

# 稻草还田对晚稻稻田甲烷排放的影响\*

陈 苇 卢婉芳 段彬伍

(中国水稻研究所, 杭州 310006)

Wassmann R, Lantin R S

(国际水稻研究所, 菲律宾马尼拉)

**摘 要** 晚稻稻田的甲烷排放呈现前高后低特点, 稻田甲烷的日排放速率与日均气温具有良好的正相关。稻草翻施使稻田甲烷排放量上升 51.11%, 而采用稻草表施的方法甲烷排放量仅增加 33.98%。水稻分蘖期是稻田甲烷排放的重要时期, 其甲烷排放量占水稻全生育期排放总量的 65.6%, 施用稻草进一步加大水稻分蘖期的甲烷排放比例。与稻草翻施相比, 稻草表施的甲烷减排突出表现在水稻分蘖期及一天中 12 00~ 16 00 的甲烷排放高峰时段。土壤 5cm 处温度的昼夜周期性变化与稻田甲烷排放的昼夜周期性变化具有高度相关性。稻草表施可明显降低稻田耕层土壤水溶解甲烷含量。

**关键词** 水稻, 稻草还田, 甲烷排放, 土壤水溶解甲烷

**中图分类号** X511

甲烷( $\text{CH}_4$ )是大气中主要几种温室效应气体之一, 其增温效应仅次于  $\text{CO}_2$ , 进入 20 世纪 80 年代甲烷的温室效应贡献已达到 15%~ 17%<sup>[1]</sup>。目前大气中平均甲烷浓度为  $1.72\mu\text{L L}^{-1}$ , 每年以 0.8% 的速率增长<sup>[2,3]</sup>。全球每年通过各种途径排放于大气中的甲烷达到 535Tg(1Tg=  $10^{12}$ g), 通过人类活动产生的甲烷排放 375Tg, 其中水田是甲烷主要排放源, 占总排放量的 12%, 每年达到 60Tg 左右<sup>[4,5]</sup>。在厌氧条件下, 嫌气性纤维分解菌和果胶分解菌等微生物将土壤有机碳逐步降解为有机酸、醇、 $\text{CO}_2$  等, 在土壤产甲烷细菌作用下, 主要通过 2 个途径产生  $\text{CH}_4$ : (1)  $\text{CO}_2$  与土壤中的  $\text{H}_2$  或能提供 H 的有机分子反应; (2) 醇、酸类物质还原<sup>[6]</sup>。土壤淹水后土壤理化性质发生重大变化, 氧化还原电位(Eh 值)急剧下降, 当土壤 Eh 值低于  $-150\text{mV}$ <sup>[7]</sup>, 土壤甲烷大量产生。稻田甲烷的排放主要通过水稻植株运输和稻田水层扩散两个途径, 其中通过水稻根系吸收由植株地上部分释放于大气的甲烷占稻田总排放量的 80% 左右<sup>[8]</sup>。稻田甲烷排放受土壤性质、温度、肥料管理、灌溉、水稻品种等因素的影响<sup>[9]</sup>, 其中稻田肥料管理是一重要影响因素。有机肥的施用往往能大幅度地增加稻田甲烷排放量, 而仅施用化肥的甲烷排放量一般处于较低水平<sup>[10~12]</sup>。

水稻在我国广泛种植, 在施肥方面又以有机、无机肥配施为特征, 尤其是稻草还田在我国各稻区普遍应用。稻草作为一种廉价有机肥, 含大量的矿质元素, 对提高土壤肥力, 改善土壤理化性质等方面具有重要作用, 但因稻草的 C/N 非常高(一般 > 50), 一旦施入稻

\* 由 UNDP-GEF 和浙江省自然科学基金资助

收稿日期: 2001-06-08; 收到修改稿日期: 2001-07-24

田, 为土壤甲烷的产生提供了大量 C 源。因此, 研究稻草还田方式与稻田甲烷排放量的关系, 对认识我国稻田甲烷排放规律和探讨水稻高产、稻田甲烷排放减排技术具有重要意义。

