

水稻根系生物特性与稻田温室气体排放相关性研究

傅志强^{1,2}, 朱华武¹, 陈 灿¹, 黄 璜^{1,2*}

(1.湖南农业大学农学院,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,长沙 410128)

摘 要:通过湖南双季稻区温室气体排放差异的水稻品种田间试验,研究了不同品种温室气体排放与根系特征的相关性。结果表明,早稻分蘖盛期 CH_4 排放通量与根干重、伤流量均呈显著负相关($P<0.05$);晚稻 CH_4 排放通量与根伤流量呈极显著负相关($P<0.01$);早稻 N_2O 排放通量在分蘖盛期与根伤流量相关性极显著($P<0.01$),在齐穗期与根体积、干重、根伤流量均呈极显著负相关($P<0.01$);晚稻分蘖盛期,根系干重与体积均与 N_2O 排放通量呈显著正相关($P<0.05$);齐穗期,根系体积与 N_2O 排放通量呈显著负相关($P<0.05$);早稻分蘖盛期 CO_2 排放通量与根系干重和根伤流量呈显著正相关关系($P<0.05$),晚稻齐穗期根系伤流量与 CO_2 排放通量负相关性达到极显著水平($P<0.01$)。因此,根系特性是影响水稻温室气体排放的重要因素。

关键词:水稻;温室气体;根系;相关性

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)12-2416-06

Research on the Correlation Between the Greenhouse Gases Emission from Paddy Field and the Biological Characteristics of Rice Root System

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

(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: A one-year's field experiment was conducted to study the correlation between the greenhouse gases emission and the root characteristics using early and late rice cultivars with different greenhouse gases emission fluxes in Hunan double cropping rice area. The results showed that CH_4 emission flux was negatively correlated with root dry weight($P<0.05$) and amount of root exudates($P<0.05$) at the full tillering stage of early rice, and was negatively correlated with amount of root exudates($P<0.01$) in late rice. The N_2O emission flux was negatively correlated with amount of root exudates($P<0.01$) at the full-tiller stage, and with root volume($P<0.01$) and root dry weight($P<0.01$) and amount of root exudates($P<0.01$) at the full-earring stage of early rice, and was positively correlated with root dry weight($P<0.05$) and root volume($P<0.05$) at the full-tiller stage, and was negatively correlated with root volume($P<0.05$) at the full-earring stage in late rice. The CO_2 emission flux was positively correlated with root dry weight($P<0.05$) and root exudates($P<0.05$) at the early rice full-tiller stage, but was negatively correlated with root volume($P<0.01$) at the late rice full-tiller stage, and was negatively correlated with root exudates($P<0.01$) at the late rice full-earring stage. Therefore, rice root characteristics were an important factor to influence the greenhouse gases emission in paddy field.

Keywords: rice; greenhouse gas; root system; correlation

二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是与全球气候变化密切相关的主要温室气体。稻田土壤作为大气中 CH_4 和 N_2O 的重要来源一直受到国内外的普遍关注^[1-6]。研究表明,灌溉稻田每年向大气排放的

CH_4 占全球 CH_4 总排放量的 9%~19%^[7]。我国是重要的水稻生产国,水稻种植面积约占全球的 18.7%^[8]。据估计,我国稻田每年向大气排放的 CH_4 量约为 6.15 Mt,排放的 N_2O 占我国农田总排放的 7%~11%^[9]。

水稻植株是强烈影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的重要植物载体,其生长发育影响着 CH_4 和 N_2O 的产生、排放。研究发现植株通气组织对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的贡献率分别为 83%~84%和 75%~86%^[10]。水稻根系是影响稻田 CH_4 产生、氧化与排放的重要因素。关

收稿日期:2011-04-23

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。E-mail:zqf_cis@126.com

* 通讯作者:黄 璜 E-mail:hh863@126.com

于水稻根系对 CH_4 排放的影响已有文献报道^[11-14]。水稻植株通过改变根际 pH 和氧化还原环境、影响土壤结构等方式对 N_2O 排放产生作用^[15-16]。但根系对 N_2O 排放的影响以及 3 种主要温室气体(CH_4 、 N_2O 、 CO_2) 排放与水稻根系生物量、体积和根伤流量的相关性研究较少。为此,本研究通过系统观测双季稻区不同水稻品种温室气体排放以及根系特性,对两者之间的相关性进行分析,以期为进一步研究根际微区域特性对温室气体排放的影响以及为建立不同水稻品种温室气体排放高低定性评估指标体系提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种

