

黄农荣, 梁开明, 钟旭华, 等. 南方低甲烷排放的高产水稻品种筛选与评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2854–2863.

HUANG Nong-rong, LIANG Kai-ming, ZHONG Xu-hua, et al. Screening for and evaluation of rice (*Oryza sativa*) varieties with low methane emission and high yield in South China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2854–2863.

南方低甲烷排放的高产水稻品种筛选与评价

黄农荣, 梁开明, 钟旭华, 潘俊峰, 刘彦卓, 彭碧琳, 傅友强, 胡香玉, 田 卡, 孔清霓

(广东省农业科学院水稻研究所, 广东省水稻育种新技术重点实验室, 广州 510640)

摘要:为综合评价高产和低甲烷(CH_4)排放兼具的水稻品种,应对我国粮食安全和环境保护问题,于2013年晚季和2014年早季,以南方稻区50个代表品种为供试材料,在盆栽条件下采用静态箱-气相色谱法测定品种的 CH_4 排放通量,并对生育期的 CH_4 排放量、稻谷产量及植株农艺性状进行了综合评价。结果表明,早、晚季供试品种间的 CH_4 排放量和产量均存在显著差异。早季全生育期的 CH_4 排放量在 $7.37\sim 21.10\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,晚季分蘖期至幼穗分化期的 CH_4 排放量在 $1.37\sim 13.97\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间;早季产量在 $0.40\sim 0.65\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,晚季在 $0.59\sim 0.87\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。根据系统聚类法的分析结果,将供试品种划分成具有不同 CH_4 排放量和产量水平的类型,从中筛选出了适合推广应用的 CH_4 低排高产、中排高产和低排中产品种,如黄华占、五优308、丰华占、特三矮、茉莉占选、广超丝苗、珍桂矮、广恢998和七桂早25等。其中,恢复系广恢998组配品种、黄华占和五优308已在我国南方稻区大面积推广应用。相关分析结果表明,株高、叶面积指数与 CH_4 排放通量呈显著正相关,这2个性状可作为高产低 CH_4 排放水稻新品种选育的辅助筛选指标。此外,稻谷产量与 CH_4 排放量无显著相关。研究结果为培育高产与低 CH_4 排放兼具的新品种提供了亲本材料和理论依据。

关键词:水稻品种;低 CH_4 排放;高产;植株性状;评价指标

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)12-2854-10 doi:10.11654/jaes.2018-0125

Screening for and evaluation of rice (*Oryza sativa*) varieties with low methane emission and high yield in South China

HUANG Nong-rong, LIANG Kai-ming, ZHONG Xu-hua, PAN Jun-feng, LIU Yan-zhuo, PENG Bi-lin, FU You-qiang, HU Xiang-yu, TIAN Ka, KONG Qing-ni

(Rice Research Institute of Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangdong Key Laboratory of New Technology for Rice Breeding, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Adopting rice varieties with high yield and low methane (CH_4) emission is important for food security and environmental protection in China. However, the evaluation of such rice varieties with both high yield and low CH_4 emission has rarely been documented. In the late season of 2013 and early season of 2014, pot experiments were carried out to evaluate the CH_4 emission, grain yield, and agronomic traits of 50 rice varieties widely grown in South China. The CH_4 fluxes of the rice varieties were determined via the static chamber/gas chromatograph technique. CH_4 emission and grain yield displayed significant differences among the varieties. The amount of CH_4 emission ranged between 7.37 and $21.10\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ throughout the growing period for the early-season rice and between 1.37 and $13.97\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ during the period from tillering to panicle differentiation for the late-season rice. The grain yield ranged between 0.40 and $0.65\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ for the early-

收稿日期:2018-01-22 录用日期:2018-04-27

作者简介:黄农荣(1965—),女,广西巴马人,硕士,研究员,主要从事水稻高产高效资源评价与应用研究。E-mail:13533385913@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300108-5);广东省发改委低碳发展专项资金项目(2012-016);广东省应用型科技研发专项资金项目(2015B020231002-7)

Project supported: National Key Research and Development Program(2016YFD0300108-5); Special Fund for Low Carbon Development Project of Guangdong Provincial Development and Reform Commission(2012-016); Special-funds Project for Applied Science and Technology of Guangdong Province(2015B020231002-7)

season rice and between 0.59 and 0.87 kg·m⁻² for the late-season rice. According to cluster analysis, the tested rice varieties were divided into different groups based on grain yield and CH₄ emission. Among the 50 varieties, Huanghuazhan, Wuyou308, Fenghuazhan, Tesanai, Molizhanxuan, Guangchaosimiao, Zhengui, Guanghui998, and Qiguizao25 were classified into the groups of high yield with low emission, high yield with moderate emission, or moderate yield with low emission. Furthermore, Huanghuazhan and Wuyou308 are the mega varieties in South China, whereas Guanghui998 is the restorer line for many hybrid rice varieties widely grown in South China. Correlation analysis indicated that the plant height and leaf area index were correlated significantly and positively with CH₄ emission. Thus, these two traits would be the important indices for screening varieties with high yield and low CH₄ emission in rice breeding. Furthermore, there was an insignificant correlation between grain yield and CH₄ emission, suggesting that it is possible to breed new varieties with both high yield and low CH₄ emission.

Keywords: rice variety; low methane emission; high yield; plant traits; evaluation index

随着社会经济发展和人口增长,我国在人口、资源、环境间的矛盾日益尖锐^[1-3]。粮食安全和保护环境成为目前面临的两大难题。人口增加和耕地减少,必须提高粮食单产;而粮食产量的提高还需兼顾环境的保护。水稻是我国最重要的粮食作物,中国水稻种植面积2800多万hm²,约占全球的18.7%,居世界第二位,产量居世界第一^[4],现代水稻育种技术的进步、高产超高产品种的推广应用为保障我国粮食安全做出了巨大贡献。但是,稻田又是温室气体甲烷(CH₄)的重要排放源。据统计,我国稻田每年排放的CH₄达840万t,占中国排放总量的17.9%,占全球稻田CH₄排放量的27.4%,单位面积的CH₄排放量为338 kg·hm⁻²,略低于美国的350 kg·hm⁻²^[5-6]。因此,推广应用高产和低CH₄排放兼备的水稻品种是我国当前粮食生产的主要途径之一。

