

## I. 产生和排放机理及其影响因子

任万辉<sup>1,2</sup> 许黎<sup>2</sup> 王振会<sup>1</sup>

(1. 南京气象学院 电子工程系, 210044; 2. 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室)

## 提 要

综合论述了近 20 年来中国稻田甲烷排放的研究状况, 包括中国稻田甲烷排放通量的观测, 稻田甲烷生成的生物学机理及产生、转化、传输的机理研究, 稻田甲烷排放的影响因子, 主要介绍了稻田甲烷产生和氧化过程、影响甲烷排放的因子。

关键词: 稻田 甲烷产生和氧化 影响因子

## 引 言

甲烷( $\text{CH}_4$ )是大气中重要的温室气体之一, 它对全球变暖的贡献在主要温室气体中排第二位(占 20%), 仅次于二氧化碳(占 60%)<sup>[1]</sup>。研究表明, 在过去 42 万年中,  $\text{CH}_4$  浓度一直保持在 350~750ppbv, 只是到了近二百年才出现了大幅度的上升<sup>[2]</sup>。目前全球大气中  $\text{CH}_4$  的平均浓度为 1745ppbv, 年增长率为 7.0 ppbv<sup>[1]</sup>。 $\text{CH}_4$  在大气中能稳定存在, 且寿命也比较长, 它最主要的汇是被 OH 自由基氧化, 最终生成二氧化碳和水。因此, 近年来  $\text{CH}_4$  的排放问题受到特别的关注。

$\text{CH}_4$  是大气中含量丰富的有机气体, 它主要来自于稻田、天然沼泽、白蚁、天然气泄漏、反刍动物、城市垃圾处理场等<sup>[3]</sup>。稻田是全球大气  $\text{CH}_4$  的主要人为排放源之一, 也是过去 100 多年里大气  $\text{CH}_4$  浓度增加的重要原因之一。中国的水稻种植面积约占世界水稻种植面积的 22%, 水稻产量约占全球的 37%, 无疑中国稻田  $\text{CH}_4$  排放在全球稻田  $\text{CH}_4$  排放中占有十分重要的地位。本文综合分析了近年来中国稻田  $\text{CH}_4$  排放的研究进展, 包括我国稻田  $\text{CH}_4$  排放通量的观测研

究, 稻田  $\text{CH}_4$  生成的生物学机理及产生、转化、传输的机理研究, 稻田  $\text{CH}_4$  排放的影响因子。

## 1 我国稻田甲烷排放通量的观测研究

不同水稻种植区的气候、土壤条件各不相同, 水稻品种、耕作制度也有相当大的差异。根据不同自然生态条件和社会经济条件, 在大量资料、研究调查和实地考察的基础上, 我国科学家将水稻田分为 6 个稻作区<sup>[4]</sup>: 华南双季稻稻作区、华中双季稻稻作区、西南高原单双季稻稻作区、华北单季稻稻作区、东北单季稻稻作区、西北干燥区单季稻稻作区。从稻田种植面积省级的统计数据来看, 90% 以上的水稻种植在中国南部, 只有 7% 左右的水稻种植在北方水稻区<sup>[5]</sup>。

我国对于稻田  $\text{CH}_4$  排放的研究开始于 20 世纪 80 年代。自 1987 年起, 中国科学院大气物理研究所与德国夫琅和费大气物理环境研究所合作使用自动连续观测系统, 在我国杭州进行了亚太地区稻田  $\text{CH}_4$  排放通量的首次观测, 接着又在四川、湖南、广州、苏州等地开展了一系列系统的实验观测<sup>[4]</sup>。至今我国已经先后在广东清远、广州, 浙江杭州、