## 1 材料和方法

试验在中国水稻研究所试验区进行。田间试验采用铝合金框架有机玻璃密封箱, 规格为  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1.2\text{m}$ , 底面积  $1\text{m}^2$ , 插入土层  $2\text{cm}$  处, 箱内插入一不锈钢细管作为气样自动采样管, 内装 2 只微型电扇以保持箱内空气均匀, 昼夜连续监测水稻全生育期的甲烷排放动态, 箱盖开闭由计算机控制。箱盖关闭后计时, 每隔  $4\text{min}$  自动采集一次箱内空气样测定其甲烷含量, 重复 4 次, 每  $2\text{h}$  循环 1 次, 即一天 12 个循环, 同时每  $10\text{min}$  自动记录空气、土层  $5\text{cm}$ 、土层  $10\text{cm}$  处的温度值。另外, 每周定时(9 00~ 10 00) 采集稻田土层  $5$ 、 $10$ 、 $15\text{cm}$  处的土壤水, 测定水溶解甲烷含量, 其方法为: 在各土层采样点水平预埋高分子半透细管, 采用真空试管吸液法采集土壤水<sup>[13]</sup>。

田间试验供试土壤为青紫泥, 其理化特性为: pH 值 6. 2; 有机碳  $24. 2\text{g kg}^{-1}$ ; 全 N  $2. 27\text{g kg}^{-1}$ ; CEC  $14. 4\text{cmol kg}^{-1}$ ; 质地粘壤。供试晚稻品种为秀水 11, 6 月 21 日播种, 7 月 20 日移栽, 每穴 3 株, 11 月 8 日收获, 株行距为  $16. 7\text{cm} \times 16. 7\text{cm}$ 。小区面积为  $5 \times 5\text{m}^2$ , 试验重复 3 次。

试验设置 3 个处理, 分别为尿素(T1)、尿素+ 稻草翻施(T2)、尿素+ 稻草表施(T3)。T2 处理稻草于插秧前 2 天翻施, T3 处理稻草在耙田后移栽前撒施于田面。试用稻草 C/N = 61, 稻草含 C 量(干基) 为 53. 0%, 各处理施用新鲜早稻稻草, 其总 C 施用量均为  $600\text{kg hm}^{-2}$ , 总施 N 量  $120\text{kg hm}^{-2}$ , 分 3 次施用, 其中基肥 50%, 两次追肥各占 25%, 分别于水稻移栽后 7 天及 21 天施用。P、K 肥分别采用过磷酸钙和 KCl 作基肥一次性施用, 其纯用量均为  $30\text{kg hm}^{-2}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 肥料对晚稻田甲烷排放的影响

水稻施肥因肥料种类及施用方式的不同, 对土壤中甲烷的产生起着非常重大的影响。试验表明(图 1): 稻草无论采用翻施或表施, 均显著地提高稻田甲烷排放量。水稻移栽后尿素处理(T1) 全生育期的甲烷排放总量为  $18. 49(\pm 1. 58)\text{g m}^{-2}\text{季}^{-1}$ , 而稻草翻施处理(T2) 达到  $27. 94(\pm 2. 64)\text{g m}^{-2}\text{季}^{-1}$ , 增加了 51. 11%。改变稻草的施用方式, 采用稻草表施(T3) 可显著降低稻田甲烷排放量增加值, 其甲烷排放总量为  $24. 77(\pm 2. 14)\text{g m}^{-2}\text{季}^{-1}$ , 与 T1 相比仅增加了 33. 98%, 比 T2 减排甲烷 11. 34%。

稻草表施的甲烷减排效果主要是由于减少稻草与土壤的接触, 部分稻草在土壤表层进行有氧降解, 其降解产物在土壤氧化层中还原产生  $\text{CH}_4$  的可能性较小, 主要以最终分解产物  $\text{CO}_2$  的形式排放, 降低了稻田因施用稻草甲烷排放的增加值。

### 2.2 水稻主要生育期的稻田甲烷排放特点

水稻各生育期稻田的甲烷排放量存在着很大差异, 晚稻田的甲烷排放呈现出前高后低的特点, 并主要集中在水稻分蘖期<sup>[14]</sup>。水稻移栽后 0~ 30 天的分蘖期, 甲烷排放累积量平均达到  $15 580\text{mg m}^{-2}$ , 占稻田水稻全生育期甲烷排放总量的 65. 6%, 此间, 甲烷日均排放速率高达  $519. 3\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , 比拔节抽穗期和灌浆成熟期分别高出 1. 05 倍和 27. 66