自二十世纪八十年代以来,科学家就发现水稻品种在稻田温室气体CH₄排放过程中的作用,稻田中90%以上的CH₄通过水稻植株排放到大气中^[7],随后的研究进一步证明了水稻在CH₄排放中的作用^[8-17],但品种间的CH₄排放量有差异。Lindau等^[10]研究了6个水稻品种的CH₄排放特性,矮秆品种CH₄排放量约为高秆品种的64%。随后中国、印度、日本、美国和国际水稻研究所(IRRI)等科学家的研究亦表明品种间CH₄排放具有差异^[18-25]。以往研究表明,稻田CH₄排放量与水稻干重、株高、根体积、根系干重、分蘖数、收获指数以及产量等性状有关^[13,17,19,21,26-27],但不同研究者的结论不尽相同;另有研究认为^[28],地上部植株形态性状不能预测水稻品种对CH₄排放的影响,需从地下部性状开展相关研究。针对上述研究结果不一致的原因,笔者认为这与供试品种、种植方式及生态环境等因素有关。目前对水稻高产和低CH₄排放兼具品种类型的评价研究还鲜见报道。同时,现有稻田温室

气体排放检测技术对仪器设备要求高,检测方法繁琐复杂,难以广泛应用。因此,筛选高产与低CH₄排放兼具的水稻品种是解决当前水稻生产中这类品种短缺的主要技术途径;同时,找到与CH₄排放关系密切的植株指标是这类新品种选育的重要技术支撑。本研究从南方稻区众多推广应用品种中筛选出50个代表性品种作为供试材料,用于探讨CH₄排放特征及其与植株农艺性状间的关系,以期筛选出高产和低CH₄排放兼具的水稻品种和种质资源及其与CH₄排放密切相关的植株性状。一方面为水稻生产提供优良品种,另一方面为培育低CH₄排放优良新品种提供亲本材料和评价指标,对于稻田温室气体减排和粮食增产均具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料的选择标准:以稻谷产量和生育期为主要指标,于2012年晚季和2013年早季对1960年代以来在南方稻区大面积推广的120个品种进行大田筛选,将产量较高且生育期相近的品种入选为本研究2013年晚季试验的供试材料,以低CH₄排放品种IR72^[13,24]为对照(CK),共50份(详见表1)。2014年早季的供试材料为2013年晚季筛选出的CH₄排放分别为高、中、低类型的品种:IR72(CK)、广恢998、特粳占13、黄华占、五优308、黄莉占、丰美占和丰粤占。

1.2 试验设计

试验于2013年晚季(7月22日—11月15日)和2014年早季(3月9日—7月15日)在广东省农业科学院水稻研究所网室(广州市天河区,115.35°E,23.12°N)进行,试验期间气候无异常情况(<http://data.tqyb.com.cn/weather/qhngbfile.jsp>广州市气候年公报)。采用大田育秧,盆钵移植方式种植。早季于3月9日播

表1 2013年晚季供试水稻品种名称及编号

Table 1 The selected rice varieties and code in the experiment of late season in 2013

编号	品种名称	编号	品种名	编号	品种名	编号	品种名	编号	品种名
1	IR72(CK)	11	粤香占	21	梗粳89	31	胜优2号	41	丰香软占
2	广恢998	12	中二软占	22	黄莉占	32	特粳占25	42	粤晶丝苗2号
3	IR36	13	孖七占	23	丰粤占	33	澳梗占	43	五山丝苗
4	丰华占	14	黄华占	24	三农占	34	奇妙香	44	粤农丝苗
5	富粤占	15	丰美占	25	青二矮	35	银晶软占	45	齐华占
6	广超丝苗	16	特青	26	IR26	36	泰澳丝苗	46	粤油丝苗
7	茉莉占选	17	特三矮	27	低脚乌尖	37	金华软占	47	雪花新占
8	七桂早25	18	桂朝2号	28	珍桂矮	38	IR24	48	五广占
9	特粳占13	19	五优308	29	粤新占	39	美香占	49	天优3618
10	粤农占	20	丰八占	30	E32	40	青六矮	50	粤杂889

种,4月13日移栽。晚季于7月22日播种,8月8日移栽。随机区组排列,2013年晚季设置2次重复,2014年早季设置4次重复。盆钵的长、宽、高分别为43.5、31.5、16.5 cm。每盆移栽9穴,每穴插植2苗,株行距为14 cm×20 cm。盆钵中土壤为常规稻田土,每盆用土量为20 kg。土壤理化性质:pH 5.08、有机质25.35 g·kg⁻¹、全氮1.13 g·kg⁻¹、全磷1.01 g·kg⁻¹、全钾9.20 g·kg⁻¹、碱解氮171.64 mg·kg⁻¹、有效磷73.30 mg·kg⁻¹、速效钾61.02 mg·kg⁻¹。按水稻“三控”施肥技术规程^[29]进行栽培管理,施肥量按纯N 150 kg·hm⁻²、P₂O₅ 45 kg·hm⁻²、K₂O 120 kg·hm⁻²的标准施用,分别以尿素、过磷酸钙和氯化钾的形式投入,其中氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=4:2:3的比例施用。

1.3 调查指标与测定方法

1.3.1 CH₄气样采集与测定

采用静态暗箱-气相色谱法监测CH₄气体排放,按田卡等^[30]的方法进行。采样箱由PVC材料制成,箱底面积43.5 cm×31.5 cm,高为60 cm和120 cm两种,分别在前期和中后期采样时使用,箱外包裹海绵和锡箔纸。根据前人研究认为“晚季种植的水稻品种CH₄排放通量在前期较高,拔节期达到最大值^[25,31]”的结论,2013年晚季在分蘖期至幼穗分化期间进行气体采集,每间隔7 d取样1次;2014年早季从移栽后10 d开始采样、每隔7 d取样1次,直至成熟。每次气体采集时间为上午9:00—11:00,气体采集前一晚,将盆钵和回型框底座水槽灌满水,取样时,将取样箱垂直轻放在回型框底座上,底座水槽内的水深确保取样箱放入底座时能隔离箱内外气体交换。箱顶壁装1个12 V的小风扇,采样前将风扇打开,使箱内温度均匀。分别于罩箱后0、5、10、15 min采样,每次抽取70 mL