① 中国气象局 IPCC 专项经费和气象中心拓展项目“气象系统碳循环观测系统设计与研究”联合资助。

富阳,江苏吴县、无锡和南京,江西鹰潭,湖南桃源、长沙,四川乐山、成都,重庆,天津,北京,沈阳等地进行了稻田  $\text{CH}_4$  排放的观测研究。

对于稻田  $\text{CH}_4$  排放的观测方法主要是静态箱/气相色谱法(一般采用氢焰离子气相色谱仪进行分析)。静态箱法又分为人工采样和微机控制自动采样。静态箱法是目前国内外广泛使用的比较经济而可靠的观测通量的方法,单点测量精度较高<sup>[6]</sup>。另外,有些学者还进行了微气象学法测定稻田  $\text{CH}_4$  排放通量的研究,微气象学法避免了箱法的局限性,但它对地表的均匀性和大气状态的要求很高,而且分析仪器(可调谐二极管激光红外吸收光谱仪)价格比较昂贵。

## 2 稻田甲烷生成的生物学机理及产生、转化、传输的机理研究

### 2.1 稻田甲烷生成的生物学机理

从生物学角度看,水稻田  $\text{CH}_4$  的释放量,是由产  $\text{CH}_4$  菌利用田间植株根系际部的有机物质转化形成  $\text{CH}_4$  的量,除去水稻根系际部  $\text{CH}_4$  氧化菌对  $\text{CH}_4$  氧化后的剩余量。稻田  $\text{CH}_4$  释放量取决于水稻根系际部产  $\text{CH}_4$  菌的数量及其活性和  $\text{CH}_4$  氧化菌数量和活性<sup>[7]</sup>。研究发现,稻田产  $\text{CH}_4$  菌的种类主要为甲烷杆菌属(*Methanobacterium*)和甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)<sup>[8]</sup>。陈美慈<sup>[9]</sup>等进一步研究认为,水稻田中占优势的产  $\text{CH}_4$  菌种群为甲酸甲烷杆菌(*Methanobacterium formicicum*)、马氏甲烷八叠球菌(*Methanosarcina mazei*)和巴氏甲烷八叠球菌(*Methanosarcina barkeri*)等。

### 2.2 稻田甲烷产生、转化、传输的机理研究

稻田  $\text{CH}_4$  的排放是由稻田土壤中  $\text{CH}_4$  的产生、转化以及传输共同作用的结果。从理论上讲,土壤中  $\text{CH}_4$  的产生受土壤理化性质、施肥、灌溉、水稻生长和气候等因素的影响。 $\text{CH}_4$  氧化过程受植物体生长状态、施肥、土壤性质、灌溉和土壤水分状况及气候因子

的影响。土壤中产生的  $\text{CH}_4$  在输送到地面大气之前,大部分已被氧化,只有较少一部分能够排放到大气中去<sup>[4]</sup>。

#### 2.2.1 稻田甲烷的产生

水稻是在水层覆盖土壤的田里生长,其生长期在缺氧的环境下不断生成  $\text{CH}_4$ 。稻田中  $\text{CH}_4$  的产生主要是  $\text{CO}_2/\text{H}_2$  及乙酸( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )这两种基质在厌氧状态下(氧化还原电位  $Eh \leq -300\text{mV}$ )被产  $\text{CH}_4$  菌利用还原而转化生成的<sup>[10]</sup>:

$$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{A} \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{A} \quad \text{厌氧环境下,二氧化碳还原反应}$$

$$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2 \quad \text{厌氧环境下,乙酸甲基转移反应}$$

但是在不同的土壤中,这两种基质对  $\text{CH}_4$  产生的贡献并不确定,这主要取决于不同稻田土壤中微生物菌族的差异,有些  $\text{CH}_4$  菌喜欢乙酸盐而有些更偏爱  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$ ,另外分解复杂有机物质的菌族的不同以及土壤中有机物种类不同也会引起  $\text{CO}_2/\text{H}_2$  以及乙酸盐来源及含量差异<sup>[11]</sup>。

