

水稻 CH₄ 和 N₂O 的排放及其与植株特性的相关性

傅志强^{1,2}, 黄璜^{1,2*}, 朱华武¹, 陈灿¹

(1. 湖南农业大学 农学院, 湖南 长沙 410128; 2. 农业部多熟制作物栽培与耕作学重点开放实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为比较不同水稻品种间甲烷和氧化亚氮排放的差异, 采用圆柱体静止箱取样、气相色谱分析, 测定了不同早、晚稻品种在不同生育期甲烷和氧化亚氮的排放通量, 考察其与水稻植株特性的相关性。结果表明, 早稻甲烷、氧化亚氮排放通量分别在抽穗期、孕穗期出现峰值; 晚稻甲烷、氧化亚氮排放通量分别在拔节期、乳熟期出现峰值。不同水稻品种间甲烷和氧化亚氮排放通量差异显著, 早稻分蘖数、根系干重与甲烷排放呈极显著正相关, 根体积、地上部干重与氧化亚氮排放呈显著正相关; 晚稻甲烷排放与根体积、根系干重呈极显著正相关, 氧化亚氮排放与分蘖数、地上部干重呈极显著负相关; 早稻常规品种单位产量温室气体增温潜势是杂交品种的 1.77 倍, 晚稻常规品种与杂交品种间差异不显著。植株分蘖数、根体积、根生物量是影响甲烷和氧化亚氮排放的重要因素。

关键词: 水稻; 甲烷; 氧化亚氮; 排放通量; 增温潜势; 植株特性; 相关性

中图分类号: S511.01 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2011)04-0356-05

Relativity between CH₄ and N₂O emission and rice plant characteristics

FU Zhi-qiang^{1,2}, HUANG Huang^{1,2*}, ZHU Hua-wu¹, CHEN Can¹

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Agriculture for Multi-Cropping Cultivation and Farming System, Changsha 410128, China)

Abstract: To probe the mechanism of differences in CH₄ and N₂O emission among rice cultivars, this pot experiment was conducted to measure CH₄ and N₂O emission fluxes and plant characteristics of rice cultivars by static closed chamber method and gas chromatograph technique. The results showed that the maximum values of CH₄ and N₂O emission appeared at the heading stage and the booting stage respectively for the early rice. For the late rice, the maximum values of CH₄ and N₂O emission appeared at the shooting stage and the milky stage respectively. The differences of CH₄ and N₂O emission among different cultivars were significant. For the early rice, tiller number, root volume and root dry weight were significantly and positively related to CH₄ emission fluxes, and root volume and root dry weight showed significant positive correlation with N₂O emission fluxes. For the late rice, CH₄ emission fluxes was positively correlated with root volume and root dry weight, and N₂O emission fluxes was negatively correlated with tiller number, root volume and root dry weight. The GWPs of yield per unit area of the traditional early rice was 1.77 times as much as that of the hybrid rice, and for the late rice, there was only a small difference. Therefore, tiller number, root volume and root dry weight were the important factors influencing CH₄ and N₂O emission from the paddy field.

Key words: rice; methane; nitrous oxide; emission flux; global warming potential(GWPs); rice plant characteristics; relativity

据统计, 在全球范围内, 农作物的 CH₄、N₂O 排放量分别占人类活动导致 CH₄、N₂O 排放总量的 50%和 60%^[1-4]。有研究^[4-7]表明, 不同水稻品种的甲烷排放量存在显著差异(相差 1.5 ~ 3.5 倍), 杂交

收稿日期: 2011-03-22

基金项目: 国家科技攻关计划项目(2008BAD95B02); 湖南省自然科学基金项目(09JJ5011)

作者简介: 傅志强(1968—), 男, 湖南涟源人, 博士, 副教授, 主要从事农作制度及作物生态信息研究, zqf_cis@126.com; *通信作者, hh863@126.com

稻比常规稻的甲烷排放率约低 5% ~ 37%。Lindau 等^[8]研究了 6 个水稻品种甲烷的排放, 低秆品种甲烷排放量约为高秆品种的 64%; 水稻干重、根体积、根系干重、孔径、分蘖数以及产量均与稻田甲烷排放量呈正相关。Aulakh 等^[9]的研究结果表明, 植株传输甲烷的能力与根干生物量及地上部生物量呈正相关。关于水稻品种甲烷排放与植株通气系统之间的相关性已有研究^[10], 但尚未见对水稻品种间甲烷、氧化亚氮排放通量差异的报道。笔者通过测定不同水稻品种甲烷和氧化亚氮排放通量以及植株生长特性, 分析甲烷、氧化亚氮排放通量及其与植物特性的相关性, 以期为进一步研究不同水稻品种间甲烷和氧化亚氮排放差异形成机理提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

