

长江三角洲主要超级稻 CH₄ 排放特征及其与植株生长特性的关系*

闫晓君¹ 王丽丽¹ 江瑜¹ 邓艾兴² 田云录³ 张卫建^{1,2}

(¹南京农业大学应用生态研究所, 南京 210095; ²中国农业科学院作物科学研究所农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 北京 100081; ³南京农业大学水稻研究所, 南京 210095)

摘要 采用盆栽试验研究了长江三角洲 14 个主要超级稻品种(6 个粳型超级稻和 8 个籼型杂交超级稻)CH₄排放特征及其与植株生长特性之间的关系. 结果表明: 粳型和籼型超级稻全生育期 CH₄排放均呈双峰模式, 排放峰值分别出现在分蘖盛期和孕穗期. 粳型超级稻的平均 CH₄排放总量比籼型超级稻高 37.6% ($P < 0.01$), 品种间排放差异主要出现在生长后期. 虽然两种类型超级稻的 CH₄排放总量均与最大叶面积呈显著正相关, 但 CH₄排放与其他生长特性的关系因品种类型而异. 在株高上, 粳型超级稻 CH₄排放总量与株高呈显著正相关, 而籼型超级稻的相关不显著. 在生产力上, 籼型超级稻 CH₄排放总量与其总生物量、籽粒产量和收获指数呈显著负相关, 而粳型超级稻的相关不显著. 籼型超级稻 CH₄排放量低主要是由于其根系生物量显著高于粳型超级稻.

关键词 气候变暖 粮食安全 温室气体 生产力 超级稻 长江三角洲

文章编号 1001-9332(2013)09-2518-07 **中图分类号** S181 **文献标识码** A

CH₄ emission features of leading super-rice varieties and their relationships with the varieties growth characteristics in Yangtze Delta of China. YAN Xiao-jun¹, WANG Li-li¹, JIANG Yu¹, DENG Ai-xing², TIAN Yun-lu³, ZHANG Wei-jian^{1,2} (¹*Institute of Applied Ecology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*; ²*Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology & Production, Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; ³*Institute of Rice, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(9): 2518-2524.

Abstract: A pot experiment was conducted to study the CH₄ emission features of fourteen leading super-rice varieties (six *Japonica* rice varieties and eight *Indica* hybrid rice varieties) and their relationships with the varieties growth characteristics in Yangtze Delta. Two distinct peaks of CH₄ emission were detected during the entire growth period of the varieties, one peak occurred at full-tillering stage, and the other appeared at booting stage. The average total CH₄ emission of *Japonica* rice varieties was 37.6% higher than that of the *Indica* hybrid rice varieties ($P < 0.01$), and the differences in the CH₄ emission between rice types occurred at the post-anthesis phase. For all the varieties, there was a significant positive correlation between the total CH₄ emission and the maximum leaf area, but the correlations between the CH₄ emission and the other growth characteristics varied with variety type. The total CH₄ emission of *Japonica* rice varieties had a significant positive correlation with plant height, while the correlations between the total CH₄ emission of *Indica* hybrid rice varieties and their plant height were not significant. The total CH₄ emission of *Indica* hybrid rice varieties had significant negative correlations with the total aboveground biomass, grain yield, and harvest index, but the correlations were not significant for *Japonica* rice varieties. The lower CH₄ emission of *Indica* hybrid rice varieties was likely due to their significantly higher root biomass, as compared with *Japonica* rice varieties.

Key words: climate warming; food security; greenhouse gas; productivity; super-rice; Yangtze Delta.

* 国家“十二五”粮食丰产科技工程项目(2011 号 BAD16B14)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项和南京农业大学青年科技创新基金项目(KJ2012002)资助.

** 通讯作者. E-mail: zwj@njau.edu.cn

2013-01-06 收稿, 2013-07-06 接受.

