

氯化钙对稻田甲烷和氧化亚氮排放及温室效应的影响

刘丹丹^{1*}, 张林², 王光辉³, 邓凯^{4#}

¹邵东市农业农村局, 湖南 邵阳

²魏家桥镇农业综合服务中心, 湖南 邵阳

³砂石镇农业综合服务中心, 湖南 邵阳

⁴湖南省农业环境生态研究所, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年9月4日; 录用日期: 2022年10月3日; 发布日期: 2022年10月10日

摘要

为了减少稻田甲烷和氧化亚氮的排放, 采用有机肥配施并添加Ca(CN)₂, 并通过7组施肥试验测定不同处理早稻产量情况及产量构成因子差异、不同处理早稻分蘖期分蘖数情况、早稻分蘖期不同处理叶绿素SPAD值及早稻CH₄、N₂O季节排放通量情况、早稻各生育期CH₄累积排放量等。通过对比试验证明, 肥料添加Ca(CN)₂不仅能够为水稻提供充足的后续氮素营养, 还能够减排CH₄气体, 添加Ca(CN)₂处理较牛粪处理减排7.54%~34.58%的CH₄, 对早期CH₄排放的抑制效果较为明显, 对减少稻田温室效应提供一些理论基础。

关键词

甲烷, 稻田, 温室气体排放, 氧化亚氮

Effects of Calcium Hydride on Methane and Nitrous Oxide Emissions and Greenhouse Effect from Rice Fields

Dandan Liu^{1*}, Lin Zhang², Guanghui Wang³, Kai Deng^{4#}

¹Shaodong Agricultural and Rural Bureau, Shaoyang Hunan

²Weijiaqiao Town Agricultural Comprehensive Service Center, Shaoyang Hunan

³Shashi Town Agricultural Comprehensive Service Center, Shaoyang Hunan

⁴Hunan Institute of Agricultural Environment and Ecology, Changsha Hunan

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

Organic fertilizers were combined with $\text{Ca}(\text{CN})_2$ to reduce the emission of methane and nitrous oxide in paddy fields with 7 sets of fertilization experiments conducted to determine the yield of early rice in different treatments and their differences of yield components, the number of tillers in early rice in different treatments, the chlorophyll SPAD value of different treatments at the tillering stage of early rice, the seasonal emission flux of CH_4 and N_2O of early rice, and the cumulative emission of CH_4 during each growth period of early rice. Comparative experiments have shown that the addition of $\text{Ca}(\text{CN})_2$ in fertilizer can not only provide sufficient nitrogen nutrition for rice, but also reduce CH_4 gas. Adding $\text{Ca}(\text{CN})_2$ treatment reduces CH_4 by 7.54%~34.58% compared with cow manure treatment. In the early stage, the effect of suppressing CH_4 emission was obvious, providing some theoretical bases for reducing the greenhouse effect of rice fields.

Keywords

Methane, Paddy Field, Greenhouse Gas Emissions, Nitrous Oxide

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人类活动下温室气体排放引起大气温室气体浓度不断攀高,进而导致温室效应加剧及全球气候持续变暖,自然生态系统平衡和人类的生存发展受到严重威胁,我国是水稻生产大国,水稻种植面积占国土面积的3%,影响稻田温室气体排放的因素很多,可以通过改变土壤理化性质及呼吸底物来影响温室气体的排放,尤其是针对 CH_4 和 N_2O 的排放。添加生物质炭可以增进土壤养分离子的吸附和保持,特别是对 NH_4^+ 有很强的吸附作用[1]。稻田 N_2O 排放是由 N_2O 产生、转化和传输三个过程共同作用的结果,在酸性土壤中添加DCD能提高土壤PH值,减少对 CH_4 和 N_2O 的排放[2]。生物质炭添加对水稻土 N_2O 排放的影响也有不一致的效果。有研究表明,在水稻土中添加生物质炭,可增加 N_2O 排放[3]。本文采用有机肥配施并添加 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 试验 CH_4 、 N_2O 稻田排放情况,为农业生产及温室气体减排提供科学依据。