早稻组合:湘早籼 24 号、湘早籼 17 号、湘早籼 45 号、金优 402、T 优 705、陆两优 819、株两优 211。晚稻组合:玉针香、玉柱香、湘晚籼 12 号、湘晚籼 13 号、岳优 9113、威优 277、丰源优 299。

1.2 试验设计

试验地点位于湖南省长沙县干杉乡大屋组的水稻田(N 28°08'18", E 113°12'0"),海拔 42 m,年平均温度为 17.1 °C,年降水量 1 500 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,土壤 pH 6.10,有机质 33.30 g·kg⁻¹、全氮 1.79 g·kg⁻¹、全磷 0.71 g·kg⁻¹、全钾 8.80 g·kg⁻¹、碱解氮 0.16 g·kg⁻¹、有效磷 9.60 mg·kg⁻¹、速效钾 0.10 g·kg⁻¹。

早、晚稻组合各 7 个,每个组合 3 次重复,共计 21 个试验小区。采用单因素随机区组排列,每个小区面积 10 m²,试验田块面积 300 m²。每个小区放置取样箱底座一个,取样箱底座在移栽前 2 d 固定在各小区内,定点取样。每个区组四周田埂用塑料薄膜覆盖,并把下边扎入 25 cm 深泥层,每个区组设一个进水口与排水口。区组间留有 0.5 m 过道。早稻于 3 月 27 日播种,4 月 28 日移栽,7 月 15 日收获;晚稻于 6 月 15 日播种,7 月 19 日移栽,10 月 18 日收获。栽植规格为 20 cm×20 cm,常规稻每蔸 4 苗,杂交稻每蔸 2 苗。实验区四周设保护行。早稻每个区组施基肥:尿素 3 kg,过磷酸钙 3.5 kg,钾肥 2 kg。5 月 8 日施追肥:每区组尿素 1 kg。晚稻移栽前每个区组施基肥:尿素 2 kg,过磷酸钙 3 kg,钾肥 1.5 kg。每个区组于 7 月 24 日追施尿素 1 kg。病虫害防治根据实际情况进行。前期浅水促蘖,中期排水晒田,后期浅水灌浆,成熟期排水收割。

1.3 观测指标与方法

温室气体用密闭静态箱采样,采样箱为圆柱体,采用玻璃钢材料制成,箱底直径 55 cm,高 120 cm,于水稻栽插前将塑胶底座固定于每个小区中,底座中有 4 穴水稻,测定时加水注入底槽加以密封。温室气体采样时间固定在上午 9:00—10:00,采样时间分别为罩箱后的 0、10、20、30 min,每次抽取 45 mL 气体样品。气体样品采用 Agilent 7890A 气相色谱仪分析,标准气体由国家标准物质中心提供。气体排放率由 4 个气样浓度值经线性回归分析得出。根系取样在分蘖盛期与齐穗期和温室气体采样同时进行,隔 3 d 取样一次,共计 2 次,从每个小区取植株 3 穴,即每个品种取植株 9 穴。采用田间土柱法,即先割下植株地上部,后以植株为中心,用铁铲截取 20 cm×20 cm×20 cm 土层,测定整株根系,用常规方法测定根系体积与生物量。采用整株脱脂棉吸液法测定根系伤流量。

1.4 数据处理

稻田温室气体排放通量计算公式如下^[1]:

$$F = \rho \cdot 273 / (273 + T) \cdot H \cdot dC / dt$$

式中: F 为排放通量; ρ 为标准大气压下的 CH_4 、 N_2O 以及 CO_2 密度,分别为 0.714、1.98、1.97 kg·m⁻³; T 为采样过程中采样箱内的平均温度,°C; H 是采样箱的箱罩的净高度,m; dC/dt 是采样箱内温室气体浓度的变化率。根系特性数据均为 2 次采样结果的平均值,相关系数显著性判断采用 t 检验法。