CH₄ 是大气中仅次于 CO₂ 的重要温室气体, 单位质量的 CH₄ 在百年尺度上的增温潜势是 CO₂ 的 25 倍^[1]. 稻田是大气 CH₄ 的重要排放源之一, 约占全球 CH₄ 排放总量的 5.3% ~ 19%^[2]. 水稻是我国最重要的口粮作物, 全国 60% 以上的人口以稻米为主食. 随着人口增长和经济发展, 我国的粮食需求仍将呈现持续刚性增长. 到 2030 年, 我国的水稻产量必须较现有水平提高 20%, 才能满足需求^[3]. 在现有稻田面积不减少的前提下, 进一步提高水稻单产是确保粮食安全的必由之路. 目前我国碳排放总量已居世界首位, 其中水稻种植每年排放 CH₄ 达 7.2 ~ 9.5 Tg^[4], 有关我国稻田 CH₄ 排放的问题倍受国际关注. 因此, 在确保水稻持续增产的同时, 能否实现稻田 CH₄ 显著减排, 是我国现代水稻生产面临的新挑战.

近年来, 超级稻以其显著的产量优势在我国的推广面积迅速增加, 2011 年在全国的示范推广面积达到 733 万 hm², 占全国水稻种植面积的 24.7%^[5]. 大量研究表明^[6-7], 与常规水稻相比, 超级稻的增产优势主要表现在叶面积指数较大、光合速率高、根量大、根系活性强及物质生产力高等方面. 而 Lindau 等^[8] 研究发现水稻干物质质量、根体积、根系干物质质量、分蘖数及产量均与稻田 CH₄ 排放量呈正相关; 黄耀等^[9] 研究发现, 水稻的物质生产力与稻田 CH₄ 排放量也呈正相关. 因此, 超级稻的生产力优势是否将成为 CH₄ 排放优势, 成为学界和公众广泛关注的新的焦点. 目前有关不同水稻品种 CH₄ 排放特征及其与植株生长特性的关系研究, 大多集中在常规水稻品种方面^[10-11]. 关于超级稻的研究主要集中在品种选育^[12]、产量和品质形成的生理生态机制及高产栽培技术等方面^[13-14], 而有关其 CH₄ 排放方面的研究较少. 至今, 人们对超级稻的 CH₄ 排放特征及其与植株生长特性关系的认识尚不很清楚. 长江三角洲是我国的高产稻作区^[15], 超级稻发展迅速. 为此, 本研究收集了该区域广泛种植的主要超级稻品种, 监测不同类型超级稻品种的稻田 CH₄ 排放特征, 并探讨了 CH₄ 排放与植株生长特性的关系, 以期对长江三角洲及类似区域的高产低碳稻作创新提供理论和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为近几年经过省或国家审定的长江三角洲主要超级稻品种 14 个, 包括 6 个粳型超级

稻(宁粳 3 号、扬粳 4038、新稻 18、淮稻 9 号、宁粳 1 号和武运粳 24), 8 个籼型杂交超级稻(Ⅱ优 084、新两优 6 号、扬两优 6 号、丰两优香一号、徽两优 6 号、中浙优 1 号、内 2 优 6 号和新两优 6380). 所用种子分别购自于相应的种子或来源于品种育成单位.

1.2 试验设计

在 2011 年完成预备试验, 掌握各品种的基本特性之后, 于 2012 年在南京农业大学南京牌楼试验基地进行盆栽试验. 盆高 22 cm, 底部直径 19 cm. 所用土壤取自南京市南京农业大学江浦实验农场稻田土壤, 土壤 pH 值为 6.75, 碱解氮为 96.8 mg · kg⁻¹, 全氮为 2.1 g · kg⁻¹, 有机质为 30.7 g · kg⁻¹. 土壤晒干后粉碎过筛(孔径为 3 mm), 每盆装土 7 kg, 并于 6 月 18 日加水浸泡. 稻种于 5 月 27 日播种育秧, 6 月 25 日移栽. 每盆 3 穴, 每穴 1 苗, 每个品种种植 15 盆. 6 月 23 日每盆施复合肥(N : P₂O₅ : K = 12 : 6 : 7) 3.5 g 作基肥, 7 月 4 日每盆施尿素 1 g 作分蘖肥. 全生育期保持浅水灌溉, 并按照实际情况及时防治病虫害, 确保植株生长良好.

1.3 测定指标与方法

1.3.1 植株特性观测 在分蘖盛期、抽穗期、成熟期每个品种取 3 盆, 分别观测分蘖数, 测定株高、叶面积、地上部生物量、根系生物量和籽粒质量等指标. 其中根系取样方法为: 取出整盆水稻根系, 用自来水小心清洗掉土壤和杂质, 尽量获得完整根系.