上官行健等通过对我国湖南地区和意大利稻田土壤中  $\text{CH}_4$  产生率的实地测量,认为土壤各深度的  $\text{CH}_4$  产生率有很大的变化范围( $1 \sim 4639\text{ng} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ),主要产  $\text{CH}_4$  的区域在稻田土壤耕作层的还原层( $2 \sim 20\text{cm}$ ),但不同的农业耕作对此有较大的影响,意大利稻田中  $7 \sim 17\text{cm}$  土壤层是重要的  $\text{CH}_4$  产生区域,  $13\text{cm}$  处的  $\text{CH}_4$  产生率最大,而我国湖南由于特殊的有机肥铺施操作,主要产  $\text{CH}_4$  区域在土壤上部即耕作层的氧化层( $3 \sim 7\text{cm}$ )<sup>[12,13]</sup>。

#### 2.2.2 稻田甲烷的氧化

一些观测表明, $\text{CH}_4$  排放量占  $\text{CH}_4$  产生量的  $3\% \sim 81\%$ ,剩余的大部分在输入大气前被氧化<sup>[5]</sup>。 $\text{CH}_4$  可以在有氧和厌氧环境下被氧化,但是在土壤中  $\text{CH}_4$  的最主要氧化过程还是有氧氧化,而且主要发生在水稻根际及土壤与灌溉水交界面这两个区域<sup>[4]</sup>。在预

培养的水稻土中,氧气的混合比高于1%~3%时, $\text{CH}_4$ 的氧化对氧气混合比的变化不敏感,而氧气的混合比低于该值时, $\text{CH}_4$ 的氧化率迅速下降并接近于零<sup>[5]</sup>。

土壤中的分子氧在淹水后很快被消耗,空气中的氧气通过呼吸作用经通气组织到达植物的根部,在淹水稻田中只在水土交界面薄薄的氧化层土壤中和植物体的根部氧化膜存在氧气,因此在淹水稻田中 $\text{CH}_4$ 的氧化只能发生在土壤表层的有氧层和根围的氧化膜<sup>[5]</sup>。

目前对于稻田 $\text{CH}_4$ 氧化率的观测实验很少。日本的稻田实验结果表明,氧化率最大值在土壤表层(0~1cm),深层土壤比表层土少约58%<sup>[14]</sup>。另外,还有许多因子影响 $\text{CH}_4$ 的氧化,如土壤渗透率、土壤湿度和温度等。 $\text{CH}_4$ 的氧化消耗与土壤渗透性有极大的关系<sup>[5]</sup>。

### 2.2.3 稻田甲烷的传输

当土壤中的 $\text{CH}_4$ 积累到一定的数量,并且 $\text{CH}_4$ 在土壤及传输途径中较少的被氧化,又有较通畅的传输途径时,才有大量的 $\text{CH}_4$ 被排放<sup>[5]</sup>。土壤中产生的 $\text{CH}_4$ 通过三种途径向大气排放:一是植物体内的通气组织,二是稻田水面冒气泡,三是水中分子液相扩散<sup>[4]</sup>。实验表明,在一般的水稻田中,水稻植物体的输送是最主要的途径。

## 3 稻田甲烷排放的影响因子

我国对稻田 $\text{CH}_4$ 排放影响因子的研究较多,综合现有的文献,稻田 $\text{CH}_4$ 排放受土壤、气候、农田管理、水稻品种等因素的影响。而且这些因子之间还存在着复杂的交互影响。

### 3.1 土壤因子

#### 3.1.1 土壤有机质

土壤中可分解的有机质被分解形成乙酸和二氧化碳等小分子化合物,然后被产 $\text{CH}_4$ 菌利用生成 $\text{CH}_4$ 。可溶性有机质是 $\text{CH}_4$ 产生的主要基质。目前,很多研究已经证明,淹

水稻田中有机质的补给促进 $\text{CH}_4$ 的形成和排放<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.2 土壤中的化学物质

稻田灌水后,一般来说土壤中各成分还原是有顺序的,而还原的先后比如土壤中 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等物质的存在能够直接影响产 $\text{CH}_4$ 过程所需的时间及 $\text{CH}_4$ 生成量,还能够影响土壤pH值<sup>[15]</sup>。