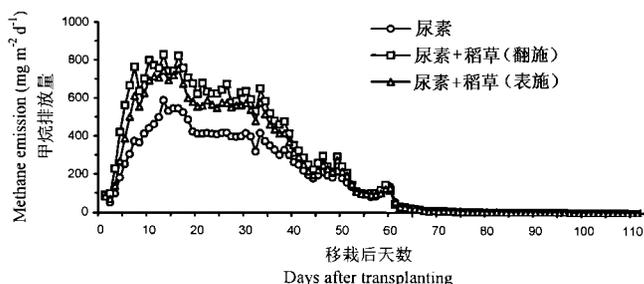


图 1 晚稻田甲烷排放动态变化

Fig. 1 Seasonal variation of methane emission from late rice field

倍(表 1)。在灌浆成熟期水稻完全转入生殖生长阶段,受环境温度逐日下降以及田间水分干湿交替管理等因素影响,土壤甲烷的产生及排放受到抑制,其排放速率迅速降低。尽管灌浆成熟期时间长达 52 天,接近水稻大田生长期的一半,但甲烷排放量仅占全生育期总排放量的 2.3%。因此,降低稻田甲烷排放量的最重要和最有效时期在于水稻分蘖期。

表 1 晚稻各生育期甲烷排放量比较

Table 1 Methane emissions at different growth stages of late rice

| 处理<br>Treatment | 生育期<br>Growth stage | 移栽后天数<br>Days after<br>transplanting | 甲烷排放量<br>Methane emission                            |  |                                  |
|-----------------|---------------------|--------------------------------------|--|--|----------------------------------|
|                 |                     |                                      | 排放量<br>Methane<br>emission<br>( $\text{mg m}^{-2}$ ) | 排放速率<br>Methane<br>emission rates<br>( $\text{mg m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) | 占排放总量<br>比例<br>Percentage<br>(%) |
| T1<br>尿素        | 分蘖期                 | 0~ 30                                | 11 677 ± 1 124                                       | 389.2 ± 37.5   | 63.2 ± 6.1                       |
|                 | 拔节抽穗期               | 31~ 58                               | 6 274 ± 529  | 224.1 ± 18.9   | 33.9 ± 2.9                       |
|                 | 灌浆成熟期               | 59~ 111                              | 535 ± 46   | 10.1 ± 0.9   | 2.9 ± 0.2                        |
| T2<br>尿素+ 稻草翻施  | 分蘖期                 | 0~ 30                                | 18 705 ± 1 595                                       | 623.5 ± 53.2   | 67.0 ± 5.7                       |
|                 | 拔节抽穗期               | 31~ 58                               | 8 690 ± 916  | 310.4 ± 32.7   | 31.1 ± 3.3                       |
|                 | 灌浆成熟期               | 59~ 111                              | 541 ± 92   | 10.2 ± 1.7   | 1.9 ± 0.3                        |
| T3<br>尿素+ 稻草表施  | 分蘖期                 | 0~ 30                                | 16 359 ± 1 488                                       | 545.3 ± 49.6   | 66.1 ± 6.0                       |
|                 | 拔节抽穗期               | 31~ 58                               | 7 855 ± 674  | 280.5 ± 24.1   | 31.7 ± 2.7                       |
|                 | 灌浆成熟期               | 59~ 111                              | 555 ± 68   | 10.5 ± 1.3   | 2.2 ± 0.3                        |
| 平均              | 分蘖期                 | 0~ 30                                | 15 580   | 519.3  | 65.6                             |
|                 | 拔节抽穗期               | 31~ 58                               | 7 606  | 253.5  | 32.1                             |
|                 | 灌浆成熟期               | 59~ 111                              | 544  | 18.1   | 2.3                              |

有机肥对稻田甲烷排放的影响程度与其 C/N 比值高低有直接关系,有机肥 C/N 越高,稻田产甲烷潜力和排放能力就越大<sup>[13]</sup>。试验表明(表 1),采用稻草翻施(T2),水稻各生育期的甲烷排放量和排放速率均高于尿素处理(T1),尤其在水稻分蘖期(0~ 30 天),平均甲烷排放速率比 T1 提高了 60.2%。同时水稻各生育期甲烷排放量分配比例也发生了

较大变化, 稻草翻施后, 水稻分蘖期的甲烷排放量占总排放量比例由 63.2% 提高到 67.0%。

稻草表施(T3)与稻草翻施(T2)相比, 水稻前、中期的稻田甲烷排放速率明显降低, 水稻分蘖期和拔节抽穗期的平均甲烷排放速率分别降低了 12.5% 和 9.6%。因此, 改进稻草施用方式, 即翻施改为表施, 可显著地降低水稻前、中期的稻田甲烷排放量。