1.3.2 温室气体观测 采用密闭静态箱法采集温室气体^[16]. 采样箱为圆柱体, 由 PVC 材料制成. 箱底直径 30 cm, 高度随植株高度而增加. 测定时, 把水注入箱体底槽, 实现密封. 水稻移栽后第 12 天开始采样, 每个品种监测 3 盆. 每隔 7 d 采样 1 次, 采样时间固定在 9:00—11:00. 抽气时间分别为罩箱后的 0.5、10、15 min, 每次抽取 50 mL 气体样品. 气体样品用 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 个气体样品浓度值经线性回归分析得出. CH₄ 排放通量计算方法见文献^[11], 并以内插积分求和法计算全生育期 CH₄ 排放总量.

1.4 数据处理

试验结果均以 3 次重复的平均值表示, 采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理和绘图, 采用 SPSS 11.5 统计软件中的单因素方差分析, 使

用 Pearson 相关系数评价其相关性. 图 2、图 3 和图 4 所用数据均为相对值. 相对值计算方法: 相对值 = 单个品种某个指标的观测值/该类型所有品种该指标观测值的平均值.

2 结果与分析

2.1 稻田 CH₄ 排放通量的动态特征

粳型超级稻和籼型杂交超级稻的 CH₄ 排放通量曲线均呈现双峰趋势, 峰值分别出现在分蘖盛期和孕穗期, 季节变化特征相似(图 1). 在分蘖期, 随着水稻生长发育进程, CH₄ 排放通量呈递增趋势. 粳型超级稻和籼型杂交超级稻分别在 7 月 29 日和 7 月 22 日出现第 1 个 CH₄ 排放高峰, 两类品种的平均峰值分别为 10.1 和 10.3 mg · m⁻² · h⁻¹, 品种类型间差异不显著. 分蘖末期后, CH₄ 排放通量出现一个先下降后上升的过程, 粳稻和籼稻分别在 8 月 19 日和 8 月 26 日出现第 2 个排放高峰, 平均排放通量分别为 11.9 和 5.9 mg · m⁻² · h⁻¹, 粳稻的峰值为籼稻的 2.0 倍. 第 2 个峰值过后, 两类品种的 CH₄ 排放通量呈现稳定下降趋势.

2.2 不同生育期 CH₄ 排放总量及其比例

从表 1 可知, 两种类型超级稻品种的 CH₄ 排放量在不同生育期的比例呈现类似的变化趋势, 即苗期-分蘖期 CH₄ 排放量占排放总量的比例较大, 粳稻和籼稻分别为 49.7% 和 64.4%. 随后, 两类超级稻各生育期的 CH₄ 排放量占总排放量的比例显著下降. 粳型和籼型超级稻的 CH₄ 排放总量分别为 10.9 和 6.8 g · m⁻², 前者比后者高 37.6% ($P < 0.01$). 两类超级稻 CH₄ 排放总量上的差异主要出现在分蘖期-抽穗期及抽穗期-成熟期. 分蘖期-抽穗期粳型超级稻 CH₄ 排放量是籼型杂交超级稻的 1.9 倍, 抽穗期-成熟期该比值为 2.7 倍.

2.3 超级稻 CH₄ 排放与植株地上部生长特性的相关性

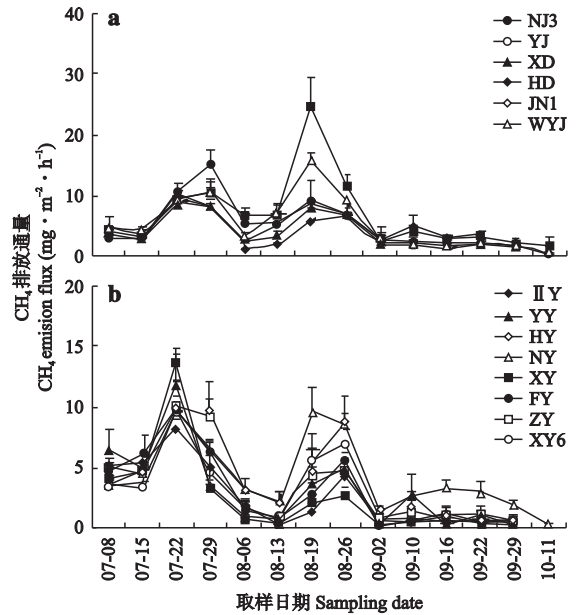


图 1 粳型超级稻(a)和籼型杂交超级稻(b)全生育期 CH₄ 排放通量

Fig. 1 CH₄ emission fluxes of *Japonica* super-rice (a) and *Indica* hybrid super-rice (b) during entire growth period.

