

种植方式对水稻 CH₄ 排放的影响

傅志强¹, 黄 璜²

(1.湖南农业大学理学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

摘 要:应用静止箱取样技术观测了直播与移栽稻甲烷排放量,同时测定了根系生长活力,比较了两者的差异。结果表明,直播稻与移栽稻呈现相同的甲烷排放日变化与季节变化模式;基于本田生长期甲烷排放量比较,直播稻甲烷排放通量低于移栽稻,但甲烷排放总量高于移栽稻,两者差异显著($P<0.05$)。甲烷排放量与根系活力相关性分析表明,甲烷排放与根系活力、根系吸收能力呈显著正相关关系($P<0.05$);根系活力对移栽稻全生育期甲烷排放影响较大,相关性达 0.05 水平,但直播稻并不显著;直播稻全生育期的甲烷排放通量与根系吸收能力呈显著正相关($P<0.05$),而移栽稻在生长中后期受根系吸收能力的影响较大。因此水稻根系活力是影响甲烷排放的重要因素;加强田间水分管理,减少直播稻甲烷排放十分必要。

关键词:水稻;直播;甲烷排放;机理

中图分类号:X171.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2513-05

Impact of Rice Cultivation Patterns on Methane Emission from Paddy Field

FU Zhi-qiang¹, HUANG Huang²

(1.Science College of Hunan Agricultural University, Changsha 410128,China; 2.Agronomy College of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The methane emission flux was determined in paddy field of early and late rice under translating and direct sowing patterns, respectively, using the static box sampling technique in 2005 and 2006. The results analyzed on difference between the direct sowing rice (DSR) and the translating rice (TR) patterns were shown that, the methane emission under DSR and TR presented the same daily variation and seasonal law. The methane flux under DSR was significantly lower but the amount of methane emission under DSR was significantly greater than that under TR based on rice growth stage in paddy field (except of seedling field). The main reasons were as follows: i) days of rice growing under DSR in paddy field was longer than that under TR; ii) seedlings per area under DSR were greater than that under of TR; iii) root activity under DSR was higher than that under TR, especially at the rice middle and late stages. Further analysis on the correlation showed that methane emission was positive with activity and absorbing ability of rice root. The root activity affected methane emission over the whole rice growth season and there was significant correlation ($P<0.05$) between the root activity and methane emission under TR, but not significant correlation under DSR. There was positive correlation between the methane emission flux and root absorbing ability under DSR, while root absorbing ability affected methane emission only at the rice middle and late growth stages under TR. Therefore, rice root activity is one of the key factors which affect methane emission from paddy soil, and it is necessary to reduce the methane emission of DSR by controlling root activity with the area of direct sowing rice increasing in southern China.

Keywords: rice; direct sowing rice (DSR); methane emission; mechanism.

水资源的有效性和劳力资源的成本是选择水稻种植方式的主要依据。直播稻栽培与劳力缺乏和水资源的不足相适应。同时,生育期短、产量高的水稻品种和化学除草方法的应用,也为水稻直播的发展创造了

条件。美国、澳大利亚和欧洲诸国 20 世纪 70 年代以后几乎全部实行机械化直播种稻^[2]。亚洲作为水稻主产区,直播稻面积已达到 2 900 万 hm²,约占亚洲水稻总面积的 21%。由于水稻生产的经济效益问题,近年来直播稻栽培方法发展迅速^[1]。整地、收割和脱粒的机械化进一步促进直播稻的应用。

许多试验研究了水稻移(抛)栽甲烷排放的规律、影响因素、排放量估算以及减排措施。但水稻直播对甲烷排放的影响及其机理研究报道少见。因此,随着

收稿日期:2008-03-28

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划“国家粮食丰产科技工程”资助项目(2006BAD02A01)

作者简介:傅志强(1968—),男,湖南涟源人,博士,主要从事农业生态及作物模型研究。E-mail:zqf_cis@126.com

直播稻面积的增加,对直播稻的甲烷排放及其机理进行试验研究,为直播稻的发展提供环境学支撑具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概述