早稻品种为常规稻浙幅 7 号、创丰 1 号和杂交稻金优 974、超级稻陆两优 996, 生育期均为 110 d 左右; 晚稻品种为金优 277、丰源优 299、湘晚粳 12 号、金优 139, 生育期均为 115 d 左右。

1.2 试验设计

早、晚稻盆栽试验于 2009 年在湖南省土壤肥料研究所试验基地进行。供试土壤为稻田耕层土壤(第四纪红壤), 土壤 pH 值为 6.5, 碱解氮为 168 mg/kg, 有效磷为 9.7 g/kg, 速效钾为 99 mg/kg, 全氮为 1.89 g/kg, 全磷为 0.76 g/kg, 全钾为 8.9 g/kg, 有机质为 31.5 g/kg。盆高 40 cm, 底部直径 30 cm。土壤晒干后粉碎过筛(孔径为 3 mm), 每盆装土 15 kg, 移栽前每盆施缓控肥 1 g。早稻于 3 月 26 日播种育秧, 4 月 31 日移栽, 7 月 15 日收获植株地上部, 其根系留于盆中; 晚稻于 6 月 18 日播种育秧, 7 月 18 日移栽。每个品种种植 25 盆, 每盆栽 3 蔸, 杂交稻每蔸 2 苗, 常规稻每蔸 4 苗, 其中 3 盆各栽植 1 蔸, 用于气样观测。于孕穗期每盆施尿素 1 g, 全生育期保持浅水灌溉, 按照实际情况及时防治病虫害, 确保水稻生长良好。

1.3 测定指标与方法

甲烷、氧化亚氮采用圆柱体静止箱取样^[11-12]。

早稻分别于分蘖盛期、孕穗期、抽穗期、乳熟期取样, 晚稻分别于分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、齐穗期、乳熟期取样。每个生育期取样 2 次, 以 2 次测得排放通量的均值作为该生育期排放通量。CH₄、N₂O 浓度采用气相色谱(Agilent7890A, 美国)测定^[13]。稻田 CH₄、N₂O 排放通量计算方法参见文献^[2,14], 增温潜势计算方法参见文献^[15]。

早稻于分蘖盛期、孕穗期、抽穗期, 晚稻于分蘖期、抽穗期、乳熟期每个品种取 3 蔸植株, 用于考察分蘖数、地上部生物量、根系生物量、根体积等指标。各水稻品种在成熟期取 5 盆(15 株)用于测产。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 DPS V3.01 软件进行数据统计分析; 采用 SSR 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 早稻品种 CH₄ 和 N₂O 的排放通量及其与植株特性的相关性

2.1.1 CH₄ 和 N₂O 的排放通量及增温潜势

从图 1 可知, 早稻品种 CH₄ 排放通量在 4 个生育期的变化呈单峰模式。生育前期, 甲烷排放通量较低; 随着生育期的推进, 甲烷排放通量逐渐增大, 在抽穗期达到峰值, 其中以创丰 1 号最高, 浙幅 7 号最低; 成熟期甲烷排放通量下降。不同生育时期的排放通量常规稻与杂交稻差异较大, 在分蘖期、孕穗期、成熟期常规稻甲烷排放通量高于杂交稻, 极差为 7.79 ~ 17.65 mg/(m²·h)。

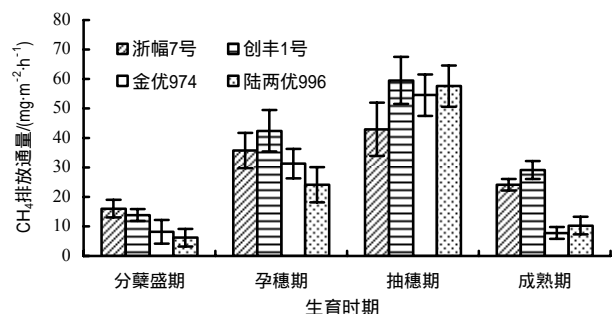


图 1 供试早稻品种不同生育时期甲烷的排放通量
Fig.1 Seasonal variation of CH₄ emission flux during the early rice growth

由图2可知,分蘖盛期氧化亚氮排放通量很低,为-43.21 ~ -20.89 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;在孕穗期达到最大值,为84.99 ~ 265.95 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,以浙幅7号最高,创丰1号最低;抽穗期开始下降。从不同早稻品种的排放通