### 2.3 温度对稻田甲烷排放的影响

土壤甲烷的产生主要受土壤产甲烷细菌活性影响, 而产甲烷细菌活性与土壤中众多环境因素有着密切的关系<sup>[15]</sup>, 如: 土壤氧化还原电位、温度、土壤易分解有机质含量、pH 等, 其中温度起着重要作用, 稻田甲烷排放与土层 5cm 处温度密切相关<sup>[10,13]</sup>。在常温下, 随土温升高土壤产甲烷细菌活性迅速增强, 使稻田甲烷排放速率迅速上升, 并且稻田甲烷排放速率随温度变化呈现出近于正弦曲线的周期性变化特点(表 2)。甲烷排放速率的昼夜变化与气温、土层 5cm 及 10cm 温度的变化均呈极显著相关, 其相关系数分别为 0.820<sup>\*\*</sup>、0.838<sup>\*\*</sup>、0.793<sup>\*\*</sup>, 其中土层 5cm 处温度与甲烷排放速率的相关性最高。

表 2 平均甲烷排放速率和温度的昼夜变化

Table 2 Diurnal variations of methane emission rate and temperature

| 时间<br>Time | 气温<br>Air<br>temperature(°C) | 全生育期平均<br>土壤温度<br>Soil temperature(°C) |      | 全生育期平均甲烷排放速率<br>Methane emission rate (mg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) |            |            |               |
|------------|------------------------------|--|------|---|------------|------------|---------------|
|            |                              | 5cm                                    | 10cm | T1  | T2         | T3         | 平均<br>Average |
| 00 00      | 17.4                         | 19.3                                   | 19.1 | 6.03±0.36   | 8.72±0.92  | 7.98±0.84  | 7.58          |
| 02 00      | 17.0                         | 18.9                                   | 18.7 | 5.88±0.40   | 8.58±0.96  | 7.99±0.90  | 7.48          |
| 04 00      | 16.8                         | 18.6                                   | 18.4 | 5.88±0.43   | 8.55±1.01  | 7.89±0.86  | 7.44          |
| 06 00      | 17.3                         | 18.4                                   | 18.2 | 5.71±0.43   | 8.32±0.95  | 7.79±0.88  | 7.27          |
| 08 00      | 20.6                         | 18.3                                   | 18.1 | 5.62±0.43   | 8.23±0.96  | 7.48±0.82  | 7.11          |
| 10 00      | 24.8                         | 18.7                                   | 18.4 | 6.82±0.73   | 10.33±1.22 | 9.15±1.06  | 8.77          |
| 12 00      | 26.7                         | 19.6                                   | 19.2 | 8.19±0.81   | 12.88±1.64 | 11.00±1.16 | 10.69         |
| 14 00      | 27.0                         | 20.5                                   | 20.1 | 9.40±0.63   | 15.11±1.88 | 12.62±1.20 | 12.38         |
| 16 00      | 23.8                         | 20.8                                   | 20.4 | 8.64±0.35   | 13.61±1.20 | 11.60±0.80 | 11.28         |
| 18 00      | 20.0                         | 20.5                                   | 20.2 | 7.72±0.41   | 11.74±1.20 | 10.36±0.88 | 9.94          |
| 20 00      | 18.5                         | 20.0                                   | 19.8 | 6.96±0.38   | 10.26±0.93 | 9.11±0.93  | 8.78          |
| 22 00      | 17.7                         | 19.5                                   | 19.3 | 6.43±0.39   | 9.51±1.06  | 8.60±0.96  | 8.18          |

在一天中, 甲烷排放低谷出现于上午 8:00, 与土壤的最低温出现时间相一致, 而甲烷的排放高峰出现于下午 14:00, 与最高气温出现时间一致。这一排放特点与稻田的甲烷排放途径关系密切。在植稻条件下, 大部分土壤甲烷以水稻植株为媒介排放于大气, 仅少部分甲烷以进发或稻田水层扩散方式释放于大气中<sup>[8]</sup>。在上午 8:00, 土壤耕层温度处于一天中最低, 使土壤甲烷的产生速率亦最小, 同时水稻的需水量小, 随水而被水稻根系吸收的甲烷量较少, 形成了一天中甲烷排放速率低谷区; 至下午 14:00, 尽管未达到一天中