本试验于 2005 年早、晚两季、2006 年晚稻在湖南农业大学农学院试验田内进行。试验地属中亚热带季风湿润气候区,年平均气温 16~18℃,≥10℃的活动积温 5 000~5 800℃,适于双季稻栽培。2005 年早、晚稻前茬作物均为马铃薯,2006 年晚稻前期空闲,前茬作物为油菜。供试土壤有机质含量为 26.7 g·kg⁻¹,全氮 1.62 g·kg⁻¹,速效磷 28.6 mg·kg⁻¹,速效钾 58 mg·kg⁻¹,pH 值 6.8。

1.2 供试材料

2005 年早、晚稻 2 季供试品种分别为金优 402、金优 207,生育期分别为 113、115 d,2006 年晚稻供试品种 T 优 259,生育期 115 d。

1.3 试验设计

2005 年早、晚稻以及 2006 年晚稻试验设置水稻移栽、直播 2 个处理,3 次重复,共计 6 个小区,随机排列。大田试验以稻田自然丘块为单位,面积 667 m²。整块稻田均分为 6 个小区,每个小区面积为 110 m²。2005 年早稻于 3 月 22 日播种,4 月 25 日移栽,7 月 14 日收获;直播稻于 3 月 28 日播种,7 月 14 日收获。2005 年晚稻于 6 月 20 日播种,7 月 16 日移栽,10 月 15 日收获;直播于 6 月 26 日播种,10 月 20 日收获。2006 年晚稻于 6 月 19 日直播稻播种,移栽稻育秧,7 月 20 日移栽,10 月 20 日收获;移栽稻栽培规格为 20 cm×16.7 cm,早稻每穴 2 株,晚稻每穴 1 株。直播稻播量为 2.5 kg·667 m⁻²,保证基本苗数 80 苗·m⁻²。各处理 N(纯 N)、P(P₂O₅)、K(K₂O)用量分别为 150:75:130 (kg·hm⁻²),N 肥用法基、蘖、穗肥各占 1/3,50%钾肥、100%磷肥基施,50%钾肥作穗肥施用。直播稻田前期保持湿润,中后期浅层淹水;移栽稻浅水灌溉。

1.4 观测指标与方法

1.4.1 甲烷取样与测定

CH₄ 采样采用静止箱技术,箱底面积 51 cm×51 cm,高 100 cm。从水稻返青期开始,每隔 3 d 在同一地点测定各品种甲烷排放通量。甲烷气体取样时,将取样箱轻放在回型框上。回型框水槽内的水保证取样箱扣入时起到箱内外气体隔绝的水封作用。每次观测从上午 8:00 开始,到下午 6:30 结束,每隔 2 h 从取样箱

中以 10 min 为时间间隔连续 4 次抽样。取样方法见参考文献[3],甲烷气体样品测定方法见文献[4],排放通量计算方法见文献[5]。

1.4.2 水稻根系活力测定

2006 年晚稻分蘖始期、分蘖盛期、孕穗期、齐穗期、成熟期,到田间挖取具有代表性的水稻植株,连土带回实验室,小心清除泥沙后,测定根系活力和总吸收表面积、活跃吸收面积。根系活力测定采用 TTC 法;根系总吸收表面积和活跃表面积测定用亚甲基蓝法^[6]。