气体放入真空玻璃瓶中备测。同时记录盆钵水层深度和箱体内存气温。

采用经改装的气相色谱仪(Agilent 7890A,安捷伦科技有限公司,美国)测定CH₄浓度,CH₄检测器为火焰离子检测器(FID),温度200℃,色谱柱温度55℃,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。

1.3.2 植株性状调查与测定

1.3.2.1 生育期记录:按常规方法记录播种期、移栽期、分蘖期、拔节期、幼穗分化始期、抽穗期和成熟期。

1.3.2.2 植株性状调查:从移栽后7 d开始调查分蘖数、测量株高及功能叶片长度和宽度,以后每隔7 d调查一次,直至抽穗。按吉田昌一等^[32]的方法计算叶面积指数(LAI)。

1.3.2.3 产量及相关性状测定:成熟期每个重复取5穴稻株,分成穗部和茎叶2部分。其中,穗部性状测定有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重;茎叶部分,将根系剪除后合并。收获后全部材料先在网室风干,再置于烘箱75℃中烘至恒重。计算单位面积的稻谷产量、生物量和收获指数。

1.4 数据处理

稻田CH₄排放通量的计算公式如下:

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

式中:F为CH₄排放通量; ρ 为标准大气压下的CH₄密度; T 为采样过程中采样箱内的平均温度,℃; H 是采样箱的净高度,m; dc/dt 是采样箱内CH₄的浓度变化率。

各个生育期CH₄排放量计算公式:

$$T=\sum(R_i\times D_i)$$

式中: R_i 是相邻两次测定的排放量的均值, D_i 是两次

测定相距的时间, $d^{[33]}$ 。全生育期的 CH_4 排放总量为各个生育期排放量之和。

数据处理和统计分析采用 Excel 2007 和 SPSS 21 软件进行。聚类分析采用系统聚类法的欧氏距离-离差平方和法;多重比较采用新复极差法(LSR法)。

2 结果与分析

2.1 晚季水稻品种的 CH_4 排放特征及分类

2.1.1 不同品种 CH_4 排放通量的比较

供试品种各时期的 CH_4 排放通量和平均 CH_4 排放通量结果如表 2 所示。结果表明,供试品种的 CH_4 排放通量差异在分蘖期 ($F=2.75^{***}$, $P<0.001$) 和拔节期 ($F=2.41^{***}$, $P<0.001$) 均达极显著水平,而在幼穗分化期的差异则不显著 ($F=1.35$, $P=0.146$);品种间的平均 CH_4 排放通量差异亦达极显著水平 ($F=4.08^{***}$, $P<$

0.001)。

由表 2 可知, CH_4 平均排放通量排在前 3 位的品种依次为低脚乌尖、丰粤占和 IR26, 分别为 39.41 、 $38.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $37.95 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;排放通量排在最后 3 位的品种依次为黄华占、特粳占 13 和广恢 998, 分别为 4.32 、 $7.10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $7.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 均比低排放对照 IR72 的 $9.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 低, 但差异均未达显著水平。低脚乌尖与黄华占之间的平均 CH_4 排放通量相差 9.12 倍。

比较品种 CH_4 排放通量的最大值可知, 45 个供试品种 CH_4 排放通量的最大值出现在分蘖期(表 2), 占品种数的 90%; 其余 5 个品种的 CH_4 排放通量最大值在拔节期; 至幼穗分化期, 所有品种的 CH_4 排放通量均显著下降, 平均 CH_4 排放通量只有分蘖期和拔节期的 18.2% 和 27.0%。

表 2 水稻品种在分蘖期-幼穗分化期的 CH_4 排放通量比较(2013 年晚季)

Table 2 The CH_4 emission flux of different rice varieties from the stage of tillering to panicle initiation (late season of 2013)

品种名称	CH_4 排放通量/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$				品种名称	CH_4 排放通量/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$			
	分蘖期	拔节期	分化期	平均值 ^a		分蘖期	拔节期	分化期	平均值
低脚乌尖	52.76	48.12	17.35	39.41	茉莉占选	21.69	16.73	5.89	14.77
IR24	47.38	41.73	5.22	31.45	中二软占	29.10	26.66	6.22	20.66
IR26	57.82	38.37	17.65	37.95	丰华占	40.27	22.36	5.30	22.64
IR36	14.95	13.10	3.83	10.63	富粤占	22.74	12.66	3.03	12.81
桂朝 2 号	34.53	29.12	6.42	23.36	粤杂 889	55.55	15.29	1.80	24.21
青二矮	53.34	32.91	10.23	32.16	丰美占	58.44	36.51	8.79	34.58
七桂早 25	21.79	14.92	4.69	13.80	黄华占	7.43	3.29	2.25	4.32
孖七占	39.50	32.44	5.19	25.71	三农占	54.80	34.64	11.14	33.53
IR72(CK)	12.23	12.52	4.19	9.65	金华软占	43.18	33.51	7.71	28.13
特青 2 号	48.24	23.52	8.58	26.78	美香占 2 号	44.31	15.58	4.35	21.41
青六矮	33.81	19.23	3.19	18.74	泰澳丝苗	48.28	31.71	11.86	30.62
珍桂矮	29.80	13.36	8.44	17.20	五优 308	42.29	20.36	4.55	22.40
粳粳 89	29.30	16.91	4.72	16.97	银晶软占	41.17	16.18	3.91	20.42
特三矮 2 号	31.04	20.89	4.33	18.76	粤晶丝苗 2 号	50.39	28.72	5.45	28.19
胜优 2 号	49.34	42.94	8.01	33.43	广超丝苗	25.14	16.22	4.86	15.41
广恢 998	10.93	8.22	2.23	7.13	丰粤占	62.78	45.14	6.21	38.04
奇妙香	32.11	43.80	14.83	30.25	黄莉占	57.32	24.30	7.15	29.59
澳梗占	34.92	19.15	4.42	19.49	天优 3618	47.84	20.64	2.43	23.64
E32	28.75	28.45	6.95	21.38	五山丝苗	47.72	32.55	13.17	31.14
特粳占 13	9.00	6.03	6.27	7.10	齐华占	32.90	40.73	7.40	27.01
特粳占 25	30.09	19.55	4.64	18.09	五广占	39.51	37.63	7.38	28.17
粤香占	33.22	34.48	4.70	24.13	粤农丝苗	31.75	16.61	4.87	17.74
粤农占	34.97	27.01	10.27	24.08	丰香软占	47.23	31.61	12.58	30.47
粤新占	10.83	14.04	6.28	10.38	雪花新占	23.56	21.36	2.02	15.65
丰八占	50.76	31.08	9.66	30.50	粤油丝苗	42.70	19.28	4.79	22.25