#### 3.1.3 土壤酸碱度(pH)

酸碱度是影响微生物代谢过程的重要因素。土壤酸碱度主要从三个方面影响最终 $\text{CH}_4$ 的排放<sup>[4]</sup>:(1)有机质的分解过程;(2) $\text{CH}_4$ 的产生过程;(3) $\text{CH}_4$ 的氧化过程。产 $\text{CH}_4$ 菌在中性及弱碱性土壤中比较活跃<sup>[15]</sup>。

#### 3.1.4 土壤氧化还原电位(Eh)

$\text{CH}_4$ 的生成需要很低的Eh。在水稻田灌水后,土壤Eh随着氧气的耗损而不断下降,产 $\text{CH}_4$ 菌必须在Eh达到-150~-190mV的环境中才能产生 $\text{CH}_4$ 。徐华等研究认为土壤Eh是影响土壤 $\text{CH}_4$ 排放量的最重要因素之一<sup>[16]</sup>。

#### 3.1.5 土壤类型

不同类型的土壤有不同的物理化学和生物学特性。Neue等人(1990)报道,新成土、有机土、淋溶土、变性土和松软土的稻田比较容易产生 $\text{CH}_4$ ;Yagi和Minami(1990)指出日本稻田泥灰土、冲积土和火山灰土所排放的 $\text{CH}_4$ 依次递减,并有量级之差,泥灰土稻田可以是火山灰土稻田的40倍。可见,稻田 $\text{CH}_4$ 的生成与土壤类型的关系密切,而且时空变异性较大<sup>[4]</sup>。

### 3.2 温度

温度,尤其是土壤温度在 $\text{CH}_4$ 产生与排放中起着非常重要的作用<sup>[4]</sup>。土壤的温度随着气温的变化而变化,而且还受土壤类型、灌溉水和水稻生长期的影响。Schutz<sup>[17]</sup>等研究表明, $\text{CH}_4$ 排放率的季节变化与土壤温度相关性较差,而其日变化则与特定深度的土壤

温度有较大的相关性。

国内外研究者在很多田间和实验室实验的基础上提出了土壤温度与土壤中  $\text{CH}_4$  产生率满足阿伦尼乌斯 (Arrhenius) 方程<sup>[18~20]</sup>:

$$\ln P = -(E_a/R)(1/T) + \text{常数}$$

式中  $P$  为产生率,  $E_a$  为表观活化能,  $R$  是气体常数,  $T$  是土壤温度(K),  $T < 323\text{K}$  时,  $E_a$  为  $60\sim 90\text{ kJ/mol CH}_4$ 。

### 3.3 农业管理措施

#### 3.3.1 施肥

关于施肥对稻田  $\text{CH}_4$  排放的影响在 1981 年就有报道<sup>[21]</sup>, 目前国内有关施肥对稻田  $\text{CH}_4$  排放的研究较多<sup>[1,15,22~25]</sup>。这些研究都表明, 施用有机肥可以增加  $\text{CH}_4$  的排放, 但是化肥的影响不确定, 其作用取决于所施肥料的质量、数量和施用方法。

有机肥的施用能提高  $\text{CH}_4$  的排放, 主要是有机肥的施用会给水稻田土壤的产  $\text{CH}_4$  微生物提供理想的丰富基质<sup>[8]</sup>。而经过沼气池发酵以后的沼渣肥能够有效地减少  $\text{CH}_4$  的产生和排放, 这是因为有机碳在沼气池中被部分或全部分解了。

化肥的施用对稻田  $\text{CH}_4$  排放量的影响有很多的报道, 但是结果却不一致。一方面认为, 硫酸盐等化肥的施用能提高土壤的 Eh, 与产  $\text{CH}_4$  菌竞争生长并产生对产  $\text{CH}_4$  菌有毒害作用的气体, 从而降低  $\text{CH}_4$  的排放。而另一方面, 尿素等化肥的施用可通过促进植物生长和光合作用来增加植物根系的分泌物, 提供产  $\text{CH}_4$  基质, 增加稻田  $\text{CH}_4$  排放<sup>[26,8,24]</sup>。但是也有研究认为尿素对  $\text{CH}_4$  排放无影响或者减少  $\text{CH}_4$  的排放<sup>[27,15]</sup>。从上述可见, 化肥对淹水稻田  $\text{CH}_4$  生成的影响还存在很多不确定因素, 有待进一步研究。