2 结果与分析

2.1 早稻温室气体排放与根系特性相关性

2.1.1 不同早稻温室气体排放比较

分蘖盛期 CH_4 排放通量湘早籼 45 号、湘早籼 17 号与陆两优 819、金优 402、湘早籼 24 号差异显著;湘早籼 45 号最高,陆两优 819 最低,极差为 0.87 mg·m⁻²·h⁻¹; 杂交稻 CH_4 平均排放通量比常规稻低 20.8%;齐穗期 CH_4 排放通量各品种间差异不显著,湘早籼 24 号最高,湘早籼 17 号最低,极差为 0.67 mg·m⁻²·h⁻¹,杂交稻比常规稻高 2.5%。分蘖盛期 N_2O 排放通量品种间差异显著,株两优 211 最高,湘早籼 24 号最低,极差为 41.95 μg·m⁻²·h⁻¹,杂交稻比常规稻高 114.9%;齐穗期 N_2O 排放通量以株两优 211 最高,显著高于其他品种,以湘早籼 17 号最低,极差为 3.97 μg·m⁻²·h⁻¹,杂交稻比常规稻高 65.1%。分蘖盛期、齐穗期品种间 CO_2 排放通量差异显著,极差分别为 92.02、58.07 mg·m⁻²·h⁻¹,杂交稻比常规稻分别高 11.8%、12.4%。

2.1.2 早稻品种根系特性比较

由表 2 可知,分蘖盛期根体积、根系干重均以陆两优 819 最大,湘早籼 24 号最小,极差分别为 29.5 mL·株⁻¹、1.6 g·株⁻¹;根系伤流量以陆两优 819 最大,湘早籼 45 号最小,两者相差 5 g·h⁻¹。齐穗期根体积、根干重以陆两优 819 最大,湘早籼 24 号最小,极差分别为 26.9 mL·株⁻¹、1.1 g·株⁻¹;根系伤流量以陆两优 819 最大,湘早籼 17 号最小,极差为 13 g·h⁻¹。分蘖盛期和齐穗期,杂交稻根系体积分别比常规稻高出 18.4、19.7 mL·株⁻¹,根系干重分别高出 0.9、0.7 g·株⁻¹,杂交稻根系伤流量大于常规稻,表明杂交稻根系比常规稻发达。

2.1.3 根系特性与温室气体排放相关性

从表 3 可知,CH₄ 排放通量与根体积、根系干重、

根伤流量均呈负相关关系,而且在分蘖盛期根系干重和根系伤流量与之相关性显著,但齐穗期相关性均不显著;N₂O 排放通量与根系特性间呈负相关关系,在分蘖盛期与根伤流量相关性达极显著水平($P<0.01$),在齐穗期与根体积、干重、根伤流量均呈极显著负相关($P<0.01$);CO₂ 排放通量与根系特性呈正相关,在分蘖盛期与根系干重和根伤流量呈显著正相关关系($P<0.05$)。

2.2 晚稻温室气体排放与根系特性相关性

2.2.1 不同晚稻温室气体排放比较

由表 4 可知,品种间 CH₄ 排放通量在分蘖盛期与齐穗期均存在显著差异。分蘖盛期以湘晚籼 13 号最高,威优 277 最低;齐穗期以湘晚籼 12 号最高,威优

表 1 早稻品种分蘖盛期与齐穗期温室气体排放通量比较

Table 1 Greenhouse gases emission fluxes comparison among the early rice cultivars at the full-tillering stage and the full-earring stage							
水稻类型	品种名称	分蘖盛期			齐穗期		
		CH ₄ /mg·m ⁻² ·h ⁻¹	N ₂ O/μg·m ⁻² ·h ⁻¹	CO ₂ /mg·m ⁻² ·h ⁻¹	CH ₄ /mg·m ⁻² ·h ⁻¹	N ₂ O/μg·m ⁻² ·h ⁻¹	CO ₂ /mg·m ⁻² ·h ⁻¹
杂交稻	株两优 211	1.44ab	51.62a	78.17d	1.61ab	5.91a	91.31d
	陆两优 819	1.06b	22.04b	125.11a	1.95a	3.08b	104.71b
	T 优 705	1.40ab	11.66c	54.57f	2.01a	3.59b	138.92a
	金优 402	1.20b	10.11cd	69.28e	1.92a	2.38bc	97.70c
常规稻	湘早籼 45 号	1.93a	12.16c	33.09g	1.69ab	2.52bc	101.74b
	湘早籼 24 号	1.13b	9.67d	102.75b	2.23a	3.16b	105.97b
	湘早籼 17 号	1.77a	11.47c	83.59c	1.56ab	1.94c	80.85e