注: a 平均值指分蘖期至幼穗分化期的平均 CH_4 排放通量。

2.1.2 水稻品种CH₄排放量及其分类

方差分析结果表明,50个供试品种在分蘖期至幼穗分化期的CH₄排放量差异达到极显著水平($F=3.93^{***}$, $P<0.001$),说明品种间的CH₄排放特性具有多样性。采用系统聚类法的欧氏距离-离差平方和法(Euclidean)进行聚类分析,可将供试品种划分为高CH₄排放、中等CH₄排放和低CH₄排放3种类型,结果如图1(a)所示。(1)高CH₄排放品种18个,分别是低脚乌尖、丰粤占、IR26、胜优2号、丰美占、IR24、三农占、奇妙香、青二矮、五山丝苗、泰澳丝苗、丰香软占、丰八占、五广占、齐华占、金华软占、粤晶丝苗2号和黄莉占,CH₄排放量在9.50~13.97 g·m⁻²之间,均值为11.11±1.28 g·m⁻²。(2)中等CH₄排放品种24个,分别是仔七占、粤香占、特青2号、粤农占、桂朝2号、E32、天优3618、丰华占、中二软占、粤杂889、五优308、粤油丝苗、美香占2号、澳梗占、银晶软占、特三矮2号、青六矮、特粳占25、粤农丝苗、雪花新占、粳粳89、珍珠矮、广超丝苗和茉莉占选,CH₄排放量在5.13~9.21 g·m⁻²之间,均值为7.00±1.19 g·m⁻²。(3)低CH₄排放品种8个,分别为黄华占、特粳占13、广恢998、IR72(CK)、IR36、粤新占2号、富粤占、七桂早25,CH₄排放量在1.37~4.73 g·m⁻²之间,均值为3.28±1.13 g·m⁻²。

2.2 水稻品种的稻谷产量表现及其分类

对供试品种的稻谷产量(IR26因后期冷害致失收,不参与分析)进行的方差分析结果表明,品种间的产量差异达到极显著水平($F=3.39$, $P<0.001$)。根据稻谷产量具有差异显著特性,采用系统聚类法的欧氏距离-离差平方和法进行聚类,将产量性状划分为高产、中产和低产品种3种类型,结果如图1(b)所示。(1)高产品种12个,分别是珍珠矮、五优308、丰华占、黄莉占、泰澳丝苗、黄华占、广超丝苗、茉莉占选、三农占、五山丝苗、粤新占和特三矮,产量在0.75~0.87 kg·m⁻²之间,均值为0.79±0.03 kg·m⁻²。(2)中产品种27个,富粤占、低脚乌尖、特青、粤杂889、E32、天优3618、广恢998、五广占、粤晶丝苗2号、齐华占、金华软占、IR72、IR36、丰美占、粤农丝苗、七桂早25、粤油丝苗、胜优2号、粳粳89、粤农占、雪花新占、美香占、中二软占、银晶软占、特粳占13、澳梗占和丰香软占,产量在0.66~0.74 kg·m⁻²之间,均值为0.69±0.02 kg·m⁻²。(3)低产品种10个,分别是青二矮、桂朝2号、丰粤占、仔七占、青六矮、特粳占25、粤香占、奇妙香、IR24和丰八占,产量在0.59~0.65 kg·m⁻²之间,均值为0.63±0.02 kg·m⁻²。

2.3 以CH₄排放量和稻谷产量为特征的品种类型划分

根据CH₄排放量和稻谷产量的系统聚类结果,供试品种组成8种具有不同CH₄排放量和产量特性的类型,结果如表3所示,分别是:低排中产型6个品种(含CK);低排高产型2个品种;中排低产型5个品种;中排中产型13个品种;中排高产型6个品种;高排低产型5个品种;高排中产型8个品种;高排高产型4个品种。针对当前我国水稻生产既要保障粮食安全、又要保护生态环境的目标,本季筛选出适合目标的品种类型为:(1)低排高产型:黄华占、粤新占;(2)中排高产型:五优308、丰华占、特三矮、茉莉占选、广超丝苗、珍珠矮;(3)低排中产型:特粳占13、广恢998、IR72、IR36、富粤占、七桂早25。

2.4 早季不同品种的CH₄排放特性及产量表现

为检验2013年晚季试验结果,2014年早季,从中筛选出8个品种为供试材料,分别是:低CH₄排放品种黄华占(高产)、广恢998(中产)、特粳占13(中产),中等CH₄排放高产品种五优308、高CH₄排放高产品种黄莉占,高CH₄排放中产品种丰美占和高CH₄排放低产品种丰粤占,对照品种为IR72(低CH₄排放中产)。对CH₄排放进行全生育期监测,研究品种在前期(移栽-拔节幼穗分化始期)、中期(拔节幼穗分化始期-抽穗期)和后期(抽穗期-成熟期)等3个生长发育时期CH₄的排放特性。

结果表明,供试品种在不同生长发育期的CH₄排放量存在差异(表3)。其中,供试品种在生长发育前期的CH₄排放量差异不显著($F=2.02$, $P=0.101$),而在中期($F=10.54$, $P<0.0001$)和后期($F=13.66$, $P<0.0001$)的差异均达极显著水平。前期的CH₄排放量在0.63~1.02 g·m⁻²之间,占排放总量的3.80%~12.55%;中期为0.97~2.58 g·m⁻²,占总量的8.53%~15.64%;后期为5.77~17.92 g·m⁻²,占总量的72.44%~87.67%。供试品种在后期的CH₄排放量占总量的70%以上,是早季CH₄排放的主要时期。

结果还表明(表4),供试品种CH₄排放总量的差异达极显著水平($F=15.00$, $P<0.0001$)。系统聚类分析结果表明,供试品种的CH₄排放量可分成3类,高排放型:丰美占和丰粤占;中排放型:五优308、黄莉占、特粳占13和IR72;低排放型:黄华占和广恢998。高排放型品种的平均CH₄排放量分别是中、低排放型的1.81倍和2.70倍;中排放型品种的平均CH₄排放量是低排放型的1.49倍。