NJ3: 宁梗 3 号 Ningjing 3; YJ: 扬梗 4038 Yangjing 4038; XD: 新稻 18 Xindao 18; HD: 淮稻 9 号 Huaidao 9; NJ1: 宁梗 1 号 Ningjing 1; WYJ: 武运梗 24 Wuyunjing 24; II Y: II 优 084 II you 084; XY: 新两优 6 号 Xinliangyou 6; YY: 杨两优 6 号 Yangliangyou 6; FY: 丰两优香一号 Fengliangyouxiang 1; HY: 徽两优 6 号 Huiliangyou 6; ZY: 中浙优 1 号 Zhongzheyou 1; NY: 内 2 优 6 号 Nei 2 you 6; XY6: 新两优 6380 Xinliangyou 6380.

两种类型超级稻的 CH₄ 排放总量均与最大叶面积呈显著正相关, 与最高分蘖数相关不显著, 粳稻的 CH₄ 排放总量与株高呈显著正相关, 籼稻的 CH₄ 排放总量与株高呈负相关, 但不显著(图 2、表 2). 从水稻生长特性看(表 2), 两种类型超级稻的平均最高分蘖数无显著差异, 籼型杂交超级稻的株高和最大叶面积的平均值均显著高于粳型超级稻. 籼稻的平均株高是粳稻的 1.3 倍, 平均最大叶面积比粳稻高 43% ($P < 0.01$).

2.4 超级稻 CH₄ 排放与根系生长的相关性

两种类型超级稻的 CH₄ 排放总量均与根冠比呈

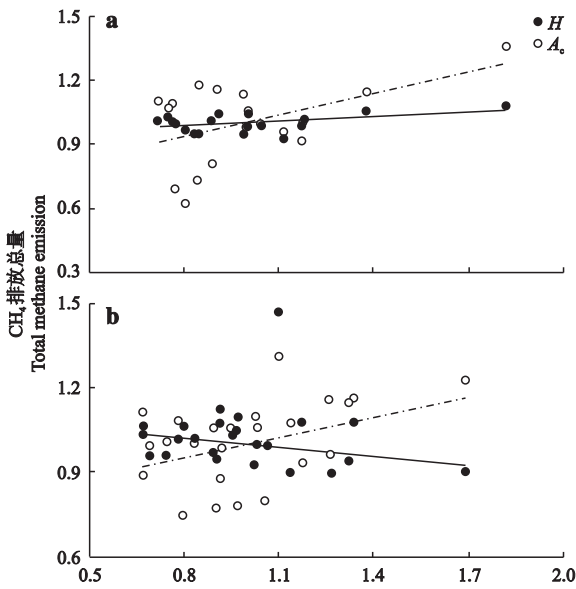
表 1 粳型超级稻和籼型杂交超级稻不同生育期 CH₄ 排放总量

Table 1 Total methane emissions and their contribution rates of *Japonica* super-rice and *Indica* hybrid super-rice at different growth stages

超级稻类型 Super rice type	排放总量 Total emission (g · m ⁻²)	苗期-分蘖期 Seeding-tillering stage		分蘖期-抽穗期 Tillering-heading stage		抽穗期-成熟期 Heading-maturity stage	
		排放量 Emission (g · m ⁻²)	贡献率 Contribution rate (%)	排放量 Emission (g · m ⁻²)	贡献率 Contribution rate (%)	排放量 Emission (g · m ⁻²)	贡献率 Contribution rate (%)
粳稻 <i>Japonica</i> rice	10.9	5.4	49.7	2.5	23.1	3.0	27.2
籼稻 <i>Indica</i> rice	6.8	4.4	64.4	1.3	18.5	1.1	17.1

表 2 粳型超级稻和籼型杂交超级稻主要品种特性及其与 CH₄ 排放总量的相关性Table 2 Relationship between plant growth characteristics and total CH₄ emissions of *Japonica* super-rice and *Indica* hybrid super-rice

