

## II. 模式研究和减排措施

任万辉<sup>1,2</sup> 许黎<sup>1</sup> 王振会<sup>2</sup> M.A.K.Khalil<sup>3</sup> R.A.Rasmussen<sup>4</sup>

(1. 中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081; 2. 南京气象学院 电子工程系;  
3. Department of Physics, Portland State University, P.O. Box 751, Portland, Oregon 97207,  
USA.; 4. Department of Environmental Science & Engineering, Oregon Graduate Institute,  
20000 N.W. Walker Rd., Beaverton, Oregon 97006, USA.)

## 提 要

主要介绍了近 20 年来稻田甲烷排放的模式研究和排放量的估算以及减少稻田甲烷排放的措施。数值模式是估算稻田甲烷排放量的一条有效途径,模式的研究现在正处于发展阶段。介绍了几个主要的模型,既有物理过程模型也有经验模型。年排放量的估算范围为 6.79~41.4Tg,随着技术的发展和大量实验的进行估算值的精度正得到不断的提高。减排措施是减少稻田甲烷排放的必要手段,但是目前的减排技术均处于研究阶段,应用还不成熟。

**关键词:** 稻田 甲烷排放 排放模式 减排措施

## 引 言

对于稻田生态系统甲烷( $\text{CH}_4$ )的排放,世界各国的科学家在不同地区已经进行了多年的测量和研究工作,获得了宝贵的第一手资料,同时也对稻田  $\text{CH}_4$  排放的机理有了较清楚的认识,取得了很大的进展。虽然稻田  $\text{CH}_4$  排放的测量已布设了很多的观测点,耗费了大量的人力和物力,但由于中国水稻种植分布很广,不同地区有不同的气候、水稻品种和土壤条件,农田管理也相差很大,仅靠有限个点的排放通量很难准确估算整个稻田生态系统  $\text{CH}_4$  的排放量。如何准确地估算稻田  $\text{CH}_4$  的排放量,并有效地控制  $\text{CH}_4$  的排放便成了重点的研究课题之一。为此,许多科学家对稻田  $\text{CH}_4$  排放进行了数值模式的研究,模式融入了气象、土壤理化特性、田间管理等因子,为准确估算稻田  $\text{CH}_4$  排放量提供

了一条重要的途径。许多科学家在进行稻田  $\text{CH}_4$  排放通量观测和模式开发的同时,也对稻田  $\text{CH}_4$  的减排方法进行了大量的测量和研究,提出了一些减少稻田  $\text{CH}_4$  排放的措施。

前文主要介绍了稻田  $\text{CH}_4$  产生和排放的机理研究以及影响因子,本文则主要从稻田  $\text{CH}_4$  排放的模式研究和排放量的估算,以及减少稻田  $\text{CH}_4$  排放的措施两个方面来叙述近 20 年来我国稻田  $\text{CH}_4$  排放的研究状况。

## 1 我国稻田甲烷排放的模式研究和排放量的估算

## 1.1 模式研究

由于稻田  $\text{CH}_4$  排放的影响因子之间相互作用的复杂性,区域气候的差异性,使得稻田  $\text{CH}_4$  排放率的时空变化很大,要在每一个

① 项目资助,美国能源部(DE-FG03-01ER63262);中国气象局气候研究开放实验室开放课题

水稻生长地都开展测量是不可能的。因此,最可行的方法是基于稻田  $\text{CH}_4$  产生、氧化和传输的机理研究与实验研究建立一个能模拟水稻-土壤生态系统  $\text{CH}_4$  生成、排放的预测模式,在模式中输入当地的气象要素(气温、降水、辐射等)、土壤(土壤类型、质地、有机质含量等)和田间管理(水稻品种、施肥、灌溉等)因子,然后模型模拟水稻的生长以及伴随的新陈代谢过程,土壤中有机质的分解过程,  $\text{CH}_4$  的产生、氧化和排放过程,通过这些过程的模拟可以得到  $\text{CH}_4$  的排放通量和总的排放量。