2. 排山村试验点介绍

试验点位于湖南省邵东市魏家桥镇排山村(111.642668°E, 27.189447°N),海拔42 m,年平均温度为17.1℃,年降水量在1500 mm左右,年大于10℃积温5300℃~6500℃,属于亚热带季风性气候。

3. 试验开展情况

3.1. 早稻 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 减排温室气体试验

试验方案

供试土壤为第四纪红壤母质发育的红黄泥,试验田土壤理化特性为:pH_(H2O)值6.1;有机碳15.4 g/kg;全氮1.55 g/kg;全磷0.61 g/kg;全钾8.80 g/kg;碱解氮147 mg/kg;有效磷7.1 mg/kg,速效钾53 mg/kg。牛粪养分含量:全N 2.59%,全P 2.03%,全K 1.92%,有机质67.2%。

试验设 7 个处理, 3 次重复。小区面积 20 m²。供试早稻品种为中早嘉 17 号, 3 月 24 日播种, 4 月 20 日移栽, 7 月 15 日收割。田间管理同当地农民习惯保持一致。

施肥情况如下表 1:

Table 1. 2020 early rice Ca(CN)₂ greenhouse gas emission reduction test fertilization scheme

表 1. 2020 年早稻 Ca(CN)₂ 减排温室气体试验施肥方案

编号	处理	养分量(kg/亩)				基肥(kg/亩)				追尿素 (kg/亩)
		纯 N	P ₂ O ₅	K ₂ O	尿素	牛粪	CaCN ₂	过磷酸钙	氯化钾	
1	CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	常规施肥	10	6	6	17.4	0	0	50	10.0	2
3	牛粪	10	6	6	9.6	180	0	19.6	4.2	2
4	牛粪 CN1	10	6	6	6.3	180	5	19.6	4.2	2
5	牛粪 CN2	10	6	6	3.1	180	10	19.6	4.2	2
6	牛粪 CN3	10	6	6	-0.2	180	15	19.6	4.2	2
7	牛粪 CN4	10	6	6	-3.4	180	20	19.6	4.2	2

小区施肥量

编号	处理	基肥(kg)					追尿素 (g)
		尿素	牛粪	CaCN ₂	过磷酸钙	氯化钾	
1	CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0
2	常规施肥	0.52	0.00	0.00	1.50	0.30	60.0
3	牛粪	0.29	6.75	0.00	0.59	0.13	60.0
4	牛粪 CN1	0.19	6.75	0.15	0.59	0.13	60.0
5	牛粪 CN2	0.09	6.75	0.30	0.59	0.13	60.0
6	牛粪 CN3	-0.01	6.75	0.45	0.59	0.13	60.0
7	牛粪 CN4	-0.10	6.75	0.60	0.59	0.13	60.0

注: 小区面积 20 m²。

3.2. 结果分析

3.2.1. 早稻产量及其产量构成因子情况

不同处理早稻产量情况及产量构成因子差异见表 2。与常规施肥处理实际产量相比, 施牛粪处理、牛粪 CN1 和牛粪 CN4 处理产量显著增加 5.34%, 4.86% 和 7.83% ($P < 0.05$), 主要是通过增加水稻的千粒重而达到水稻增产, 由于配施有机肥牛粪较单施化肥能改善土壤氮素供应过程, 使土壤养分平稳释放, 保障了水稻灌浆结实所需养分, 从而增加了千粒重以提高水稻产量。而其余添加 Ca(CN)₂ 的牛粪 CN2 和牛粪 CN3 处理有减产趋势, 分别减产 1.07% 和 3.92% ($P < 0.05$), 主要是因为减少了水稻的有效分蘖, 总粒数和实粒数, 从而导致减产。添加 Ca(CN)₂ 各处理产量大小关系为: 牛粪 CN4 > 牛粪 CN1 > 牛粪 CN2 > 牛粪 CN3, 添加 Ca(CN)₂ 量为 300 kg/hm² 的牛粪 CN4 处理产量反而最高, 可能由于前期 Ca(CN)₂ 过量, 遇水形成氰胺, 对水稻毒性过大, 造成死苗现象严重, 而后补插秧苗时 Ca(CN)₂ 浓度很小, 毒性减弱, 同时氰胺转化为氨, 既降低水稻安全生长风险, 又在水稻生长前期提供充足的 N 素, 增加了水稻有效分蘖, 导致水稻产量增加。表明添加 Ca(CN)₂ 300 kg/hm² 超过了水稻前期安全生长阈值, Ca(CN)₂ 用量及施肥后插秧天数有待进一步研究。而添加 Ca(CN)₂ 用量在 0~225 kg/hm² 时, 通过回归分析得出添加 Ca(CN)₂