#### 3.3.2 水管理

水分对土壤中  $\text{CH}_4$  的产生起着决定性作用, 因为  $\text{CH}_4$  产生所需的厌氧环境在很大程度上决定于土壤水分状况。一般而言, 土

壤中  $\text{CH}_4$  的产生随着水分含量的增加而增加。因此, 稻田的水管理在很大程度上影响着  $\text{CH}_4$  的排放。国内外关于这方面的报道也很多<sup>[5,15,20,22,28~31]</sup>。这些研究表明, 长期淹水的稻田  $\text{CH}_4$  排放显著高于常规水分管理, 淹水造就了产  $\text{CH}_4$  菌生存的厌氧环境; 间歇灌溉可以减少  $\text{CH}_4$  的排放, 这是因为间歇灌溉可以使土壤接触空气, 有利于提高土壤的 Eh, 不利于产  $\text{CH}_4$  菌的活动, 从而抑制  $\text{CH}_4$  的生成。

#### 3.4 水稻品种

不同水稻品种的  $\text{CH}_4$  排放存在很大的差别, 国内外有很多报道。邵可声观测了 4 个水稻品种的稻田  $\text{CH}_4$  排放量, 发现品种间的  $\text{CH}_4$  排放量差异很大<sup>[32]</sup>。Huang 等研究认为, 水稻品种造成的  $\text{CH}_4$  排放差别与水稻的地上和地下生物量无关<sup>[33]</sup>。但是, 任丽新等研究发现, 根系小, 茎、叶相对较轻又能高产的水稻品种, 能减少  $\text{CH}_4$  的排放<sup>[34]</sup>。因此, 水稻品种的基因型、生理学和生态学特性与  $\text{CH}_4$  形成之间的定量和定性关系还有待于进一步探索<sup>[4]</sup>。

### 参考文献

- 1 IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis, J. T. Houghton, Y. Ding et al., (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001: 38—41.
- 2 Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, 399: 429—436.
- 3 王明星, 张仁健, 郑循华. 温室气体的源与汇. 气候与环境研究, 2000, 5(1): 75—79.
- 4 王明星. 中国稻田甲烷排放. 北京: 科学出版社, 2001.
- 5 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.
- 6 Wassmann, R. Neue, H. U. et al. Temporal patterns of methane emissions from rice fields treated by different modes of N application. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 16457—16462.
- 7 陈中云, 闵航, 陈美慈等. 不同水稻土甲烷氧化菌和产甲烷菌数量与甲烷排放量之间相关性的研究. *生态学报*, 2001, 21(9): 1498—1505.
- 8 闵航, 陈美慈, 钱泽澍. 水稻田的甲烷释放及其生物学机