稻谷产量的方差分析结果表明,8个供试品种的

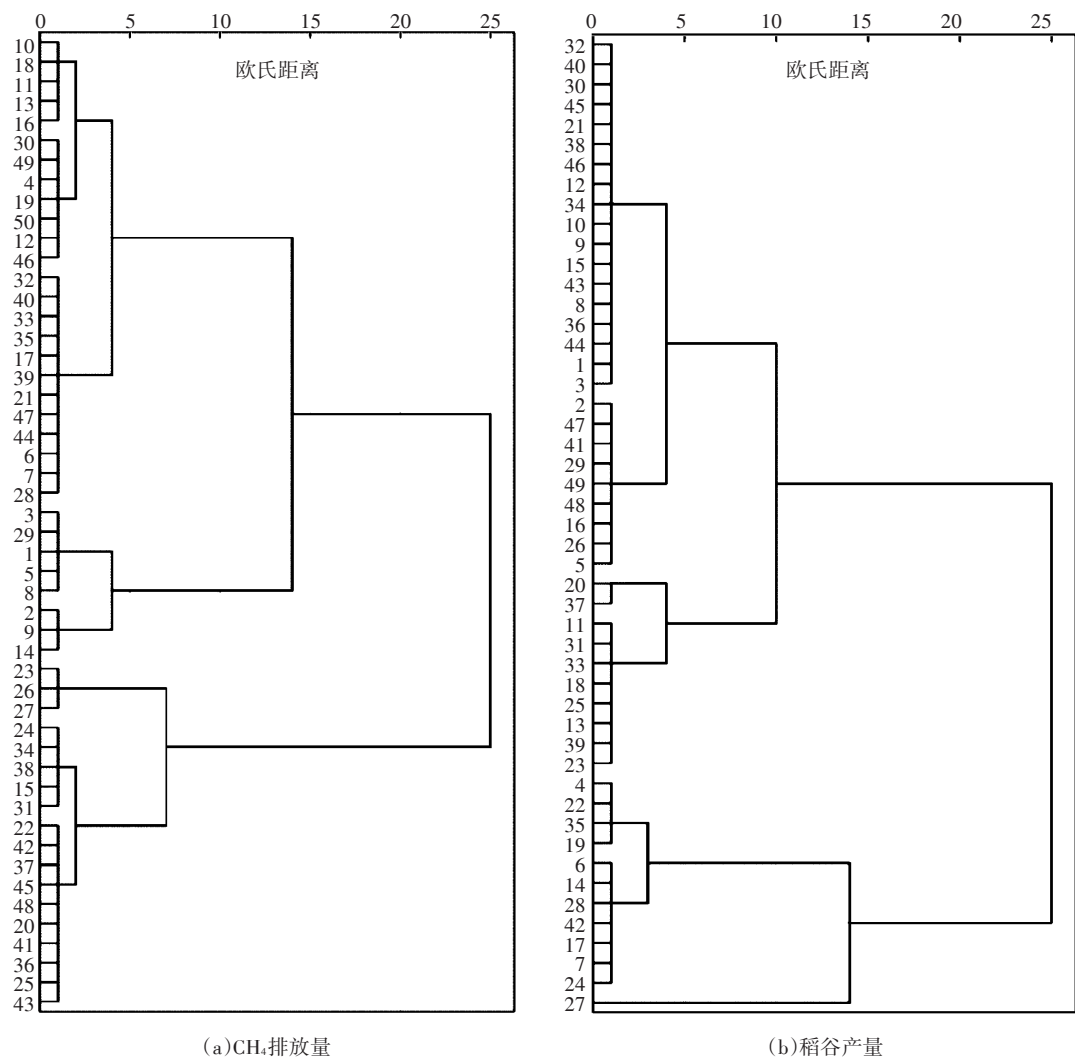


图 1 供试品种的甲烷排放量与稻谷产量的聚类分析(2013 年晚季)

Figure 1 Cluster analysis of methane emission and grain yield for selected varieties (late season of 2013)

表 3 以 CH₄排放量与稻谷产量为特征品种类型划分(2013 年晚季)

Table 3 The classification of different rice varieties according to the level of CH₄ emission and yield(late season of 2013)

品种名	类型	品种名	类型	品种名	类型	品种名	类型
特籼占 13	低排中产	粳籼 89	中排中产	茉莉占选	中排高产	齐华占	高排中产
广恢 998	低排中产	雪花新占	中排中产	广超丝苗	中排高产	五广占	高排中产
IR72(CK)	低排中产	粤农丝苗	中排中产	珍桂矮	中排高产	丰香软占	高排中产
IR36	低排中产	银晶软占	中排中产	特三矮	中排高产	丰美占	高排中产
富粤占	低排中产	澳粳占	中排中产	五优 308	中排高产	胜优 2 号	高排中产
七桂早	低排中产	美香占	中排中产	丰华占	中排高产	低脚乌尖	高排中产
黄华占	低排高产	粤油丝苗	中排中产	丰八占	高排低产	黄莉占	高排高产
粤新占	低排高产	粤杂 889	中排中产	青二矮	高排低产	泰澳丝苗	高排高产
特籼占 25	中排低产	中二软占	中排中产	奇妙香	高排低产	五山丝苗	高排高产
青六矮	中排低产	天优 3618	中排中产	IR24	高排低产	三农占	高排高产
桂朝 2 号	中排低产	E32	中排中产	丰粤占	高排低产		
粤香占	中排低产	粤农占	中排中产	粤晶丝苗 2 号	高排中产		
孖仔七占	中排低产	特青	中排中产	金华软占	高排中产		

产量差异达到极显著水平($F=11.25, P<0.001$), 系统聚类分析结果表明, 供试品种的稻谷产量可分成3类, 高产型: 五优308; 中产型: 黄华占、广恢998、黄莉占、丰美占和丰粤占; 低产型: IR72和特籼占13。高产型品种的产量分别比中产、低产型提高20.8%和54.8%。

根据CH₄排放量与产量的聚类分析结果, 早季供试品种分成5种具有不同CH₄排放量和产量的类型, 分别是低排低产型: IR72和特籼占13; 低排中产型: 黄华占和广恢998; 中排高产型: 五优308; 中排中产型: 黄莉占; 高排中产型: 丰美占和丰粤占。适合在早季推广应用的类型为低排中产型品种黄华占和广恢998; 中排高产型品种五优308。