2 结果与分析

2.1 直播稻与移栽稻 CH₄ 排放规律

2005 年早、晚稻以及 2006 年晚稻分别在早稻孕穗期、晚稻分蘖盛期对甲烷排放量进行全天观测。观测结果表明(图 1、2),水稻直(撒)播与移栽 CH₄ 排放呈现明显的日变化规律,都表现为单峰模式。早晨温度低,甲烷排放通量小,随着时间的推移,CH₄ 排放通量呈递增趋势,通常在 14:00—16:00 出现峰值,然后开始下降,一般在早晨 6:00 左右达到最小值。研究证明,影响稻田 CH₄ 排放通量日变化的主要原因是 CH₄ 传输路径传输效率的日变化^[5,7]。下午 14:00—16:00 当天气温达到最高,增强了植物体、冒气泡、液相扩散 3 条传输通道的甲烷传输能力,促进了甲烷排放路径的排放效率,从而出现 CH₄ 排放峰值。另外,从图 1 和图 2 可知,田间气温、5 cm 处土壤温度的变化与甲烷排放通量变化具有一致性。这与前人的研究结果相同^[8~11]。

水稻不同直播方式与移栽都呈现出相同的季节变化趋势,即早稻甲烷排放通量前期低,中期较高,后期低;晚稻前期高,后期随生育期进程呈下降的趋势(图 3)。早稻期间峰值出现在孕穗期,晚稻期间直播稻、移栽稻峰值出现在分蘖始到分蘖盛期。2005 年早稻田直(撒)播稻 CH₄ 排放波动范围在 3.53~12.68 mg·m⁻²·h⁻¹ 之间;移栽稻变化幅度在 4.87~10.24 mg·m⁻²·h⁻¹ 之间,晚稻田直播稻甲烷排放通量变化范围在 2.98~28.76 mg·m⁻²·h⁻¹ 之间;移栽稻变化范围在 4.06~26.05 mg·m⁻²·h⁻¹ 之间。2006 年晚稻直播稻 CH₄ 排放波动范围在 1.06~15.37 mg·m⁻²·h⁻¹ 之间;移栽稻变化幅度在 1.63~8.29 mg·m⁻²·h⁻¹ 之间。研究证明^[7],稻田甲烷季节变化规律受气温、水稻生长发育进程、施肥、水管理等不同因素的影响。甲烷排放季节变化是甲烷产生与转化的生物化学过程的温度效应和甲烷传输过程温度效应以及水稻生长发育进程的综合作用结果。

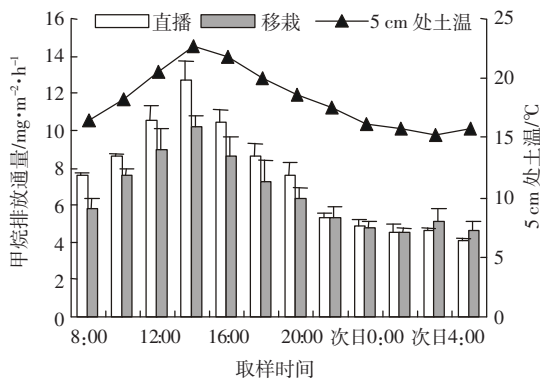
图1 2005年6月12日稻田CH₄排放通量日变化

Figure 1 Daily variation of methane emission flux at 12, June in 2005 early rice field

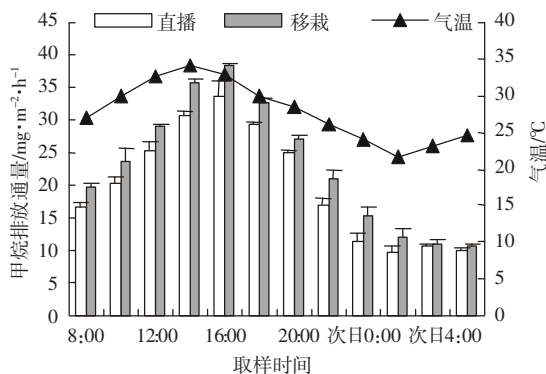
图2 2005年8月8日稻田CH₄排放通量日变化

Figure 2 Daily variation of methane emission flux at 8, August in 2005 late rice field