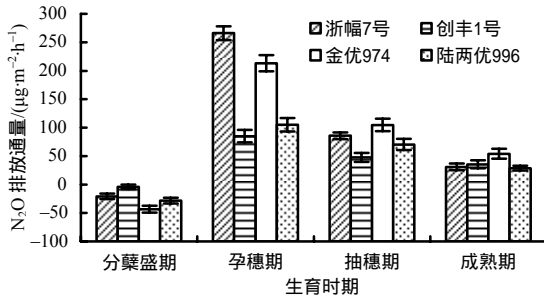


图2 供试早稻品种不同生育时期氧化亚氮的排放通量
Fig.2 Seasonal variation of N₂O emission flux during the early rice growth

量来看,分蘖盛期常规稻的高于杂交稻,而在水稻抽穗期和成熟期杂交稻的高于常规稻,但差异较小。

由表1可知,4个早稻品种全生育期甲烷排放通量均值以创丰1号最大,其次是浙幅7号;常规稻品种与杂交稻品种甲烷排放通量间差异达极显著水平,杂交稻品种之间差异不显著。氧化亚氮排放通量均值以浙幅7号最高,其次是金优974,创丰1号与陆两优996最低,浙幅7号分别比金优974、创丰1号、陆两优996高8.31、49.5、46.47 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,差异达极显著水平。单位产量温室气体增温潜势(均换算成CO₂对大气的增温潜势)以陆两优996最低,浙幅7号最高;常规稻单位产量温室气体增温潜势是杂交稻的1.77倍。

表1 早稻品种的稻谷产量、排放通量及增温潜势

Table 1 Comparison of yields, average emission fluxes between CH₄ and N₂O and GWPs among the early rice cultivars

品种	CH ₄		N ₂ O		稻谷产量/ (kg·hm ⁻²)	单位产量温室 气体增温潜势/ (kg·kg ⁻¹)
	排放通量均值/ (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	增温潜势/ (kg·hm ⁻²)	排放通量均值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	增温潜势/ (kg·hm ⁻²)		
浙幅7号	29.72bB	12 304	90.42aA	481	6 489	1.97
创丰1号	36.22aA	14 995	40.92dD	218	8 595	1.77
金优974	25.43cC	10 528	82.11bB	437	9 068	1.21
陆两优996	24.52dC	10 151	43.95cC	234	11 588	0.90

2.1.2 CH₄和N₂O排放通量与植株特性的相关性

从表2可知,甲烷排放通量与分蘖数、根系干重呈极显著正相关,与根体积呈显著正相关;氧化亚氮排放通量与根体积、地上部干重呈显著正相关,与分蘖数、根系干重呈正相关性,但不显著。

表2 早稻植株特性与甲烷、氧化亚氮排放通量的相关系数

Table 2 Relativity between CH₄ and N₂O emission and the early rice plant characteristics

排放通量	相关系数			
	分蘖数	根体积	地上部干重	根系干重
CH ₄	0.86**	0.69*	0.47	0.77**
N ₂ O	0.35	0.63*	0.59*	0.48

2.2 晚稻品种CH₄和N₂O排放及其与植株特性的相关性

2.2.1 CH₄和N₂O的排放通量及增温潜势

从图3可知,晚稻品种在各生育期甲烷排放变化呈单峰模式,在拔节期达到峰值,排放通量达16.81 ~ 55.17 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,然后迅速下降,在水稻生

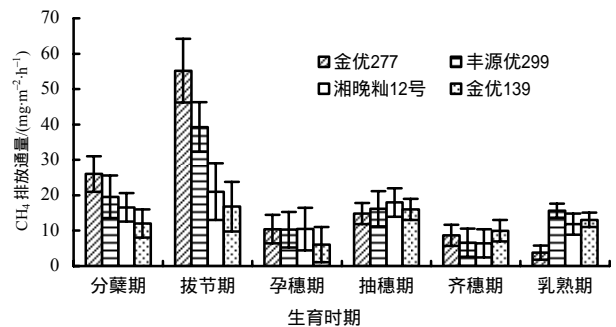


图3 供试晚稻品种不同生育时期甲烷的排放通量
Fig.3 Seasonal variation of CH₄ emission flux during the late rice growth

育中、后期甲烷排放通量很小;拔节期4个水稻品种甲烷排放通量差异较大,以金优277最大,金优139最小,极差达38.36 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

从图4可知,晚稻品种氧化亚氮排放通量随水稻生育进程呈递增趋势,前期排放通量小,在分蘖期至孕穗期均为负值,在乳熟期最大,排放通量达到103.57 ~ 160.87 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。从分蘖期至抽穗期、齐穗前期,4个品种氧化亚氮排放通量之间差异较