用量与早稻产量呈显著负相关($P < 0.05$)。

Table 2. Analysis of early rice yield and its constituent factors

表 2. 早稻产量及其构成因子情况分析

处理	株高 (cm)	有效穗数 (穗/蔸)	总粒数 (粒/株)	实粒数 (粒/株)	千粒重 (g/1000 粒)	稻草重 (kg/hm ²)	考种产量 (kg/hm ²)	产量 (kg/hm ²)
CK	46.0 Bc	5.0 Bb	52.4 Bb	48.8 Bb	31.0 Aa	591.4 Bc	2361.8 Dd	3370.0 Cb
常规	71.7 Aab	8.5 Aa	99.6 Aa	82.9 Aa	23.3 Bb	1365.3 Aab	5227.0 Aab	3512.5 BCb
牛粪	69.3 Ab	8.3 Aa	96.3 Aa	88.0 ABa	24.7 ABb	1378.3 Aab	5437.5 Aa	3700.0 Aa
牛粪 CN1	70.0 Ab	8.3 Aa	85.8 ABa	77.3 ABa	25.6 ABb	1336.5 Aab	4942.5 Abb	3683.3 ABa
牛粪 CN2	69.3 Ab	8.2 Ab	74.9 ABab	69.7 ABab	26.9 ABab	1414.3 ABab	4523.5 BCc	3475.0 Cbc
牛粪 CN3	71.3 Aab	8.0 ABa	74.0 ABab	67.4 ABab	27.3 ABab	1265.0 ABab	4193.5 Cc	3375.0 Cc
牛粪 CN4	76.7 Aa	9.5 Aa	86.0 ABa	77.1 Abab	23.8 Bb	1694.5 Aa	5173.5 Aab	3787.5 Aa

注：表中大小写字母分别表示 1% 和 5% 差异性。

3.2.2. 各处理早稻分蘖数

不同处理早稻分蘖期分蘖数情况如图 1。常规施肥处理分蘖数显著高于其他各施肥处理，可能因为单施化肥处理肥料释放较快，化肥遇水随即转化为硝态氮、铵态氮供水稻直接吸收利用，而添加有机肥牛粪处理有利于土壤自身调节养分平稳释放，在水稻前期提供适量的无机氮，而在水稻生长中后期能持续稳定的供应充足的矿质态氮，能使水稻一直处于较好的供氮状态下，而添加 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 早期对水稻有一定的毒害作用，影响了水稻的分蘖。