2.5 CH₄排放特性与植株农艺性状间的相关分析

利用早季供试品种的CH₄排放通量分别与叶面积指数、分蘖数、株高、取样时测定箱均温等进行相关分析的结果表明, 取样时测定箱均温、株高、叶面积指数与CH₄排放通量的相关系数分别为0.419、0.412和0.200($n=320, r_{0.01}=0.148$), 均呈极显著正相关; 而与分蘖数的相关系数为-0.030, 未达显著水平。

利用早、晚季的CH₄排放(总)量与全生育期、收获指数、生物量、稻谷产量及构成因子等性状进行的

相关系数分析结果如表5所示, 早季CH₄排放总量与千粒重呈显著负相关; 与全生育期、每穗粒数的相关系数分别为0.331和0.308, 达到 $P<0.1 (r_{0.1}=0.296)$ 显著水平, 因此, 可认为早季的千粒重越大, CH₄排放越少; 生育期越长、粒数越多, CH₄排放量就越多; 而CH₄排放总量与收获指数、生物量、稻谷产量、穗数和结实率的相关系数均不显著。晚季CH₄排放量与全生育期呈极显著正相关; 与穗数、结实率和收获指数等3个性状间呈(极)显著负相关, 说明生育期越长、CH₄排放量越大; 穗数多、结实率和收获指数高的品种, CH₄排放量相对较少; 而CH₄排放量与稻谷产量、生物量、每穗粒数、千粒重等性状间均无显著相关。

3 讨论

3.1 关于水稻品种CH₄排放特性及其类型的划分

研究结果表明, CH₄排放量与温度的相关系数达极显著正相关。我国南方稻区早、晚季的气温变化各异, 其中, 早季气温由低逐渐升高, 成熟期达最高, 而晚季则呈相反趋势, 气温由高逐渐降低。因此, 水稻品种的CH₄排放特性在早、晚季表现不一样。早季种植时, CH₄排放量在生长发育前期较少, 中期逐渐增加, 抽穗期后达到高峰; 抽穗至成熟期的CH₄排放量

表4 不同生育期的CH₄排放量和稻谷产量

Table 4 The grain yield, amount of CH₄ emission in different growth stages

品种名	2014年早季CH ₄ 排放量/g·m ⁻²				2013年晚季CH ₄ 排放量/g·m ⁻²	2014年早季稻谷产量/kg·m ⁻²
	前期	中期	后期	总量		
IR72(CK)	0.78	1.60cd	8.45bcd	10.83bcd	3.48	0.40c
广恢998	1.02	1.22de	5.89cd	8.13cd	2.49	0.54b
特籼占13	0.76	1.47d	8.59bcd	10.82bcd	2.30	0.44c
黄华占	0.63	0.97e	5.77d	7.37d	1.37	0.53b
五优308	0.68	1.61cd	9.59bc	11.88bc	7.36	0.65a
黄莉占	0.85	1.98bc	9.82b	12.65b	9.50	0.56b
丰美占	0.99	2.19ab	17.92a	21.10a	11.78	0.55b
丰粤占	0.96	2.58a	17.17a	20.71a	13.38	0.51b

注: 前期指从移栽至拔节幼穗分化始期; 中期指拔节幼穗分化始期至抽穗期; 后期指抽穗期至结实完熟期; 总量指从移栽至完熟期的CH₄排放量。2013年晚季CH₄排放量指CH₄排放高峰期的排放量。

表5 水稻品种CH₄排放量与植株农艺性状间的相关系数

Table 5 The correlation coefficient between the yield-related characters and CH₄ emission amount

季别	性状	全生育期	生物量	稻谷产量	收获指数	结实率	穗数	粒数/穗	千粒重
2014年早季	CH ₄ 排放总量	0.331	0.092	-0.131	0.014	0.166	-0.211	0.308	-0.401*
2013年晚季	CH ₄ 排放量	0.258**	-0.054	-0.149	-0.213*	-0.192*	-0.243*	0.035	0.178

注: 早季样品数均为32个, $r_{0.1}=0.296, r_{0.05}=0.349, r_{0.01}=0.449$; 晚季样品数为98个, $r_{0.05}=0.194, r_{0.01}=0.254$; *和**分别表示达到 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的显著水平。

占排放总量的70%以上,供试品种的表现均一致。晚季种植时,供试品种的CH₄排放在前中期表现活跃,本试验中90%供试品种的CH₄排放量在分蘖盛期达到最大值,然后逐渐降低,在幼穗分化期降至最低。蔡祖聪等^[31]利用诸多研究者在不同季节、不同地点和不同品种获得的研究结果,建立了水稻不同生长季节的CH₄逐日排放模型。该模型的最大特点是:早、晚季水稻生长期间CH₄排放通量峰值出现的时间存在差异,早季移栽后15 d内的平均排放通量只有季节平均值的0.6左右,随生长后移逐渐增加,成熟期还有较高排放通量。而晚季在水稻移栽后10 d左右即达到排放峰值,以后逐渐降低。本研究中早、晚季的CH₄排放规律与该模型基本吻合。

本研究针对2013年晚季水稻品种CH₄排放量具有显著差异的特性,根据聚类分析结果划分为高排放型、中排放型和低排放型3种类型。2014年早季对部分品种进行了重复试验,结果表明供试品种的CH₄排放类型在早、晚季表现不尽相同。其中,一类品种的CH₄排放在前、晚季属同一类型,这些品种有:高排放类型的丰美占和丰粤占、中排放类型的五优308、低排放类型的黄华占和广恢998。说明它们对环境变化不敏感,适应性较好。另一类品种的CH₄排放在前、晚季属于不同类型,分别是黄莉占、IR72和特粳占13。其中,黄莉占在早季为中排类型,晚季为高排类型;IR72和特粳占13在早季为中排类型,而晚季为低排类型。说明这些品种的CH₄排放受环境因素影响较大。本试验仅在盆栽条件进行,稻株生长环境与大田生态略有不同,因此,CH₄排放类型的划分结果还需大田进一步验证。