小,极差为 9.89 ~ 18.93 μg/(m²·h);齐穗期至乳熟期,各品种氧化亚氮排放通量间差异较大,极差为 48.84 ~ 57.30 μg/(m²·h)。

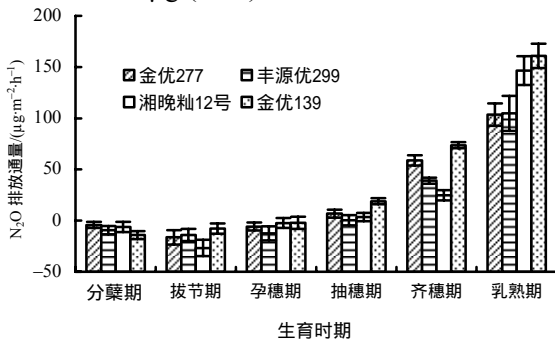


图 4 供试晚稻品种不同生育时期氧化亚氮的排放通量
Fig.4 Seasonal variation of N₂O emission flux during the late rice growth

从表 3 可知,4 个晚稻品种以金优 277 甲烷排放通量均值最大,金优 139 最低,两者相差 7.49 mg/(m²·h),达极显著水平;金优 277 甲烷排放通量

比超级稻丰源优 299、常规稻品种湘晚粳 12 号分别高 1.9、5.77 mg/(m²·h),4 个品种间甲烷排放通量差异达到显著水平($P < 0.05$),金优 277、丰源优 299 与湘晚粳 12 号、金优 139 之间差异达极显著水平($P < 0.01$)。氧化亚氮排放通量以金优 139 最高,湘晚粳 12 号最低;金优 139 比金优 277、丰源优 299、湘晚粳 12 号分别高出 14.4、13.47、21.91 μg/(m²·h),金优 139 与金优 277、丰源优 299 差异达显著水平($P < 0.05$),与湘晚粳 12 号差异达极显著水平($P < 0.01$)。晚稻品种 CH₄ 排放的增温潜势以金优 139 最低,分别比金优 277、丰源优 299、湘晚粳 12 号减少了 3 023、2 241、595 kg/hm²。单位产量温室气体增温潜势以金优 139 最低,金优 277 最高;杂交稻单位产量温室气体增温潜势略高于常规稻,但差异不显著。

表 3 晚稻品种的稻谷产量、排放通量及增温潜势

Table 3 Comparison of yields, average emission fluxes between CH₄ and N₂O and GWPs among the late rice cultivars

品种	CH ₄		N ₂ O		稻谷产量/ (kg·hm ⁻²)	单位产量温室气体 增温潜势/(kg·kg ⁻¹)
	排放通量均值/ (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	增温潜势/ (kg·hm ⁻²)	排放通量均值/ (μg·m ⁻² ·h ⁻¹)	增温潜势/ (kg·hm ⁻²)		
金优 277	19.82aA	8 205	23.83bAB	126	7 416	1.12
丰源优 299	17.92bA	7 418	24.76bAB	131	8 688	0.87
湘晚粳 12 号	14.05cB	5 816	16.32bB	87	7 272	0.81
金优 139	12.33dB	5 104	38.23aA	204	9 000	0.59

2.2.2 CH₄ 和 N₂O 排放通量与植株特性的相关性

从表 4 可知,甲烷排放通量与根体积、根系干重间呈极显著正相关,与分蘖数、地上部干重呈正相关,但不显著;氧化亚氮排放通量与分蘖数、根体积、地上部干重呈显著负相关,而与根系干重相关性不显著。

表 4 晚稻植株特性与甲烷、氧化亚氮排放通量的相关系数
Table 4 Relativity between CH₄ and N₂O emission and the late rice plant characteristics

排放通量	相关系数			
	分蘖数	根体积	地上部干重	根系干重
CH ₄	0.49	0.74**	0.38	0.79**
N ₂ O	-0.87**	-0.69*	-0.72**	0.49

3 结论与讨论

不同生育期的早稻甲烷与氧化亚氮变化趋势

较一致,均表现为前期较高,中后期较低;晚稻前期甲烷排放通量较高,中后期低,氧化亚氮前期排放通量低,中后期较高,与甲烷排放表现为消长关系。分蘖数、根系体积与生物量、地上部生物量对甲烷与氧化亚氮的排放均有不同程度的影响,其中根系是影响甲烷与氧化亚氮排放的关键因素。减少早稻甲烷与氧化亚氮排放的关键时期为分蘖盛期到齐穗期;晚稻甲烷减排的关键时期为分蘖期,减排氧化亚氮主要在水稻生长中后期。