注:同一列不同小写字母表示差异显著(5%)。下表同。

表 2 早稻不同品种根系特性

Table 2 Root characteristics of the early rice cultivars							
水稻类型	品种	分蘖盛期			齐穗期		
		根体积/mL·株 ⁻¹	根系干重/g·株 ⁻¹	根伤流量/g·h ⁻¹	根体积/mL·株 ⁻¹	根系干重/g·株 ⁻¹	根伤流量/g·h ⁻¹
杂交稻	株两优 211	82.5	3.1	22.2	93.2	6.2	93.4
	陆两优 819	95.3	3.7	24.4	97.5	6.7	98.4
	T 优 705	84.3	3.3	23.3	94.5	6.2	95.2
	金优 402	86.5	2.8	23.2	95.2	6.3	94.3
常规稻	湘早籼 45 号	72.3	2.5	19.3	78.6	5.8	89.3
	湘早籼 24 号	65.8	2.1	20.1	70.6	5.6	86.1
	湘早籼 17 号	68.6	2.3	18.1	77.9	5.7	85.2

表 3 早稻根系特性与温室气体排放通量相关性

Table 3 Correlation between root characteristics and the greenhouse gases emission fluxes in the early rice						
温室气体	分蘖盛期			齐穗期		
	体积	干重	根伤流量	体积	干重	根伤流量
CH ₄	-0.481	-0.641*	-0.637*	-0.527	-0.302	-0.376
N ₂ O	-0.453	-0.379	-0.723**	-0.838**	-0.849**	-0.890**
CO ₂	0.619	0.769**	0.539*	0.417	0.153	0.219

注: $r_{0.05}(12)=0.532$, $r_{0.01}(12)=0.661$, $n=14$,*,** 分别表示相关显著性达 0.05 和 0.01 水平,下表同。

277 最低,分蘖盛期与齐穗期极差分别为 7.09、1.78 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,常规稻比杂交稻分别高出 30.7%、28.5%。 N_2O 排放通量品种间差异显著,分蘖盛期为负值,齐穗期排放通量较高;分蘖盛期与齐穗期极差分别为 15.93、21.33 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,分蘖盛期常规稻排放通量比杂交稻低 19.4%,齐穗期比杂交稻高 16.0%。 CO_2 排放通量品种间存在显著差异,分蘖盛期与齐穗期的极差分别为 226.57、96.86 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,分蘖盛期常规稻排放通量比杂交稻低 23.3%,齐穗期常规稻比杂交稻高 6.3%。

2.2.2 品种根系特性比较

由表 5 可知,分蘖盛期根系干重以湘晚籼 13 号最大,玉柱香最小,极差为 1.58 $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$,杂交稻比常规稻高 9.5%,杂交稻根系体积比常规稻高 21.7%。根系伤流量以岳优 9113 最大,湘晚籼 13 号最小,极差为 14 $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$,杂交稻比常规稻高 27.2%。在水稻齐穗期(表 5),根系干重以岳优 9113 最大,玉柱香最小,两者相

差 1.80 $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$,杂交稻比常规稻高出 17.6%。根系体积以岳优 9113 最大,玉柱香、威优 277 最小,相差 17.0 $\text{mL}\cdot\text{株}^{-1}$,杂交稻比常规稻高出 5.6%。根系伤流量以威优 277 最大,玉针香最小,极差为 32 $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$,杂交稻比常规稻高出 8.5%。

2.2.3 晚稻温室气体排放与根系特性的相关性

从表 6 可知,分蘖盛期,根系干重以及根系体积均与 CH_4 气体排放通量呈正相关,但不显著;根系伤流量与 CH_4 排放通量呈极显著负相关($P<0.01$)。在齐穗期,根系伤流量与 CH_4 排放通量呈显著负相关。分蘖盛期,根系干重与体积均与 N_2O 排放通量相关性显著($P<0.05$),且呈正相关;齐穗期,根系体积与 N_2O 排放通量相关性显著($P<0.05$),且呈负相关;分蘖盛期根系体积、干重与 CO_2 排放呈负相关,与根伤流量呈正相关,但均不显著;齐穗期根系干重与体积以及根系伤流量均与 CO_2 排放通量呈负相关,但仅根系伤流量与之相关性达到极显著水平($P<0.01$)。