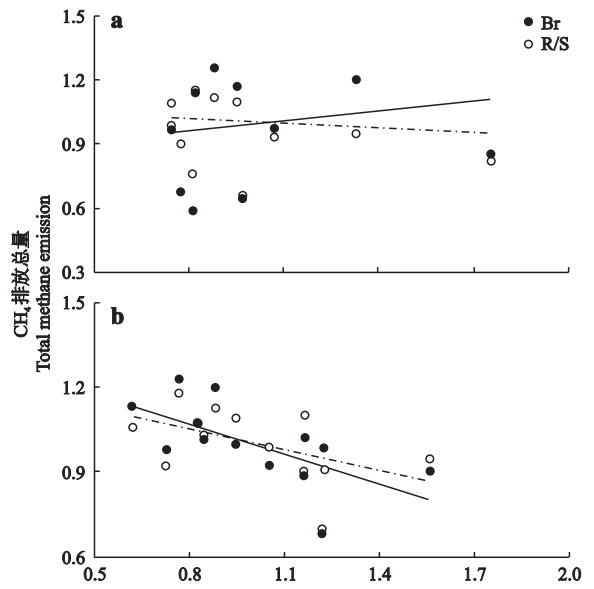
超级稻类型 Super rice type		株高 Plant height (cm)	最大叶面积 Maximum leaf area (cm ² · plant ⁻¹)	最高分蘖数 Maximum tiller No. (tillers · plant ⁻¹)	最大根生物量 Maximum root biomass (g · plant ⁻¹)	根冠比 Root- shoot ratio	总生物量 Aboveground biomass (g · m ⁻²)	籽粒产量 Yield (g · m ⁻²)	收获指数 Harvest index
粳稻 <i>Japonica</i> rice	均值 Mean	81.7	733.6	10.2	5.3	0.33	1920.2	962.5	0.5
	<i>r</i>	0.466 *	0.492 *	0.046	0.158	-0.085	0.003	0.115	0.175
籼稻 <i>Indica</i> rice	均值 Mean	106.8	1287.2	11.0	9.1	0.35	2537.0	1158.1	0.5
	<i>r</i>	-0.392	0.444 *	0.045	-0.634 *	-0.494	-0.466 *	-0.684 **	-0.567 **

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.图 2 粳型超级稻(a)和籼型杂交超级稻(b) CH₄ 排放总量与水稻株高(H)及最大叶面积(A₁)的关系Fig. 2 Relationships between total CH₄ emission and plant height (H) and maximum leaf area (A₁) of *Japonica* super-rice (a) and *Indica* hybrid super-rice (b).

负相关,但不显著,与最大根生物量的相关性不一致.其中,籼稻的 CH₄ 排放总量与最大根生物量呈显著负相关,粳稻的 CH₄ 排放总量与最大根生物量呈正相关,但不显著(图 3、表 2).从水稻生长特性看(表 2),两种类型超级稻的平均根冠比无显著差异,但籼型杂交超级稻的平均最大根生物量显著高于粳型超级稻,是粳稻的 1.7 倍($P < 0.01$).

2.5 超级稻 CH₄ 排放与干物质生产的相关性

由图 4 可知,两种类型超级稻品种的 CH₄ 排放量与植株生产力之间的相关性不一致.粳型超级稻成熟期地上部生物量和籽粒产量均与 CH₄ 排放总量呈正相关,而籼型杂交超级稻成熟期地上部生物量和籽粒产量均与 CH₄ 排放总量呈负相关.籼稻的生产力显著高于粳稻,其中成熟期地上部生物量是粳

图 3 粳型超级稻(a)和籼型杂交超级稻(b) CH₄ 排放总量与根系生长特性的关系Fig. 3 Relationships between total CH₄ emission and root growth characteristics of *Japonica* super-rice (a) and *Indica* hybrid super-rice (b).

Br: 根生物量 Root biomass; R/S: 根冠比 Root-shoot ratio.

稻的 1.3 倍($P < 0.01$),籽粒产量比粳稻高 17% ($P < 0.05$)(表 2).综合表 1、表 2 可知,粳稻和籼稻单位产量 CH₄ 排放量分别为 11.4 和 6.2 g CH₄ · kg⁻¹,两者差异达到极显著水平.粳型超级稻 CH₄ 排放总量与收获指数相关不明显,籼型杂交超级稻 CH₄ 排放总量与收获指数呈极显著负相关.