水稻甲烷排放呈现单峰模式,这与前人的研究结果^[2]相一致。早稻期间,随着水稻生育期的推进,水稻植株生长旺盛,同时气温逐步升高,因而导致甲烷排放通量增大;后期由于植株活力衰退,同时土壤中甲烷产量减少,所以甲烷排放通量较小。晚稻前期由于气温高,土壤产生甲烷基质充足,促使甲烷排放通量升高;后期随着气温降低,植株传输

甲烷能力下降,导致甲烷排放量减小。早稻氧化亚氮的变化呈单峰模式,有研究^[16]表明,植株通气组织对稻田甲烷和氧化亚氮排放的贡献率分别为83%~84%、75%~86%,生长前期,随着植株生长加速,传输氧化亚氮能力提高,根系泌氧能力提高,有利于根际微区域氧化亚氮的产生与排放,因而出现排放峰值;生长后期,由于土层淹水,根系活力下降,泌氧能力降低,氧化亚氮产生量减少,加上传输能力下降,导致氧化亚氮排放通量较低。晚稻生育前期氧化亚氮排放通量少,后期排放通量逐渐升高,主要受植株传输能力和土壤氧化亚氮产生率的影响。氧化亚氮排放变化规律与前人的研究^[14]不一致,其原因在于灌水管理方式上的差异所致。本试验过程中保持浅水灌溉,而没有进行排水晒田。

相关研究^[17]表明,一般情况下稻田甲烷排放与水稻的生物总量成反比关系,生物量大的水稻品种可以把更多的碳固定在水稻植株中,从而减少甲烷排放。本研究结果也表明,杂交稻较常规稻生物量大,杂交稻甲烷排放量较常规稻小,增温潜势更弱。温室气体排放受多种因素的影响,生物量仅为其中影响因素之一。根系是影响水稻植株泌氧能力、吸收溶解态甲烷与氧化亚氮以及传输甲烷与氧化亚氮的主要因素。本研究结果表明,根系体积、根系干重与甲烷、氧化亚氮排放呈显著相关,早稻均表现为正相关,说明根系对甲烷与氧化亚氮排放起促进作用;晚稻表现为与甲烷排放呈正相关,与氧化亚氮排放呈负相关,甲烷与氧化亚氮排放呈消长关系,这与前人研究结果^[14]相一致。

中国农业科学院研究生石生伟、中国农业大学研究生朱波、湖南农业大学研究生沈建凯、高文娟、龙攀等在气体取样与测定过程中给予了大力支持与帮助,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Mitigation of climate change. Contribution of working group to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 2007: 63-67.
- [2] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 19-31.
- [3] 侯爱新, 陈冠雄, 吴杰, 等. 稻田CH₄和N₂O排放关系及其微生物学机理和一些影响因子[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 270-274.
- [4] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 722-732.
- [5] 段彬伍, 卢婉芳, 陈菁, 等. 种植杂交稻对甲烷排放的影响及评价[J]. 中国环境科学, 1999, 19(5): 397-401.
- [6] 邵可声, 李震. 水稻品种以及施肥措施对稻田甲烷排放的影响[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1996, 32(4): 505-513.
- [7] 王增远, 徐雨昌, 李震, 等. 水稻品种对稻田甲烷排放的影响[J]. 作物学报, 1999, 25(4): 441-446.
- [8] Lindau C W, Bollich P K, DeLaune R D. Effect of rice variety on methane emission from Louisiana rice [J]. Agric Ecosyst Environ, 1995, 54: 109-114.
- [9] Aulakh M S, Bodenbender J, Wassmann R, et al. Methane transport capacity of rice plants. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics[J]. Nutr Cycling Agroecosystem, 2000, 58: 367-376.
- [10] 傅志强, 黄璜, 何保良, 等. 水稻植株通气系统与稻田CH₄排放相关性研究[J]. 作物学报, 2007, 33(9): 1458-1467.
- [11] 傅志强, 黄璜, 陈灿, 等. 稻-鸭复合系统中灌水深度对甲烷排放的影响[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2006, 32(6): 632-636.
- [12] 黄耀, 蒋静燕, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田N₂O排放的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 20-23.
- [13] 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.
- [14] 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统CH₄和N₂O排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 346-350.
- [15] Boucher O, Haigh J, Hauglustaine D, et al. Radiative forcing of climate [C]//IPCC Scientific Assessment, Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 388-389.
- [16] Yu K W, Wang Z P, Chen G X. Nitrous oxide and methane transport through rice plants[J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 24(3): 341-343.
- [17] 任丽新, 王庚辰, 张仁健, 等. 成都平原稻田甲烷排放的实验研究[J]. 大气科学, 2002, 26(6): 731-743.

责任编辑: 杨盛强