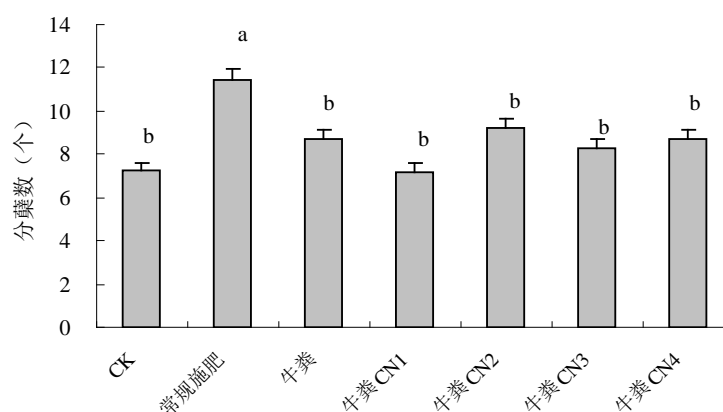


Figure 1. Tiller number of early rice with different treatments

图 1. 不同处理早稻分蘖数情况

3.2.3. 早稻叶绿素 SPAD 值

早稻分蘖期不同处理叶绿素 SPAD 值情况如图 2。与常规施肥处理相比，施牛粪和牛粪 + $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 处理叶绿素 SPAD 值差异不显著，其中牛粪 CN4 处理叶绿素 SPAD 值最高，表明该处理有较丰富的无机氮供水稻生长前期吸收利用，这与 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 能够转化成氨并提供无机氮素营养关系密切。

3.2.4. CH_4 排放通量季节变化

早稻 CH_4 季节排放通量情况如图 3。总体而言，早稻 CH_4 排放主要是出现在水稻生长中后期。插秧

前三天, 稻田 CH_4 排放相对较小, 而水稻插秧后稻田 CH_4 排放出现两个较明显的高峰, 第一个排放峰出现在插秧后第 12 天, 排放通量处在 $7.05\sim 21.49 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ 之间, 其中排放通量最大为牛粪处理, 因为有机肥与化肥配合施入土壤, 经过一个营养平衡期, 同时, 牛粪的施入为产 CH_4 底物提供了充足的碳素养分, 并且在淹水环境下, 产 CH_4 菌活性较强, 有利用 CH_4 的排放; 随着水稻的生长, CH_4 排放逐渐降低, 插秧后第 17 天, 达到一个排放低谷, 随后排放又继续增加, CH_4 排放第二个高峰除牛粪处理有所延迟出现在 54 天外, 其余各处理排放高峰均出现在插秧后第 51 天, 即第一次落干结束后的覆水期, 排放通量达到 $10.76\sim 21.82 \text{ mg/m}^2/\text{h}$, 随后 CH_4 排放又逐渐减少。水稻生长季添加 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 各排放通量较牛粪处理小, 但较常规施肥和 CK 施肥增大。

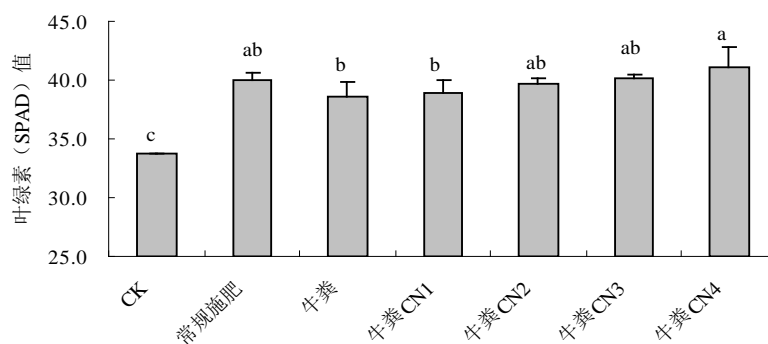


Figure 2. Chlorophyll SPAD at tillering stage with different treatments
图 2. 不同处理分蘖期叶绿素 SPAD 值