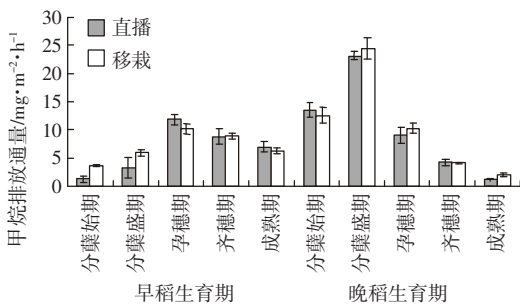
图3 2005年早、晚稻各生育期CH₄排放通量

Figure 3 Methane emission flux in the growth stage of early and late rice from paddy fields in 2005

早稻生长前期, 直播稻甲烷排放通量低于移栽稻; 后期直播稻甲烷排放通量高于移栽稻。2005年早稻分蘖盛期直播稻与移栽稻甲烷排放通量分别为 3.89 、 $4.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 移栽比直播高出 $0.38 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 增加了 9.8% ; 孕穗期分别为 10.79 、 $10.14 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 直播比移栽超出了 $0.65 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 增加了 6.4% 。其原因可能是: ①直播稻生育期相对于移栽稻提前 7 d 左右。同一生育期, 观测直播稻甲烷排放通量时气温相对较低 $2 \sim 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 影响到稻田土壤中甲烷产生和排

放。②早稻水稻植株对 CH_4 的产生、传输影响较大。与移栽稻比, 孕穗期直播稻光合速率高、光合产物累积速度快、根系活力增强, 植株通气组织发达, 有助于甲烷的产生和排放, 可能导致了直播稻甲烷排放通量大于移栽稻。③直播稻与移栽稻相比较, 两者栽培密度不同, 单位面积内水稻植株数量有较大差异。研究表明^[12-15], 水稻干重、根体积、根系干重和孔径大小、分蘖数以及产量都与稻田甲烷排放量呈正相关; 植株传输甲烷能力(MTC)和根干生物量以及地上部分生物量呈正相关。因此, 早稻孕穗期直播稻甲烷排放通量要高于移栽稻。

晚稻分蘖盛期, 直播稻与移栽稻 CH_4 排放通量分别为 23.13 、 $24.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 移栽比直播高 $1.31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 孕穗期分别为 13.06 、 $14.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 直播比移栽低 $1.24 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 生长后期直播略低于移栽稻。直播稻种植初期到分蘖盛期, CH_4 排放通量均较大, 峰值出现在分蘖盛期, 后期 CH_4 排放通量一直呈降低趋势。移栽稻在移栽后 15 d 左右即达到了甲烷排放通量的峰值, 然后陡然下降。这种变化趋势主要原因在于晚稻前期气温高, 有机质含量丰富, 后期气温低, 产甲烷基质少这种独特的气候特征造成的。直播晚稻在6月中旬播种, 田面保持湿润灌溉, 土壤有机质含量丰富, 但水稻植株弱小, 甲烷排放主要依靠气泡形成和液相扩散2条通道, 甲烷排放通量较高。在移栽稻排放高峰期, 气温达到了晚季的最高值, 而直播稻前期有机质消耗多, 土壤中产甲烷基质相对缺乏, 所以 CH_4 排放峰值略低。生长后期, 气温缓慢下降, 土壤中供产甲烷菌利用的有机质少, 同时由于水稻生长密植, 遮蔽阳光, 致使田面水温 and 泥温较低, 可能是甲烷排放通量急剧减少的主要原因。晚稻成熟期由于田中无水, 破坏了产甲烷细菌的生存环境, 稻田土壤中甲烷产生量很少, 甲烷排放量甚微。

2.2 基于本田期CH₄排放量比较

直播与移栽稻甲烷排放通量与总量差异分析结果表明(表1), 两者 CH_4 排放通量与总量差异均显著。2005年直播稻甲烷排放通量要低于移栽稻, 但排放总量要高于移栽稻; 2006年直播晚稻甲烷排放通量与总量均要大于移栽稻。2005年早稻移栽稻、直播稻甲烷排放总量分别为 13.40 、 $14.64 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 移栽稻比直播稻减少了 $1.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 降低了 8.5% ; 晚稻移栽稻、直播稻甲烷排放总量分别为 26.58 、 $27.60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 移栽稻比直播稻减少了 $1.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 降低了 3.7% 。2006年晚稻移栽稻与撒播甲烷季节排放量减少了 14.8% 。直