3 讨论

3.1 超级稻 CH₄ 排放特征

本研究发现,超级稻 CH₄ 排放通量季节变化呈双峰模式,这与常规稻的 CH₄ 排放特征基本类似^[17-18].不同水稻类型间 CH₄ 排放量存在显著差异(图 1).现有研究表明^[19-20],常规稻 CH₄ 排放量显著高于杂交稻品种,这与本研究结果基本一致.本研

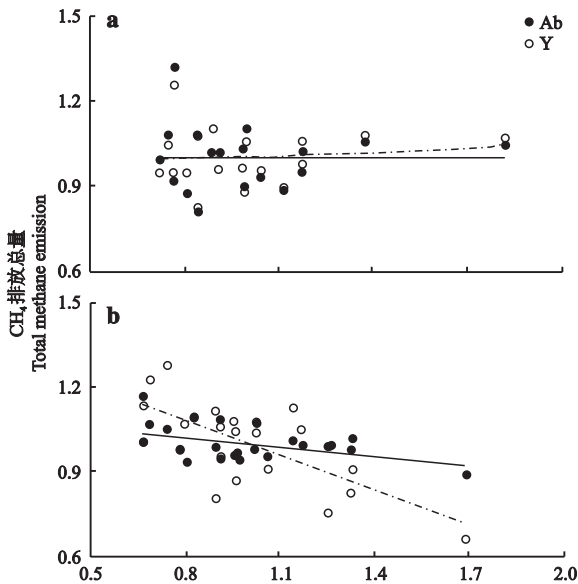


图4 粳型超级稻(a)和籼型杂交超级稻(b)CH₄排放总量与干物质生产的关系

Fig. 4 Relationships between total CH₄ emission and plant productivity of *Japonica* super-rice (a) and *Indica* hybrid super-rice (b).

Ab: 总生物量 Aboveground biomass; Y: 产量 Yield.

究发现,两种类型水稻品种CH₄排放差异主要出现在分蘖期至抽穗期以及抽穗期至成熟期.苗期至分蘖期两种类型水稻品种CH₄排放量无明显差异,水稻生长前期植株较小,根系及通气组织均不发达,CH₄排放量主要受土壤因素和环境因素的影响^[17-18].分蘖期至抽穗期粳型超级稻的CH₄排放量显著高于籼型杂交超级稻.粳型超级稻在抽穗期地上部生物量(数据未列出)和根系生物量(表2)都显著低于籼型杂交稻,而根系分泌物的数量与植物的根量($r=0.919$)和地上部生物量($r=0.954$)呈正相关^[21],因此籼型杂交超级稻的CH₄产生力可能显著高于粳型超级稻,但籼型杂交超级稻排放量低于粳型超级稻.说明两种类型水稻品种CH₄排放差异关键因子是CH₄氧化能力而不是CH₄产生能力.在水稻生长后期,气温较低,水稻生长衰退,根表皮层渗透性下降,通气组织堵塞,CH₄传输能力下降,期CH₄排放较小.但粳型超级稻从抽穗至成熟的时间较籼型杂交超级稻长(粳稻平均57 d,籼稻平均42 d).因此,抽穗期至成熟期粳型超级稻的CH₄排放量显著高于籼型杂交超级稻.

3.2 超级稻植株特性与CH₄排放量的关系

水稻植株是强烈影响稻田CH₄排放的重要植物载体,其生长发育影响CH₄的产生、氧化和传输^[22-23].Gogoi等^[24]研究报道,水稻植株的分蘖数、

株高、叶面积均与CH₄排放量呈显著正相关.但本研究却发现,超级稻的叶面积与CH₄排放呈显著正相关,分蘖数与CH₄排放量的相关性不明显,株高和根生物量与排放量的相关性因水稻类型而异.粳型超级稻株高与CH₄排放量呈显著正相关,根生物量与CH₄排放量呈正相关趋势,而籼型杂交超级稻的株高与CH₄排放量呈负相关趋势,根生物量与CH₄排放量呈显著负相关.主要原因可能是不同类型水稻品种对CH₄产生、氧化和传输的影响不同^[25-26].粳型超级稻株高和根系较小,对CH₄的产生和传输效应可能大于氧化效应,而籼型杂交超级稻株高和根系较大,对CH₄的氧化效应可能大于产生和传输效应.有关水稻植株特性对稻田CH₄产生与排放的影响机理还有待进一步研究.