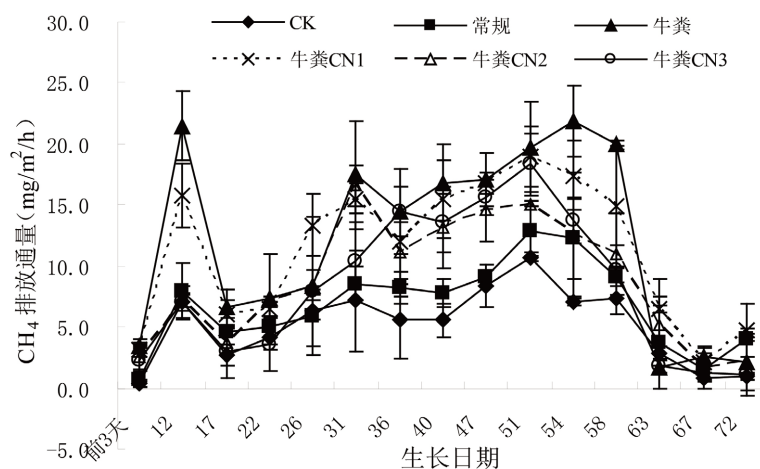


Figure 3. CH_4 emission flux in rice growing season
图 3. 水稻生长季 CH_4 排放通量情况

3.2.5. N_2O 排放通量季节变化

早稻 N_2O 季节排放通量情况如图 4, 水稻生长前期 N_2O 排放较少, 但在插秧后第 51 天出现一小排放高峰, 即水稻第二次覆水开始时, 排放通量范围在 $2.69\sim 22.07 \text{ ug/m}^2/\text{h}$, 随后排放逐渐减少。

3.2.6. 早稻各生育期 CH_4 累积排放量的贡献率

早稻各生育期 CH_4 累积排放量的贡献率见表 3。在各生育期中, 分蘖期与孕穗乳熟期 CH_4 累积排放量较大, 占整个生育期排放的 $68.29\%\sim 80.88\%$, 其中分蘖期牛粪 CN3 处理排放量达到了整个排放量的一

半以上, 而成熟期 CH_4 累积排放量相对较小, 仅占整个生育期排放总量的 1.95%~5.55%。可能因为分蘖期与灌浆乳熟期水稻生长较快, 对养分需求多, 根系发达, 根系泌氧能力较强, 土壤微生物相当活跃, 同时水稻植株通气系统良好, CH_4 容易经水稻植株向外界排放, 所以排放量较大, 而成熟期稻田无淹水, 影响了产甲烷细菌生长、繁殖, 所以排放量较小。移栽返青期与分蘖期时期排放量大小顺序一致为: 牛粪 > 牛粪 CN1 > 牛粪 CN2 > 牛粪 CN3 > 常规 > CK, 同时排放量与添加 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 量呈显著负相关 ($P < 0.05$), 而孕穗乳熟期累积排放量大小顺序为: 牛粪 > 牛粪 CN1 > 牛粪 CN3 > 牛粪 CN2 > 常规 > CK, 表明添加 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 主要是对早稻移栽返青期和分蘖期 CH_4 排放有一定的抑制作用, 而随着水稻的生长 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 自身的分解和转化, 降低了 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 的抑制作用, 对孕穗乳熟期和成熟期 CH_4 排放抑制效果不明显。

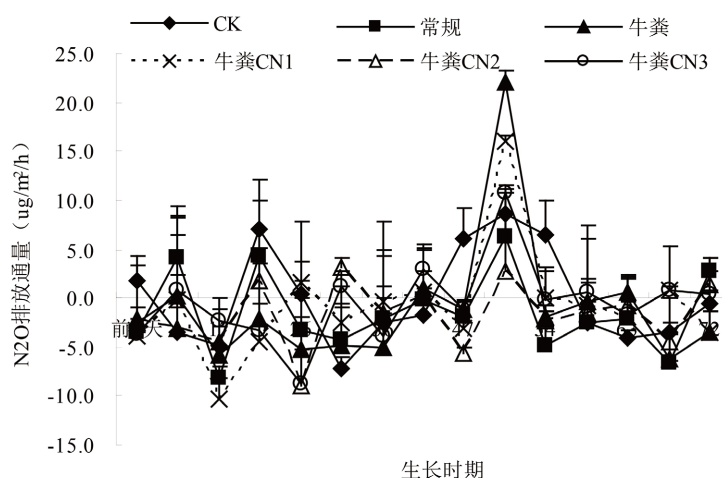


Figure 4. N_2O emission flux in rice growing season
图 4. 水稻生长季 N_2O 排放通量情况

Table 3. Contribution rate of cumulative CH_4 emissions in each growth period of early rice