表 1 基于本本期甲烷排放通量差异显著性分析(LSD 法)
Table 1 Significant difference analysis of methane emission flux between different treatments(LSD method)

栽培 方式	2005 年早稻			2005 年晚稻			2006 年晚稻		
	本田期天数/ d	甲烷排放通量/ mg·m ⁻² h ⁻¹	甲烷排放量/ g·m ⁻²	本田期天数/ d	甲烷排放通量/ mg·m ⁻² h ⁻¹	甲烷排放量/ g·m ⁻²	本田期天数/ d	甲烷排放通量/ mg·m ⁻² h ⁻¹	甲烷排放量/ g·m ⁻²
直播	106	6.42a	14.64a	115	10.65a	27.60a	120	10.56a	28.15a
移栽	80	6.98a	13.40b	90	12.30b	26.58b	90	11.10a	23.97b

注:数据为 3 次重复的平均值。表中不同小写字母、大写字母分别表示差异达 0.05、0.01 显著水平。

播稻甲烷排放总量高于移栽稻,其原因可能是:①本田生长时间不同。虽然直播稻生育期较移栽稻缩短了 7 d 左右,但移栽稻秧田期在 25 d 左右,因此直播稻在本田生长时间比移栽稻长 18 d。移栽稻秧田期甲烷排放量很少,而且按秧田面积/本田面积=1:8 来计,单位面积内甲烷排放量更少,所以移栽稻秧田期甲烷排放量忽略不计。②分蘖始期到分蘖盛期是甲烷排放较高的阶段,甲烷排放峰值都出现在水稻栽植前期。早稻生长中后期,直播稻甲烷排放通量大于移栽稻,晚稻生长前期直播稻甲烷排放通量大于移栽稻。

同时从表 1 可知,年际间甲烷排放量存在差异。前人研究已证明年际间稻田甲烷排放量存在差异^[9]。其可能原因是气候、土壤以及栽培管理措施存在年际间差异。本研究结果表明,2006 年晚稻甲烷排放量大于 2005 年晚稻,可能的原因一方面气候存在年际间差异;另一方面,晚稻前茬作物分别是马铃薯和油菜。2006 年晚稻前茬作物油菜的根部和茎秆下部都残留在田里,为甲烷气体生成提供了更丰富的有机质。

2.3 水稻根系活力与甲烷排放相关性

相关文献表明^[16-18],不同水稻品种甲烷排放通量存在差异,原因之一即是水稻根系存在差异。不同品种根系活力不同,影响到稻田甲烷的产生、氧化与排放。晚稻分蘖盛期是甲烷排放的高峰值,通过对 2 种栽培方式下的稻田甲烷排放通量与水稻根系活力进行相关分析,结果表明,水稻全生育期甲烷排放通量与水稻根系活力之间呈正相关关系,且移栽稻的甲烷排放量与根系活力相关性达到 0.05 显著性水平。对于移栽稻,以甲烷排放通量为依变量的回归方程为 $Y=0.991X-10.019$,相关系数 $R=0.909\ 3(n=6)$,对回归

方程进行 F 检验(F 值=4.928 50),达到 0.05 显著水平;对于直播稻,回归方程为 $Y=0.997X-10.241$,相关系数 $R=0.749\ 6(n=6)$ 。