表 4 晚稻分蘖盛期与齐穗期温室气体排放通量
Table 4 Greenhouse gases emission fluxes of the late rice cultivars at the full-tillering stage and the full-earring stage

水稻类型	品种名称	分蘖盛期			齐穗期		
		$\text{CH}_4/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{N}_2\text{O}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{CO}_2/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{CH}_4/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{N}_2\text{O}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{CO}_2/\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$
杂交稻	丰源优 299	6.49c	-12.66e	789.10ab	1.54b	5.37e	440.50d
	岳优 9113	6.12c	-14.74f	804.78a	1.23bc	14.69c	491.75bc
	威优 277	4.03d	-3.25b	688.71c	0.60c	18.16b	427.99e
常规稻	湘晚籼 13 号	11.12a	-17.62g	738.93b	1.83ab	26.70a	484.42c
	玉针香	8.21b	-6.60c	573.90d	0.66c	10.04d	423.63e
	湘晚 12 号	6.50c	-1.69a	570.21d	2.38a	13.91c	506.93b
	玉柱香	6.18c	-8.31d	584.65d	1.41b	10.04d	520.49a

表 5 晚稻品种根系特性
Table 5 The root characteristics of the late rice cultivars

生育期	根特性	丰源优 299	威优 277	岳优 9113	玉柱香	湘晚 13 号	湘晚 12 号	玉针香
分蘖盛期	根系伤流量/ $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	35.20	32.10	36.30	26.20	22.40	25.40	27.30
	根系干重/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$	1.82	3.10	2.93	1.59	3.17	2.34	2.25
	根系体积/ $\text{mL}\cdot\text{株}^{-1}$	30.50	41.20	41.40	21.50	40.30	31.40	25.30
齐穗期	根系伤流量/ $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$	94.30	98.40	110.30	84.20	88.20	78.10	99.40
	根系干重/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$	2.41	3.51	1.93	2.73	1.71	2.46	2.06
	根系体积/ $\text{mL}\cdot\text{株}^{-1}$	31.50	42.50	25.50	37.10	25.50	39.30	27.20

表 6 晚稻温室气体排放与根系特性相关性
Table 6 Correlation between the greenhouse gases emission fluxes and the characters of the late rice root system

温室气体	分蘖盛期			齐穗期		
	根系伤流量	根系干重	根系体积	根系伤流量	根系干重	根系体积
CH_4	-0.752**	0.352	0.433	-0.886**	-0.425	-0.164
N_2O	0.132	0.622*	0.692**	0.035	-0.515	-0.754**
CO_2	0.489	-0.286	-0.074	-0.788**	-0.220	-0.223

3 讨论

3.1 CH₄ 排放通量与根系特性相关性

早晚稻品种间 CH₄ 排放通量存在显著差异,杂交稻低于常规稻,这与前人研究结果一致^[17-19]。早稻 CH₄ 排放通量与根系特性间均呈负相关关系,在分蘖盛期根系干重和根系伤流量与之相关性显著。研究认为,一般情况下,稻田 CH₄ 排放和水稻的植物总重量成反比关系,即具有较大植物总重量的水稻品种的稻田 CH₄ 排放较小。水稻生物量大,吸收与固定的碳量高,从而减少了 CH₄ 排放量^[20],这与本研究基本一致。晚稻 CH₄ 排放与根系干重、体积相关性不显著,分蘖盛期两者呈正相关,而齐穗期呈负相关。因此,根系生物量对 CH₄ 排放的影响与水稻生育时期相关联。晚稻 CH₄ 排放通量与根系伤流量呈极显著负相关。可能的原因是根系活力越大,促进了根系氧化能力和泌氧能力,根际 Eh 值上升,抑制产 CH₄ 菌活性,同时增强了 CH₄ 氧化菌活性,促进了 CH₄ 的氧化,从而导致 CH₄ 排放通量减少。