表 3. 早稻各生育期 CH_4 累积排放量的贡献率

处理	移栽返青期		分蘖期		孕穗乳熟期		成熟期		排放总量 (kg/hm^2)
	排放量 (kg/hm^2)	百分比 (%)	排放量 (kg/hm^2)	百分比 (%)	排放量 (kg/hm^2)	百分比 (%)	排放量 (kg/hm^2)	百分比 (%)	
CK	24.50	26.69	38.21	41.64	26.89	29.30	2.17	2.36	91.77
常规	30.86	25.83	45.50	38.08	36.49	30.54	6.64	5.55	119.49
牛粪	62.21	29.07	85.57	39.98	60.60	28.31	5.64	2.64	214.03
牛粪 CN1	49.79	25.16	84.29	42.60	55.51	28.05	8.29	4.19	197.88
牛粪 CN2	31.47	20.78	73.48	48.52	41.95	27.70	4.54	2.99	151.43
牛粪 CN3	24.04	17.17	71.29	50.91	41.96	29.97	2.73	1.95	140.03

3.2.7. 水稻生长季 CH_4 排放量及增温潜势

本试验各处理 N_2O 排放通量平均值均为负数, 即忽略 N_2O 排放及增温潜势。由表 4 看出, 添加 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 处理 CH_4 排放量较牛粪处理减少, 减排幅度为 7.54%~34.58%, 可能由于添加 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 对土壤微生物、细菌生长繁育有一定的毒害作用, 减少了产甲烷细菌的数量并影响其活性, 导致 CH_4 排放减少。而添加

$\text{Ca}(\text{CN})_2$ 的处理较施牛粪的增温潜势降低-34.58%~-7.54%。

Table 4. CH_4 emissions and warming potential in rice growing season

表 4. 水稻生长季 CH_4 排放量及增温潜势情况

处理	排放量 (kg/hm^2)	增温潜势 ($\text{kgCO}_2/\text{hm}^2$)	单位产量的 GWP	较常规施肥 $\Delta\text{GWP}\%$	较牛粪处理 $\Delta\text{GWP}\%$
CK	91.77	1927.1	0.57	-23.20	-0.57
常规	119.49	2509.4	0.71	/	-0.44
牛粪	214.03	4494.5	1.21	79.11	/
牛粪 CN1	197.88	4155.5	1.13	65.60	-7.54
牛粪 CN2	151.43	3180.1	0.92	26.73	-29.25
牛粪 CN3	140.03	2940.5	0.87	17.18	-34.58

注：1) 根据 100 年尺度上 CH_4 气体相对 CO_2 的增温潜势： CH_4 为 21；2) 单位产量的 GWP 是指某一处理的 CH_4 和 N_2O 的综合 GWP 与经济产量的比值。

4. 小结

有机肥配施并添加 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 量为 $75 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 较常规施肥显著增加早稻产量 5.34%，过量的 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 会导致水稻减产，并且 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 添加用量与早稻产量呈显著负相关；早稻分蘖期和孕穗乳熟期 CH_4 累积排放量较大，占整个生育期排放总量的 68.29%~80.88%，表明早稻 CH_4 排放主要集中在水稻生长中期；添加 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 处理较牛粪处理减排 7.54%~34.58% 的 CH_4 ，对早期 CH_4 排放的抑制效果较为明显。肥料添加 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 不仅能够为水稻提供充足的后续氮素营养，还能够减排 CH_4 气体，但 $\text{Ca}(\text{CN})_2$ 用量及施用方式有待进一步研究。

参考文献

- [1] 刘玉学. 生物质炭输入对土壤氮素流失和温室气体排放特性的影响[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [2] 王国强, 常玉妍, 宋星星, 等. 稻草还田下添加 DCD 对稻田 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2431-2439.
- [3] 刘杰云, 沈健林, 邱虎森, 等. 生物质炭添加对农田温室气体净排放的影响综述[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 205-212.