 1125-1129.
- [10] 吕琴, 闵航, 陈中云. 长期定位试验对水稻田土壤甲烷氧化活性和甲烷排放通量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 608-612.
LÜ Qin, MIN Hang, CHEN Zhongyun. Effect of long-term fertilization on the methane oxidation and the methane emission in paddy soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 608-612.
- [11] 李方敏, 樊小林. 控释肥对稻田 CH_4 排放的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(4): 408-411.
LI Fangmin, FAN Xiaolin. Effect of Controlled release fertilizers on methane emission from paddy field[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2005, 11(4): 408-411.
- [12] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143-148.
QIN Xiaobo, LI Yu'e, LIU Keying, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7): 143-148.
- [13] ZHENG Xunhua, WANG Mingxing, WANG Yuesi, et al. Comparision of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. Advances Atmospheres Science, 1998, 15(4): 569-579.
- [14] AMARAL J A, KNOWLES R. Methane metabolism in a temperate swamp[J]. Applied Environmental Microbiology, 1994, 60(11): 3945-3951.
- [15] CAI Zucong, XING Guangxi, YAN Xiaoyuan, et al. Methane and nitrous oxide emission from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. Plant and Soil, 1997, 196: 7-14.
- [16] AERTS R, TOET S. Nutritional controls on carbon dioxide and methane emission from carex-dominated peat soils[J]. Soil Biology Biochemistry, 1997, 29: 1683-1690.

- [17] 王毅勇, 陈卫卫, 赵志春, 等. 三江平原寒地稻田 CH_4 、 N_2O 排放特征及排放量估算[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 170-176.
WANG Yiyong, CHEN Weiwei, ZHAO Zhichun, et al. Characteristics and estimation of CH_4 , N_2O emissions from cold paddy field in the Sanjiang Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 170-176.
- [18] MA Jing, LI Xianglan, XU Hua, et al. Effects of nitrogen fertilizer and wheat straw application on CH_4 and N_2O emissions from a paddy rice field[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, 45(5): 359-367.
- [19] 黄树辉, 蒋文伟, 吕军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 540-543.
HUANG Shuhui, JIANG Wenwei, LÜ Jun, et al. Influence of nitrogen and phosphorus fertilizers on N_2O emissions in rice fields[J]. China Environment Science, 2005, 25(5): 540-543.
- [20] LI Yue, LIN Erda, RAO Minjie. The effect of agricultural practices on methane and nitrous oxide emissions from rice field and pot experiment[J]. Nutrient Cycling in Agro-ecosystems, 2005, 49: 47-50.
- [21] 黄耀. 地气系统碳氮交换—从实验到模型[M]. 北京: 气象出版社, 2003, 116.
- HUANG Yao. The carbon and nitrogen exchange in soil-atmosphere system from experiments to models[M]. Beijing: Publishing Company of Meteorology, 2003, 116.
- [22] XU Xingkai, WANG Yuesi, ZHENG Xunhua, et al. Methane emission from a simulated rice field ecosystem as influenced by hydroquinone and dicyandiamide[J]. The Science of the Total Environment, 2000, 263: 243-253.
- [23] 陈振华, 陈利军, 武志杰. 脲酶-硝化抑制剂对减缓尿素转化产物氧化及淋溶的作用[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 238-242.
CHEN Zhenghua, CHEN Lijun, WU Zhijie. Effects of urease and nitrification inhibitors on alleviating the oxidation and leaching of soil urea's hydrolyzed product ammonium[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 238-242.
- [24] 徐星凯, 周礼恺, OSWALD V C. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对植稻土壤中尿素N行为的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1682-1686.
XU Xingkai, ZHOU Likai, OSWALD V C. Effect of urease/nitrification inhibitors on the behavior of urea-N in the soil planted to rice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(10): 1682-1686.

Effects of nitrogen amount and inhibitor ratio on greenhouse gas emission during double-rice growing season

LIU Zhaobing^{1,2}, JI Xionghui^{1,2*}, PENG hua^{1,2}, SHI Lihong^{1,2}, TIAN Faxiang^{1,3}, SHI Shengwei⁴

1. Soil and Fertilizer Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China;
2. Agriculture and Environment Research Center, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China;
3. Longping Branch of Graduate School of Central South University, Changsha 410125, China;
4. Institute of Agro-Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: The effects of different amount of nitrogen and proportion of inhibitor on CH_4 , N_2O and CO_2 emissions from paddy field in Southern China was studied by using static chamber and modified gas chromatograph (Agilent 7890A) during double-rice growing season. The results showed that total CH_4 , N_2O and CO_2 emissions from paddy field for application combining nitrogen with inhibitors were significantly lower than the control (conventional fertilization) during double-rice growing season, which the total CH_4 emissions was reduced by 7.6%~36.4%, N_2O by 25.8%~29.9%, and CO_2 by 17.7%~30.4%. And soil NH_4^+ -N and NO_3^- -N content in each treatment was obviously different after early rice harvested. The treatments using inhibitor had higher NH_4^+ -N contents than the control, which was increased by 25.1%~77.0%. Soil NO_3^- -N content in the treatment of basal applied N 240 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ combining with 12%NAM before early rice transplanting and top dressed N 30 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ at late rice tiller stage (N240+N30+12%NAM) was decreased by 61.8% ($P<0.05$) compared with the control, while that in N330+8%NAM treatment was higher than the control due to excessive nitrogen applied before early rice transplanting. It illustrates that a reasonable amount of nitrogen and proportion of inhibitors can effectively improve NH_4^+ -N content and reduce NO_3^- -N residues in soil, thereby it plays a key role in lowering greenhouse gas emissions from paddy field during double-rice growing season, meanwhile, it provides technical support for making further use of inhibitor (NAM) and N, P, K fertilizer to form a compound fertilizer, and builds new fertilization models with lowering greenhouse gas emissions in double rice paddy field in Southern China.

Key words: nitrogen amount; inhibitor; double-rice; greenhouse gas