目前关于水稻干物质生产对CH₄排放量的影响仍存在较大争议.有研究发现,稻田CH₄季节性排放总量随水稻生产力水平的提高而增加^[9,27].物质生产力大的水稻品种能分配更多的光合产物到根系,通过根系分泌物、根系脱落物等为产CH₄菌提供更多的基质,促进了CH₄的产生.而另有研究表明,稻田CH₄排放与水稻的生物量呈负相关,生物量大的水稻品种通过发达的根系分泌更多的O₂到根际,促进CH₄的氧化,减少CH₄排放^[10,20].本研究结果表明,粳型超级稻CH₄排放量与物质生产力呈正相关,但不显著;而籼型杂交超级稻CH₄排放量与物质生产力呈显著负相关.CH₄排放与水稻根系以及干物质生产力的关系因品种类型而异,但两种类型的超级稻品种CH₄排放与根冠比均呈正相关(表2).Das等^[28]研究认为,稻田CH₄排放与水稻的光合产物分配有关,光合产物分配到根系多的水稻品种CH₄排放量大.主要是因为分配到根系的光合产物有一部分以根际沉积的形式转移到土壤^[29],进而促进了CH₄的产生.

4 结 论

粳型超级稻和籼型杂交超级稻排放动态都呈现双峰模式,但粳型超级稻CH₄排放总量显著高于籼型杂交超级稻,尤其是在水稻生长发育中后期.可能原因是籼型杂交超级稻的根系生物量显著高于粳型超级稻.超级稻的植株生长特性与CH₄排放存在一定的相关性,且因品种类型而异.两种类型超级稻的最大叶面积均与CH₄排放总量呈显著正相关,但最高分蘖数与CH₄排放总量相关不明显.粳型超级稻的株高与CH₄排放总量呈显著正相关,而籼型杂交

超级稻的株高与 CH₄ 排放总量呈负相关。粳型超级稻成熟期地上部生物量、产量和收获指数与 CH₄ 排放总量相关不明显, 但籼型杂交超级稻 CH₄ 排放总量与成熟期地上部生物量、产量和收获指数呈显著负相关。上述结果表明, 在高产低碳的超级稻品种筛选上, 籼型杂交超级稻品种可能更具潜力。