最高土温,但气温已处于最高,水稻的需水量非常大,大量的甲烷以质流方式被水稻根系吸收,经植株地上部分迅速排放,形成一天中甲烷的排放高峰。

比较 3 个试验处理的甲烷排放速率昼夜变化,尿素处理(T1)在各时段的甲烷排放速率均最低,而且其峰谷值落差较小,峰谷比为 1.67,而稻草翻施(T2)的峰谷比高达 1.84,采用稻草表施(T3)可明显降低昼夜甲烷排放峰谷比,其值为 1.69,与 T1 基本一致。高的峰谷比表明稻田甲烷排放更集中于一天中甲烷排放的高峰区域,并且其日排放速率较高。与稻草翻施(T2)相比,稻草表施(T3)每天各时段的甲烷排放速率相对较低,特别是在 12:00~16:00 的甲烷高排放时段,稻草表施比稻草翻施的甲烷排放速率平均降低了 15.3%,而其他时段仅平均降低 9.4%。所以稻草表施的甲烷减排效果主要表现在一天中甲烷排放速率峰值区域。

### 2.4 稻田甲烷排放速率与土壤水溶解甲烷的关系

稻田甲烷排放速率的大小直接与稻田耕层土壤水溶解甲烷含量有关,溶解甲烷含量一般与甲烷排放量呈正比。受水稻最高分蘖期田间搁田的影响,稻田土壤水溶解甲烷含量变化较大,于水稻移栽后 2 周左右形成高峰,与稻田甲烷排放速率的高峰出现时间基本一致。在移栽后 3~8 周各土层中土壤水溶解甲烷含量相对稳定(图 2)。

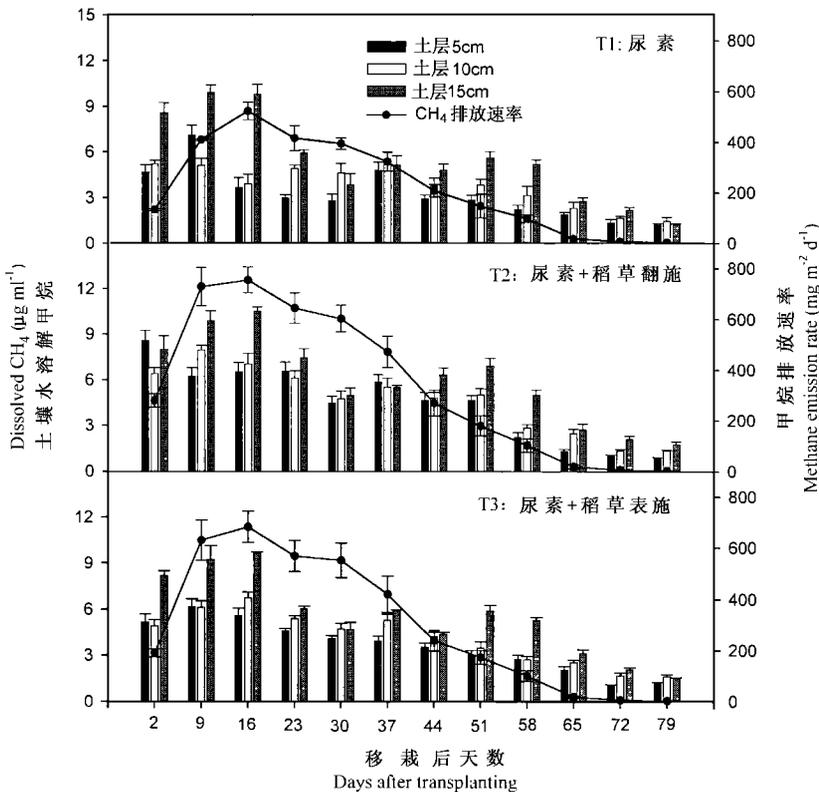


图 2 稻田各土层土壤水溶解甲烷含量与甲烷排放速率动态变化

Fig. 2 Seasonal variations of methane emission rate and dissolved methane content in soil water at different soil depths

稻田各土层中土壤水溶解甲烷含量差异较大, 并呈现出土壤水溶解甲烷含量随土层深度的增加而增加的特点。稻草翻施(T2)使各土层的土壤水溶解甲烷含量显著增高, 土层 5、10、15cm 处的水溶解甲烷含量分别比尿素处理(T1) 平均增加 1.25、0.84 和  $0.49\mu\text{g ml}^{-1}$ , 提高了 38.1、21.9 和 9.2%; 而稻草表施(T3), 可明显地降低水溶解甲烷增加值, 其土层 5、10、15cm 处水溶解甲烷含量比 T1 仅分别提高 9.7、7.2 和 2.4%。因此, 采用稻草表施的方式可显著降低由施用稻草所造成的稻田耕层土壤, 尤其是表层土壤中水溶解甲烷含量的增加值, 达到较好的甲烷减排效果。