- 理. 土壤学报, 1993, 30(2): 125~130.
- 9 陈美慈, 闵航, 钱泽澍. 水稻田中产甲烷菌数量和优势种. 土壤学报, 1993, 30(4): 432~437.
- 10 Takai Y. The mechanism of methane formation in flooded paddy soil. *Soil Sci. and Plant Nutr.*, 1970, 16: 238~244.
- 11 王明星. 大气化学. 北京: 气象出版社, 1999: 107.
- 12 上官行健, 王明星, R. Wassmann 等. 稻田土壤中 CH<sub>4</sub> 产生率的实验研究. 大气科学, 1993, 17(5): 604~610.
- 13 上官行健, 王明星, 陈德章等. 稻田土壤中的 CH<sub>4</sub> 产生. 地球科学进展, 1993, 8(5): 1~12.
- 14 Yagi, K., Kumagai, K., Tsuruta, H. and Minami, K.. Emission, production, and oxidation of methane in a Japanese paddy field. *Adv. Soil. Sci, Soils and Global Change*, eds. R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B. A. Stewart, Lewis Publishers, 1995, 231~243.
- 15 上官行健, 王明星. 稻田甲烷排放影响因子的研究进展. 中国农业气象, 1993, 14(4): 48~53.
- 16 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. 农业环境保护, 1999, 18(4): 145~149.
- 17 Schutz H, Holzapfel-Pschom A, Conrad R, et al. A 3-year continuous record on the influence of daytime season and fertilizer Treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy [J]. *Geophys Res*, 1989, 94(16): 16405~16416.
- 18 Schutz H, H, Seiler W, and Conrad R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. *Biogeochemistry*, 1990, 11: 77~95.
- 19 Sass R. L., Fisher F. T. and Jund M. F. Methane emission from rice fields as influenced by solar radiation, temperature and straw incorporation. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5: 335~350.
- 20 Khalil M. A. K., Rasmussen R. A., Shearer M. J., et al. Factors affecting methane emission from rice fields. *J. G. R.*, 1998, 103: 25219~25231.
- 21 Cicerone R. J and Shetter J. D.. Sources of atmospheric methane: Measurements in rice paddies and a discussion. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86: 7203~7209.
- 22 陈宗良, 高金和, 袁怡. 不同农业管理方式对北京地区稻田甲烷排放的影响研究. 环境科学研究, 1992, 5(4): 1~7.
- 23 邵可声. 稻田甲烷排放通量与农业管理措施的关系. 农村生态环境, 1993, 9(增): 19~22.
- 24 谢小立, 王卫东, 上官行健等. 施肥对稻田甲烷的影响. 农村生态环境, 1995, 11(1): 10~14.
- 25 陈德章, 王明星. 稻田甲烷排放和土壤、大气条件的关系. 地球科学进展, 1993, 8(5): 37~46.
- 26 李德波, 张纪伍等. 不同农业措施对稻田甲烷排放通量的影响. 农村生态环境, 1993, 9(增): 13~18.
- 27 上官行健, 王明星. 稻田甲烷排放的控制措施. 地球科学进展, 8(5): 55~62.
- 28 卢维盛, 张建国, 廖宗文等. 不同水分管理及耕作制度对广州地区稻田甲烷排放的影响. 华南农业大学学报, 1997, 18(3): 57~61.
- 29 蔡祖聪, 徐华, 卢维盛等. 冬季水分管理方式对稻田甲烷排放量的影响. 应用生态学报, 1998, 9(2): 171~175.
- 30 卢维盛, 廖宗文, 张建国等. 不同水旱轮作方式对稻田甲烷排放影响的研究. 农业环境保护, 1999, 18(5): 200~202.
- 31 上官行健, 王明星, 沈壬兴. 稻田甲烷的排放规律. 地球科学进展, 1993, 8(5): 23~36.
- 32 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. 北京大学学报, 1996, 32(4): 46~59.
- 33 Huang Y., Sass R. L. and Fisher F. M.. Methane emission from Texas rice paddy soils. 2. Seasonal contribution of rice biomass production to CH<sub>4</sub> emission. *Global Change Biology*, 1997, 3: 491~500.
- 34 任丽新, 王庚辰, 张仁健等. 成都平原稻田甲烷排放的实验研究. 大气科学, 2002, 26(6): 731~743.

## A Review on Study of Methane Emission from Rice Field in China I. Mechanism and Affecting Factors

Ren Wanhui<sup>1,2</sup> Xu Li<sup>2</sup> Wang Zhenhui<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Nanjing Institute of Meteorology, 210044; 2. National Climate Center,)

### Abstract

A review is made on methane emission study from rice fields in China for more than 20 years. It includes the observation of methane emission flux from rice paddy fields; the biological mechanism of methane production and the study of mechanism of methane production, oxidation, transportation in the rice fields; and the factors affecting methane emission. Methane production and oxidation, the factors affecting methane emission are introduced, especially.

**Key Words:** rice field methane production and oxidation affecting factors