参考文献

- [1] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, *et al.* Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing// Solomon S, Qin D, Manning M, eds. *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: Cambridge University Press, 2007: 129–234
- [2] IPCC. *Climate Change 2007: Couplings between Changes in the Climate System and Biogeochemistry* [EB/OL]. (2007-11-17) [2012-12-15]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter7.pdf>
- [3] Peng SB, Tang QY, Zou YB. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Production Science*, 2009, **12**: 3–8
- [4] Zhang G-B (张广斌), Ma J (马静), Xu H (徐华), *et al.* Literature review on estimation of methane emission from paddy fields in China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2009, **46**(5): 33–42 (in Chinese)
- [5] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (中华人民共和国农业部). Deploy of Ministry of Agriculture the National Super Rice Research and Extension Work in 2012 [EB/OL]. (2012-05-19) [2012-12-15]. http://www.moa.gov.cn/ztlz/cjn/gzbs/201206/t20120604_2724875.htm
- [6] Wang X (王熹), Tao L-X (陶龙兴), Yu M-Y (俞美玉), *et al.* Physiological model of super hybrid rice Xieyou 9308. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2002, **16**(1): 38–44 (in Chinese)
- [7] Xu M (许明), Jia D-T (贾德涛), Ma D-R (马殿荣), *et al.* Correlation of root physiology and leaf photosynthesis characteristics in Northern Chinese *Japonica* super rice. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2010, **36**(6): 1030–1036 (in Chinese)
- [8] Lindau CW, Bollich PK, DeLaune RD. Effect of rice variety on methane emission from *Louisiana* rice. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1995, **54**: 109–114
- [9] Huang Y (黄耀), Sass RL, Fisher FM, *et al.* Contribution of rice biomass production to CH₄ emission from irrigated paddy soils. *Agro-Environmental Protection* (农业环境保护), 1999, **18**(4): 150–154 (in Chinese)
- [10] Fu Z-Q (傅志强), Huang H (黄璜), Zhu H-W (朱华武), *et al.* Relativity between CH₄ and N₂O emission and rice plant characteristics. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)* (湖南农业大学学报·自然科学版), 2011, **37**(4): 356–360 (in Chinese)
- [11] Fu Z-Q (傅志强), Zhu H-W (朱华武), Chen C (陈灿), *et al.* Research on the correlation between the greenhouse gases emission from paddy field and the biological characteristics of rice root system. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2012, **30**(12): 2416–2421 (in Chinese)
- [12] Chen W-F (陈温福), Xu Z-J (徐正进), Zhang W-Z (张文忠), *et al.* Advances and prospects in research of rice breeding for super high yield in China. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 2007, **38**(5): 662–666 (in Chinese)
- [13] Wu W-G (吴文革), Zhang H-C (张洪程), Wu G-C (吴桂成), *et al.* Preliminary study on super rice population sink characters. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(2): 250–257 (in Chinese)
- [14] Zou Y-B (邹应斌), Ao H-J (敖和军), Wang S-H (王淑红), *et al.* Studies on San-Ding cultivation method for super rice. I. The concept and the principle. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2006, **22**(5): 158–162 (in Chinese)
- [15] Zhao Y-W (赵言文), Shi Y-C (施毅超), Hu Z-Y (胡正义), *et al.* Cultivated land protection based on national food security in Yangtze River Delta. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2007, **16**(4): 461–465 (in Chinese)
- [16] Wang W-Q (王维奇), Lei B (雷波), Li P-F (李鹏飞), *et al.* Application of static chamber method on methane emission and strategy of methane reduction in paddy field. *Experimental Technology and Management* (实验技术与管理), 2011, **28**(7): 53–56, 78 (in Chinese)
- [17] Tyagi L, Kumari B, Singh SN. Water management: A tool for methane mitigation from irrigated paddy fields. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**: 1085–1090
- [18] Das K, Baruah KK. A comparison of growth and photosynthetic characteristics of two improved rice cultivars on methane emission from rainfed agroecosystem of north-east India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, **124**: 105–113
- [19] Fu Z-Q (傅志强), Huang H (黄璜), He B-L (何保良), *et al.* Correlation between rice plant aerenchyma system and methane emission from paddy field. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(9): 1458–1467 (in Chinese)
- [20] Fu Z-Q (傅志强), Huang H (黄璜), Xie W (谢伟), *et al.* Effects of high-yielding rice cultivars and cultivation pattern on methane emission from paddy

- field. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(12): 3003–3008 (in Chinese)
- [21] Wassmann R, Aulakh MS. The role of rice plants in regulating mechanisms of methane emissions. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **31**: 20–29
- [22] Yan L-N (阎丽娜), Li X (李霞). Effects of rice on methane emission from paddy fields. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2008, **24**(10): 471–476
- [23] Zhang X-Y (张晓艳), Ma J (马静), Li X-P (李小平), *et al.* Reviews on methane transport in rice paddy field. *Soils* (土壤), 2012, **44**(2): 181–187 (in Chinese)
- [24] Gogoi N, Baruah KK, Gogoi B. *et al.* Methane emission characteristics and its relations with plant and soil parameters under irrigated rice ecosystem of northeast India. *Chemosphere*, 2005, **59**: 1677–1684
- [25] Ding W-X (丁维新), Cai Z-C (蔡祖聪). Effect of plants on methane production, oxidation and emission. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(8): 1379–1384 (in Chinese)
- [26] Jia Z-J (贾仲君), Cai Z-C (蔡祖聪). Effects of rice plants on methane emission from paddy fields. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(11): 2049–2053 (in Chinese)
- [27] Ren L-X (任丽新), Wang G-C (王庚辰), Zhang R-J (张仁健), *et al.* Methane emissions from rice fields in the Chengdu Plain of China. *Chinese Journal of Atmosphere Sciences* (大气科学), 2002, **26**(6): 731–743 (in Chinese)
- [28] Das K, Baruah KK. Association between contrasting methane emissions of two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars from the irrigated agroecosystem of northeast India and their growth and photosynthetic characteristics. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2008, **30**: 569–578
- [29] Lu Y, Watanabe A, Kimura M. Input and distribution of photosynthesized carbon in a flooded rice soil. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**: 321–328

作者简介 闫晓君,女,1987年生,硕士.主要从事稻田温室气体研究. E-mail: yanxiaojun73@163.com

责任编辑 张凤丽