### 3 结 论

(1) 晚稻稻田的甲烷排放呈现出前高后低的特点, 水稻移栽两周后稻田甲烷排放速率即可达到最高值。(2) 水稻分蘖期(0~30 天)的稻田甲烷排放量占水稻全生育期总排放量的 65.6%, 施用稻草使这一比例进一步加大。(3) 土壤 5cm 处温度的昼夜周期性变化与稻田甲烷排放的昼夜周期性变化具有高度相关。(4) 土壤水溶解甲烷含量随土层深度的增加而增加。(5) 稻草表施与稻草翻施比较: 稻草表施明显降低水稻分蘖期的甲烷排放速率, 使稻田甲烷总排放量降低 11.34%; 稻草表施的甲烷减排效果主要表现在一天中的峰值区域, 即 12:00~16:00; 稻草表施可明显降低稻田耕层土壤水溶解甲烷含量。因此改进稻田的稻草施用方法, 采用稻草表施对甲烷减排具有重要的意义。

### 参 考 文 献

1. IPCG Intergovernmental panel on climate change. Climate change 1995. In: The Science of Climate Change. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 1996. 572
2. Lelieveld J, Crutzen P J, Bruhl C. Climate effects of atmospheric methane. *Chemosphere*, 1993, 26: 739~ 768
3. United States Environmental Protection Agency. Greenhouse Gas Emissions from Agriculture. Office of Policy Analysis, US EPA, Washington D C, 1990. 1
4. Lelieveld J, Crutzen P J, Bruhl C. Climate effects of atmospheric methane. *Chemosphere*, 1993, 26: 739~ 768
5. Sass R L, Fisher F M, Turner F T, Yund M F. Methane emission from rice fields as influenced by solar radiation, temperature, and straw incorporation. *Global Biogeochem. Cycles*, 1991, 5(4): 335~ 350
6. Takai Y. The mechanism of methane fermentation in flooded paddy soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1970, 16: 238~ 244
7. Patrick Jr W H, Reddy C N. Chemical changes in rice soils. In: International Rice Research Institute. eds. Soil and Rice. Philippines: IRRI Press, 1978. 361~ 380
8. IRRI. IRRI studies role of rice field methane in global climate change. The IRRI Report, 1991, 4: 1~ 2
9. 颜晓元, 蔡祖聪. 淹水土壤中甲烷产生的影响因素研究进展. *环境科学进展*, 1996, 4(2): 24~ 32
10. Yagi K, Minami K. Effects of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy field. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, 36(4): 599~ 610
11. 谢小立, 王卫东, 上官行健. 施肥对稻田甲烷排放的影响. *农村生态环境(学报)*, 1995, 11(1): 10~ 14
12. 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化输送机理. *大气科学*, 1998, 22(4): 600~ 612
13. 陈苇, 郭望模, 卢婉芳等. 灌溉与绿肥对稻田土壤甲烷释放能力的影响. *中国水稻科学*, 1997, 11(1): 39~ 43
14. 陶战, 杜道灯, 周毅. 稻田施用沼渣对甲烷排放通量的影响. *农村生态环境(学报)*, 1994, 10(3): 1~ 5
15. 段彬伍, 卢婉芳等. 植稻杂交稻对甲烷排放的影响及评价. *中国环境科学*, 1999, 19(5): 397~ 401

## EFFECT OF RICE STRAW MANURE ON METHANE EMISSION IN LATE RICE PADDY FIELDS

Chen Wei Lu Warr fang Duan Birr wu

(*China National Rice Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310006*)

R. Wassmann R. S. Lantin

(*International Rice Research Institute, PO Box 933, 1099 Manila, Philippines*)

### Summary

Methane emission in the late rice paddy field is characterized by a declining trend with growth of the rice and a positive relationship between daily emission rate and air temperature. Application of rice straw in soil (ARSS) could increase methane emission by 51.11%, and application of rice straw on soil surface (ARSSS) only by 33.98%. The rice tillering stage is a peak period for methane emission. At this stage, the methane emitted amounted to 65.6% of the total emitted throughout the whole growth stage of rice. Applying rice straw could increase the proportion of methane emitted at the rice tillering stage. Compared with ARSS, ARSSS decreased methane emission more significantly in the rice tillering stage and at daily peak emission time of 12:00~16:00. The diurnal change in soil temperature at 5 cm depth was highly related with content of methane dissolved in the soil water. ARSSS could remarkably reduce the content compared with ARSS in the layer of cultivated soil of paddy field.

**Key words** Rice, Rice straw manure, Methane emission, Water soluble methane