3.2 水稻CH₄排放特性与植株农艺性状的关系

目前用于检测水稻CH₄排放特性的技术是静态暗箱-气相色谱法,即首先利用静态暗箱法采集稻田CH₄气体,再用气相色谱仪测定CH₄含量。该取样方法和检测技术较为繁琐复杂,所需仪器设备昂贵、技术要求高,难以直接在水稻育种中普及应用,成为水稻低CH₄排放品种选育工作停滞不前的主要原因之一。关于水稻植株性状与CH₄排放量之间的关系已有较多报道,Lindau等^[10]和Wang等^[13]的研究表明,高秆品种比矮秆品种具有更高的CH₄排放量;在一定范围内,植株茎蘖越多,叶片越多,CH₄的传输速率越大^[13]。傅志强等^[26]研究水稻植株通气系统与CH₄排放量的关系发现,株高是影响CH₄排放量大小的主要性状,二者呈极显著正相关。Das等^[34]对10个印度水稻

品种的CH₄排放特性进行研究发现,CH₄排放量大的品种具有较大的茎髓腔组织、较大叶面积及其气孔密度大等特征。Qin等^[27]的研究结果显示,CH₄排放强度与分蘖数和叶绿素值(SPAD)呈显著正相关。本研究通过对稻株形态、产量及其构成因子等农艺性状进行评价,筛选出株高、叶面积指数与CH₄排放通量的相关系数均呈极显著正相关。综合上述研究结果,建议在开展低CH₄排放水稻品种选育种时,可将株高和叶面积指数作为初选的评价指标。

结果还表明,CH₄排放量与全生育期的相关系数呈正相关关系,晚季的相关系数为0.258 0达极显著水平($r_{0.01}=0.254$),早季的相关系数为0.331达 $P<0.1$ 显著水平($r_{0.1}=0.296$),说明全生育期是影响CH₄排放的主要因素。由于种植季节不同,CH₄排放量与其他植株农艺性状间的相关系数在早、晚季表现不一致。早季CH₄排放量与株高、叶面积指数、每穗粒数呈显著正相关,与千粒重呈显著负相关;晚季CH₄排放量与穗数、结实率和收获指数呈(极)显著负相关。Qin等^[27]的研究认为CH₄排放强度与收获指数呈显著负相关。因此,在利用植株农艺性状辅助开展CH₄低排放水稻品种选育时,应根据种植季节不同,采用不同评价指标。上述这些农艺性状都是育种家和农技人员熟知和常用的,若应用这些性状作为低CH₄排放品种选育的初筛评价指标,将可大幅减少工作量,提高选育种效率。

本研究中,不论是早季还是晚季,CH₄排放量与生物量、稻谷产量之间的相关系数均无显著相关,说明培育具有低CH₄排放和高产特性的水稻新品种是切实可行的。

3.3 水稻高产与低CH₄排放品种的应用前景

选育与推广应用具有低CH₄排放的高产水稻品种是解决当前我国粮食安全和环境保护难题的重要途径之一。但是,这方面的研究工作鲜有报道。本研究对南方稻区主要推广应用的水稻品种的CH₄排放特性、产量和植株形态等性状进行了较为系统研究。2013年晚季根据产量和CH₄排放的系统聚类分析结果,适合目前水稻生产应用的品种类型有3种:低排高产型、中排高产型和低排中产型。这些品种分别是:黄华占、粤新占(低排高产型),五优308、丰华占、特三矮、茉莉占选、广超丝苗、珍桂矮(中排高产型),特粳占13、广恢998、IR72、IR36、富粤占、七桂早25(低排中产型)。2014年早季利用部分品种进行验证试验。结果表明,IR72和特粳占13是低排低产型,

其产量表现与晚季差异较大;而黄华占和广恢998是低排中产型,五优308是中排高产型,早、晚季的表现较一致,适合在生产上应用。本研究虽然进行了两季试验的相互验证,但供试品种数较少,且只在一个生态区域的盆栽环境下实施,结果是否具有普遍规律,还需在多季、多生态区的大田环境验证。

在本试验筛选出的具有高产与中低 CH_4 排放特性的水稻品种中,黄华占和五优308是近十年来我国南方稻区应用面积最大的常规稻和杂交稻品种之一,是农业农村部主推品种。截至2016年,黄华占已累计应用600多万 hm^2 ,五优308累计应用超过187万 hm^2 。广恢998是组配品种数最多的恢复系(国家水稻数据网<http://www.ricedata.cn/variety/index.htm>),由其配组的天优998、博优998、秋优998等品种已在我国南方稻区大面积应用,累计推广520多万 hm^2 。其他优良品种如珍桂矮、丰华占、广超丝苗、七桂早25和特三矮等已在南方稻区水稻生产中发挥了重要作用,或作为优异资源得到广泛利用。随着这些高品种的低 CH_4 排放特性被挖掘,它们在今后的水稻生产中将发挥更大作用。

4 结论

(1)根据 CH_4 排放量具有显著差异的特点,将水稻品种的 CH_4 排放划分为高、中、低3种类型,筛选出低 CH_4 排放品种(种质)黄华占、特粳占13、广恢998、IR72、IR36、粤新占2号、富粤占和七桂早25。

(2)筛选出株高、叶面积指数、全生育期、收获指数、结实率和千粒重等植株农艺性状与 CH_4 排放量呈显著相关,其中,株高和叶面积指数与 CH_4 排放通量呈极显著正相关,可在开展水稻低 CH_4 排放新品种选育时作为辅助评价指标。而 CH_4 排放量与稻谷产量、生物量间的相关系数均未达显著水平,这为开展低 CH_4 排放高产水稻新品种培育提供了重要理论依据。

(3)筛选出产量较高、 CH_4 为中低排放的水稻品种共13个,其中,黄华占、五优308和广恢998是目前南方稻区大面积推广应用的常规稻品种、杂交稻品种和配组杂交稻品种最多的恢复系。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007. Synthesis report: An assessment of the intergovernmental panel on climate change[R/OL]. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[R]. 北京:中国计划出版社, 2004.