CH₄ 排放通量与根系吸收总面积、根系活跃吸收面积也呈正相关关系。移栽稻中后期的甲烷排放通量与两者均呈正相关,相关系数分别为 $R=0.755\ 9$ 、 $0.912\ 8(n=4)$;直播稻全生育期的甲烷排放通量与两者的相关性较强,其回归方程分别为 $Y=9.444\ 5X-18.974\ 0$ 、 $Y=8.640\ 2X-4.173\ 9$,相关系数 $R=0.843\ 5$ 、 $0.945\ 0(n=6)$,经显著性 t 检验,相关程度都达到了显著性水平($P<0.05$),表明甲烷排放通量与根系总吸收面积、根系活跃吸收面积都呈显著正相关。因此水稻根系活力是影响甲烷排放通量的重要因素。

3 结论与讨论

3.1 直播稻与移栽稻的甲烷排放通量比较

基于大田生长期直播稻甲烷季节排放总量大于移栽稻,并且差异显著,因此直播稻的甲烷排放环境成本要高于移栽稻,同时也表明,研究直播稻甲烷减排方法,减少直播稻甲烷排放量对于直播稻的发展很有必要。但上述计算与分析结果是基于本田生长期两种栽培方式 CH₄ 排放量的比较。当然,移栽稻移栽前期稻田因其而空闲或为前茬作物大田生长时期。只要稻田土壤处于淹水状态,满足 CH₄ 产生的必要条件都可能有甲烷气体生成与排放。为了对两种栽植方式进行完整比较,还应对移栽稻空闲田以及秧田期进行取样测定,有待于进一步研究;其次,直播稻前期保持湿润,中后期加强田间水分管理,减水稻田淹水时间有利于减少甲烷气体的生成与排放量。本研究在直播稻

表 2 各处理水稻根系总吸收面积与活跃吸收面积(10⁶ m²·hm⁻²)
Table 2 The absorbing surface area of rice roots under diferent treatments(10⁶ m²·hm⁻²)

处理	7.21		7.29		8.6		8.19		8.31		9.9	
	S _T	S _A	S _T	S _A	S _T	S _A	S _T	S _A	S _T	S _A	S _T	S _A
移栽	2.01	0.45	2.06	0.79	3.72	2.49	3.82	2.88	3.66	1.58	2.07	0.83
撒播	2.91	1.44	4.11	3.08	3.77	2.49	3.15	1.49	3.29	1.51	2.08	0.82

注:S_T代表根系总吸收表面积;S_A代表根系吸收活跃表面积。

出苗后一直处于淹水状态可能是导致其甲烷排放量较高的原因之一;再次,本研究仅观测了撒播稻的甲烷排放,而直播还有穴播、条播等不同方式,不同直播方式影响水稻植株的生长性状以及稻田植株群体下部微环境,从而对稻田水体与土壤产生影响,导致甲烷产生与排放存在差异,也还有待于进一步试验研究。

3.2 甲烷排放与根系活力的相关性

直播与移栽稻在水稻根系活力方面存在差异,并且不同生育时期表现不同,总体来说,直播稻根系活力强于移栽稻。不论是直播或是移栽,水稻根系活力与甲烷排放均存在正相关关系。对于移栽稻而言,甲烷排放通量与水稻根系活力之间呈显著正相关关系,以甲烷排放通量为依变量的回归方程为 $Y = 0.991X - 10.019$, 相关系数 R 为 0.909 3;直播稻 CH_4 排放通量与根系吸收总面积、根系活跃吸收面积也呈正相关关系,其回归方程分别为 $Y = 9.4445X - 18.9740$ 、 $Y = 8.6402X - 4.1739$, 相关系数 R 分别为 0.843 5、0.945 0, 经显著性 t 检验,相关程度都达到了显著性水平。因此,水稻根系活力是影响水稻甲烷排放的重要因素之一。

参考文献:

- [1] 邹应斌. 亚洲直播稻栽培的研究与应用[J]. 作物研究, 2004(3): 133-136.
ZOU Ying-bin. Research and application on the direct sowing rice cultivation in Asia[J]. *Crop Research*, 2004(3): 133-136.
- [2] 顾掌根, 王岳钧. 水稻直播高产机理研究初报[J]. 浙江农业科学, 2001(2): 51-54.
GU Zhang-gen, WANG Yue-jun. Research on high yield mechanism of the direct sowing rice[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2001(2): 51-54.
- [3] 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.
- [4] 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(自然科学学报), 2006, 32(6): 632-636.
FU Zhi-Qiang, HUANG Huang, CHEN Can, et al. Effect of Irrigation Depth on Methane Emission in the Rice-duck Complex Ecosystem[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Nature Sciences)*, 2006, 32(6): 632-636.
- [5] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 83-172.
WANG Ming-xing. Methane emission from chinese paddy field[M]. Beijing: Science Press, 2001. 83-172.
- [6] 赵世杰, 刘华山, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1998: 51-54.

- ZHAO Shi-jie, LIU Hua-shan, DONG Xin-chun. The experimental tutor of plant physiology[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1998. 51-54.
- [7] 上官行健, 王明星, 沈千兴. 稻田 CH_4 的排放规律[J]. 地球科学进展, 1993, 8(5): 23-36.
SHANGGUAN Xing-jian, WANG Ming-xing, SHEN Ren-xing. Regularity of methane emission from rice paddy fields[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1993, 8(5): 23-36.
 - [8] H Schutz, W-Seiler, R-Conrad. 土壤温度对水稻田甲烷排放的影响[J]. 国外农业环境保护, 1992(4): 19-22.
H Schutz, W-Seiler, R-Conrad. Effect of soil temperature on methane emission from paddy field[J]. *Foreign Agro-Environment Protection*, 1992(4): 19-22.
 - [9] 蔡祖聪, 沈光裕, 颜晓元, 等. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 145-153.
CAI Zu-cong, SHEN Guang-yu, YAN Xiao-yuan, et al. Effects of soil texture, soil temperature and Eh on methane emission from rice paddy fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(2): 145-153.
 - [10] 徐 华, 蔡祖聪, 李小平. 土壤 Eh 和温度对稻田甲烷排放季节变化的影响[J]. 农业环境保护, 1999, 18(4): 145-149.
XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping. Effect of soil Eh and temperature on the seasonal variation of methane emission from rice field[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1999, 18(4): 145-149.
 - [11] 王 玲, 谢德体, 刘海隆, 等. 稻田温度与甲烷排放通量关系的研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 29-31.
WANG Ling, XIE De-ti, LIU Hai-long, et al. Study on the relation between paddy field temperature and methane emission flux[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3): 29-31.
 - [12] Adhya T K, Rath A K, Gupta P K, et al. Methane emission from flooded rice fields under irrigated conditions[J]. *Biol Fertil Soils*, 1994(18): 245-248.
 - [13] Butterbach-Bahl K, Papen Hand Rennenberg H. Impact of gas transport through rice cultivars on methane emission from rice paddy fields[J]. *Plant Cell Environ*, 1997(20): 1175-1183.
 - [14] Hosono Tand Nouchi. The dependence of methane transport in rice plants on the root zone temperature[J]. *Plant Soil*, 1997(191): 233-240.
 - [15] 李木英, 石庆华, 谭雪明. 水稻根系营养吸收特性及其与干物质生产和稻米品质关系的研究[J]. 江西农业大学学报, 1996, 18(4): 376-382.
LI Mu-ying, SHI Qing-hua, TAN Xue-ming. Studies on the relationship between the characteristics of nutrition uptake of rice roots and the dry matter production, grain yield and grain quality[J]. *Acta Agricul-tural Universitatis Jiangxiensis*, 1996, 18(4): 376-382.
 - [16] 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.
SHAO Ke-sheng, LI Zhen. Effect of rice cultivars and fertilizer on methane emission from paddy field[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1996, 32(4): 505-513.
 - [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. Effect of rice cultivars on methane emissions from rice field[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(4): 441-446.
 - [18] Wang B J, Neue H U, Samonte H P. Effect of cultivar difference ('IR72, IR65598' and 'Dular') on methane emission[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 1997a(62): 31-40.