3.2 N₂O 排放通量与根系特性相关性

早稻 N₂O 排放通量与根系特性间呈负相关关系,在分蘖盛期与根伤流量相关性达极显著水平,在齐穗期与根体积、干重、根伤流量均呈极显著负相关。其原因可能是分蘖盛期植株根系发达,根系活力强,泌氧化力强,影响根际微区域的硝化与反硝化微生物活性,改变微生物活动的土壤生态环境,降低了 N₂O 产生量,减少了 N₂O 排放^[21-22]。晚稻分蘖盛期根系干重与体积均与 N₂O 排放通量相关性显著,且呈正相关;齐穗期根系体积与 N₂O 排放通量呈显著负相关。晚稻根体积、干重在分蘖期与齐穗期对 N₂O 排放的影响不同。其差异产生的原因可能是在分蘖盛期根系生物量大,根系吸收与传输 N₂O 能力强,从而导致 N₂O 排放量增加,因而根系特性与 N₂O 排放表现为显著正相关。而在齐穗期,一方面可能是由于排水晒田后期,土壤通透性高,土壤 N₂O 排放主要通过土壤表层排放;另一方面 N₂O 产生与排放受氧的有效性、无机氮肥及 N₂O 在水中的溶解度等因素的影响^[23-24]。根系发达,根体积大,根系活力强,与微生物竞争 NO₃⁻,减弱了反硝化作用,从而减少了 N₂O 的产生量,排放量相应减少。

3.3 CO₂ 排放通量与根系特性相关性

早稻期间,分蘖盛期的水稻植株向土壤输氧能力增强,根系生长旺盛,呼吸量大,同时温度适宜土壤微

生物的繁殖,促使土壤呼吸作用增强;也可能因为水稻的分泌物增加,土壤微生物活动加剧,而且根系生物量大,根系活力越强的水稻品种更加能促进土壤的呼吸与微生物的活动,促进了土壤 CO₂ 的排放^[25]。因此,早稻分蘖盛期,CO₂ 排放通量与根系特性呈正相关,在分蘖盛期与根系干重和根伤流量呈显著正相关关系。晚稻分蘖盛期,一方面植株生长旺盛,根系体积越大,根系泌氧能力越强,植株光合作用能力越强,吸收更多的 CO₂,排放更多的 O₂;另一方面由于气温较低,土壤保持湿润状态,不利于土壤产生的 CO₂ 排放。根系体积越大,活力越强,CO₂ 排放量越少。因此,晚稻分蘖盛期与齐穗期根系体积与干重、齐穗期根系伤流量均与 CO₂ 排放通量呈负相关。当然,由于水稻光合作用与呼吸作用对静态密闭箱中 CO₂ 浓度产生很大影响,因此水稻根系特性对 CO₂ 排放的作用还有待更深入研究。

4 结论

早晚稻品种间 CH₄ 排放通量存在显著差异,杂交稻低于常规稻,根系伤流量与 CH₄ 排放通量呈极显著负相关。在早稻分蘖盛期,CH₄ 排放通量与水稻根系干重和根系伤流量均呈显著负相关,而晚稻根系干重以及根系体积均与 CH₄ 气体排放通量呈正相关,但不显著。

在早稻分蘖盛期,N₂O 排放通量与根伤流量极显著相关;在齐穗期,与根体积、干重、根伤流量均呈极显著负相关;在晚稻分蘖盛期,根系干重与体积均与 N₂O 排放通量相关性显著,且呈正相关;在齐穗期,根系体积与 N₂O 排放通量呈显著负相关。

在早稻分蘖盛期,CO₂ 排放通量与根系干重和根伤流量均呈显著正相关关系。在晚稻齐穗期,根系伤流量与 CO₂ 排放通量负相关性达到极显著水平。

参考文献:

- [1] ZHENG Xun-hua, Wang Ming-xing, Wang Yue-si, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields[J]. *Advances Atmospheres Science*, 1998, 15(4): 569-579.
- [2] 蔡祖聪, 谢德体, 徐 华, 等. 冬灌田影响水稻生长期甲烷排放量的因素分析[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 705-709.
CAI Zu-cong, XIE De-ti, XU Hua, et al. Factors influencing CH₄ emission from permanently flooded rice field during rice growing period[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 705-709.
- [3] Chen G X, Huang B, Yu KW, et al. Nitrous oxide and methane emissions from soil plant systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49:

- 41–45.
- [4] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India [J]. *Chemosphere*, 2003, 51:181–192.
- [5] 熊正琴, 邢光熹, 施书莲, 等. 轮作制度对水稻生长季节稻田氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10):1761–1764.
- XIONG Zheng-qin, XING Guang-xi, SHI Shu-lian, et al. Effects of cropping systems on nitrous oxide emissions from paddy soil during the rice-growing season [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10):1761–1764.
- [6] 徐慧, 张秀君, 韩士杰, 等. 自然状态下树木排放 N_2O 的研究[J]. 环境科学, 2001, 2(5):7–11.
- XU Hui, ZHANG Xiu-jun, HAN Shi-jie, et al. N_2O emission by trees under natural condition[J]. *Environmental Science*, 2001, 2(5):7–11.
- [7] Denman K L, Brasseur G, Chidthaisong A, et al. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry[M]/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. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge university press, 2007.
- [8] Trends in the rice economy: rice production, area, and yield[DB/OL]. (2009-01-28)[2009-04-08]. http://beta.irri.org/statistics/index.php?Option=com_content&task=view&id=413&Itemid=352.
- [9] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, et al. Quantifying direct N_2O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41:8030–8042.
- [10] 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.
- [11] Lindau C W, Bollich P K, DeLaune R D. Effect of rice variety on methane emission from Louisiana rice [J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1995, 54:109–114.
- [12] Aulakh M S, Bodenbender J, Wassmann R, et al. Methane transport capacity of rice plants II. Variations among different rice cultivars and relationship with morphological characteristics [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58:367–376.
- [13] Wang B J, Neue H U, Samonte H P. Role of rice in mediating methane emission[J]. *Plant Soil*, 1997, 189:107–115.
- [14] Wang B J, Adachi K. Differences among rice cultivars in root exudation, methane oxidation, and populations of methanogenic and methanotrophic bacteria in relation to methane emission[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58:349–356.
- [15] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和质地对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4):499–505.
- XU Hua, XING Guang-xi, CAI Zu-cong, et al. Effect of soil water regime and soil texture on N_2O emission from rice paddy field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4):499–505.
- [16] 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 等. 水分状况对水田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(4):482–489.
- YAN Xiao-yuan, SHI Shu-lian, DU Li-juan, et al. N_2O emission from paddy field soil as affected by water regime[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4):482–489.
- [17] 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.
- WANG Zeng-yuan, XU Yu-chang, LI Zhen, et al. Effect of rice cultivars on methane emissions from rice field [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(4):441–446.
- [18] 傅志强, 黄璜, 何保良, 等. 水稻植株与 CH_4 排放的相关因子及模糊聚类分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):50–57.
- FU Zhi-qiang, HUANG Huang, HE Bao-liang, et al. Related factors of methane emission in rice plant and fuzzy cluster analysis [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27(1):50–57.
- [19] 段彬伍, 卢婉芳, 陈苇, 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.
- DUAN Bin-wu, LU Wan-fang, CHEN Wei, et al. Evaluation of the effect of planted hybrid rice on methane emission from paddy field[J]. *Chinese Environmental Science*, 1999, 19(5):397–401.
- [20] 李晶, 王明星, 陈德章. 水稻田甲烷的减排方法研究[J]. 中国农业气象, 1997, 18(6):9–14.
- LI Jing, WANG Ming-xing, CHEN De-zhang. Studies on mitigation of methane emission from rice field[J]. *Chinese Journal of Agrimeteorology*, 1997, 18(6):9–14.
- [21] 史刚荣. 植物根系分泌物的生态效应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1):97–101.
- SHI Gang-rong. Ecological effects of plant root exudates[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1):97–101.
- [22] 王大力, 尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能[J]. 生态学报, 2000, 20(5):1869–1874.
- WANG Da-li, YIN Cheng-qing. Functions of root channels in the soil system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5):1869–1874.
- [23] Yang S S, Chang E H. Effect of fertilizer application on methane emission/production in paddy soils of Taiwan[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25:245–251.
- [24] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 种植夏季豆科作物对旱地 N_2O 排放贡献的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9):1104–1108.
- XIONG Zheng-qin, XING Guang-xi, Tsuruta H, et al. The effects of summer legume crop cultivation on nitrous oxide emissions from upland farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9):1104–1108.
- [25] 梁巍, 岳进, 吴吉力, 等. 微生物生物量 C、土壤呼吸的季节性变化与黑土稻田 CH_4 排放[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12):2278–2280.
- LIANG Wei, YUE Jin, WU Ji-li, et al. Seasonal variations of soil microbial biomass, respiration rate and CH_4 emission in black earth rice fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12):2278–2280.