- National Development and Reform Commission. The People's Republic of China, Initial national communication on climate change[R]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [3] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京:科学出版社, 2001:14-15.
- WANG Ming-xing. Methane emission from paddy field in China[M]. Beijing: Science Press, 2001:14-15.
- [4] International Rice Research Institute (IRRI). Trends in the rice economy: Rice production, area, and yield. 2009[R/OL]. http://beta.irri.org/statistics/index.php?option=com_content&task=view&id=413&Itemid=352
- [5] 王效科, 李长生, 欧阳志云. 温室气体排放与中国粮食生产[J]. 生态环境, 2003, 12(4):379-383.
- WANG Xiao-ke, LI Chang-sheng, OUYANG Zhi-yun. Greenhouse gas emissions and China's food production[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4):379-383.
- [6] Wuebbles D J E, Hayhoe K. Atmospheric methane and global change[J]. *Earth-Science Reviews*, 2002(57):177-210.
- [7] Schütz H, Wolfgang S, Ralf C. Processes involved in for motion and emission of methane in rice paddies[J]. *Biogeochemistry*, 1989, 7:33-53.
- [8] Minami K, Neue H U. Rice paddies as a methane source[J]. *Climatic Change*, 1994, 58:13-26.
- [9] Adhya T K, Rath A K, Gupta P K, et al. Methane emission from flooded rice fields under irrigated conditions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 18:245-248.
- [10] Lindau C W, Bollich P K, DeLaune R D. Effect of rice variety on methane emission from Louisiana rice[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1995, 54:109-114.
- [11] Watanabe A, Kajiura M, Tashiro T, et al. Influence of rice cultivar on methane emission from paddy fields[J]. *Plant Soil*, 1995, 176:51-56.
- [12] 邵可声, 李震. 水稻品种以及施肥措施对稻田 CH_4 排放的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1996, 32(4):505-513.
- SHAO Ke-sheng, LI Zhen. Effect of rice cultivars and fertilizer management on methane emission[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1996, 32(4):505-513.
- [13] Wang B, Neue H U, Samonte H P. Effect of cultivar difference('IR72', 'IR65598' and 'Dular') on methane emission[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1997, 62(1):31-40.
- [14] Hosono T, Nouchi I. Effect of gas pressure in the root and stem base zone on methane transport through rice bodies[J]. *Plant and Soil*, 1997, 195:65-73.
- [15] Sigren L K, Byrd G T, Fisher F M, et al. Comparison of soil acetate concentrations and methane production, transport, and emission in two rice cultivars[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11:1-14.
- [16] Butterbach-bahl K, Papen H, Rennenberg H. Impact of gas transport through rice cultivars on methane emission from rice paddy fields[J]. *Plant Cell and Environment*, 1997, 20:1175-1183.
- [17] Singh S, Kashyap, Singh J S. Methane flux in relation to growth and phenology of a high yielding rice variety as affected by fertilization[J]. *Plant and Soil*, 1998, 201:157-161.
- [18] Satpathy S N, Mishra S, Adhya T K, et al. Cultivar variation in meth-

- ane efflux from tropical rice[J]. *Plant and Soil*, 1998, 202:223-229.
- [19] 王增远, 徐雨昌, 李震, 等. 水稻品种对稻田CH₄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 emission from rice field[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(4):441-446.
- [20] Mitra S, Jain M C, Kumar S, et al. Effect of rice cultivars on methane emission[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1999, 73:177-183.
- [21] 曹云英, 许锦彪, 朱庆森. 水稻植株状况对甲烷传输速率的影响及其品种间差异[J]. 华北农学报, 2005, 20(2):105-109.
- CAO Yun-ying, XU Jin-biao, ZHU Qing-sen. Effect of rice plant status and difference rice varieties on methane transport rate[J]. *Acta Agriculturae Boreali-sinica*, 2005, 20(2):105-109.
- [22] 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, 58:367-375.
- [23] Jia Z J, Cai Z C, Xu H, et al. Effect of rice plants on CH₄ production, transport, oxidation and emission in rice paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 2001, 230:211-221.
- [24] Aulakh M S, Wassmann R, Rennenberg H. Methane transport capacity of twenty-two rice cultivars from five major Asian rice growing countries[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 91:59-71.
- [25] 傅志强, 黄璜, 朱华武. 低温室气体排放水稻品种的筛选研究[J]. 作物研究, 2010, 24(4):330-333.
- FU Zhi-qiang, HUANG Huang, ZHU Hua-wu. Screening study on lower greenhouse gas emissions of rice varieties[J]. *Crop Research*, 2010, 24(4):330-333.
- [26] 傅志强, 黄璜, 何保良, 等. 水稻植株通气系统与CH₄排放相关性研究[J]. 作物学报, 2007, 33(9):1458-1467.
- FU Zhi-qiang, HUANG Huang, HE Bao-liang, et al. Correlation between rice plant aerenchyma system and methane emission from paddy field[J]. *Acta Agriculturae Sinica*, 2007, 33(9):1458-1467.
- [27] Qin X B, Li Y E, Wang H, et al. Effect of rice cultivars on yield-scaled methane emissions in a double rice field in south China[J]. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 2015, 12(Suppl1):47-66.
- [28] Zhang Y, Jiang Y, Li Z J, et al. Aboveground morphological traits do not predict rice variety effects on CH₄ emissions[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 208:86-93.
- [29] 钟旭华, 黄农荣, 胡学应. 水稻“三控”施肥技术[M]. 北京:中国农业出版社, 2011:8-15.
- ZHONG Xu-hua, HUANG Nong-rong, HU Xue-ying. The “Three Controls” nutrient management technology for irrigated rice[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2011:8-15.
- [30] 田卡, 张丽, 钟旭华, 等. 稻草还田和冬种绿肥对华南双季稻产量及稻田CH₄排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):592-598.
- TIAN Ka, ZHANG Li, ZHONG Xu-hua, et al. Effects of rice straw and winter green manure incorporations on grain yields and methane emissions of double-season rice (*Oryza sativa*) field in south China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):592-598.
- [31] 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, 2009:245-254.
- CAI Zu-cong, XU Hua, MA Jing. Methane and nitrous oxide emissions from rice-base ecosystems[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009:245-254.
- [32] 吉田昌一, 福尔诺 D A, 科尔 J H, 等. 水稻生理学实验手册[M]. 北京:科学出版社, 1975:65-68.
- Yoshida S, Forno D A, Gock J H, et al. Laboratory manual for physiological studies of rice[M]. Beijing:Science Press, 1975:65-68.
- [33] Singh S, Singh J S, Kashyap A K. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(9):1219-1228.
- [34] Das K, baruah K K. Methane emission associated with anatomical and morphophysiological characteristics of rice (*Oryza sativa*) plant[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 134:303-312.