从1994年起我国陆续有几个简单的模式建立,丁爱菊和王明星(1995)建立了体现天气条件、土壤和田间管理对  $\text{CH}_4$  排放影响的稻田  $\text{CH}_4$  排放的初级模式<sup>[1]</sup>。模式主要包括三个部分:水稻的生长、土壤有机物的分解和  $\text{CH}_4$  的产生、传输及排放过程。该模式是一个区域尺度稻田  $\text{CH}_4$  排放的生物物理过程模型,它能较好的体现不同天气条件和土壤有机物含量对稻田  $\text{CH}_4$  排放的影响,但是该模式对气泡的形成及传输过程作了简化处理<sup>[1]</sup>。丁爱菊分别利用1988年杭州气象站的气象资料和1992年湖南常德的气象资料对早稻和晚稻进行了  $\text{CH}_4$  排放的模拟,模拟结果与实测结果比较接近,模式对平均排放量的估计偏差在10%左右<sup>[1]</sup>。

曹明奎等根据水稻生产和土壤有机质分解可以提供产  $\text{CH}_4$  菌所需的含碳物质,以及环境因子对  $\text{CH}_4$  产生的影响,建立了一个稻田  $\text{CH}_4$  排放的模式<sup>[2]</sup>。模式主要模拟  $\text{CH}_4$  的产生,考虑了土壤有机质分解和水稻植株有机质分解这两个主要的有机质来源,同时也利用半经验公式考虑了土壤氧化还原电位(Eh)、酸碱度(pH),稻田淹水和施肥对  $\text{CH}_4$  产生的影响<sup>[2]</sup>。

黄耀等通过研究  $\text{CH}_4$  的排放过程,建立了一个半经验模式,主要描述了水稻植株对  $\text{CH}_4$  产生、氧化和排放过程的影响和一些环境因子对整个过程的影响<sup>[3]</sup>。模型假设  $\text{CH}_4$  产生的基质主要有水稻植株分离的和加入的

有机质两个来源。土壤中  $\text{CH}_4$  的产生率是含  $\text{CH}_4$  基质的数量和环境因子影响的结果,水稻的生长发育情况是控制  $\text{CH}_4$  排放的系数,  $\text{CH}_4$  从土壤传输到空气中的量是由产率和排放系数决定的<sup>[3]</sup>。此模式是一种半经验模式,在特定的区域的模拟效果较好,但是参数是以实验为基础建立的,在应用上有一定的限制。

另外,2000年刘建栋和周秀骥等在美国DNDC(Denitrification and decomposition)模式基础上,综合气象学、农业气象学及生态学最新研究进展,将作物生长、碳氮循环和  $\text{CH}_4$  排放有机耦合,建立了一个  $\text{CH}_4$  排放数值模式,并利用模式揭示了气象因子对  $\text{CH}_4$  排放的影响<sup>[4]</sup>。此模式尽可能地考虑了较多的对稻田  $\text{CH}_4$  排放产生重要影响的因子,具有较强的机理,实验验证该模式的模拟误差在15%左右,具有较高的准确度。

丁爱菊和王明星利用开发的稻田  $\text{CH}_4$  排放模式输入气象以及相关的耕作数据计算出1990年中国稻田  $\text{CH}_4$  的排放量为9.67~12.66Tg<sup>[5]</sup>,黄耀应用1994年及1995年的数据资料模拟出我国稻田  $\text{CH}_4$  的年排放量为5.89~11.17Tg<sup>[6]</sup>。

## 1.2 稻田甲烷排放量的估算

对于稻田  $\text{CH}_4$  排放量的估算有很多方法,其中主要有:(1)根据田间直接测定的  $\text{CH}_4$  排放通量和该通量代表的稻田面积计算;(2)通过水稻净初级生产率(NPP)来估算(折算系数一般为5%);(3)根据投入到土壤中的有机碳量折算(换算系数为30%)或根据土壤有机质碳含量折算;(4)根据  $\text{CH}_4$  排放模式计算,例如上文中丁爱菊的排放模式和黄耀的半经验模型。

中国是水稻生产大国,水稻种植面积约占全球水稻播种面积的1/4,因此,中国稻田在世界稻田  $\text{CH}_4$  排放中扮有非常重要的角色,准确估算中国稻田  $\text{CH}_4$  排放量对估算全球稻田  $\text{CH}_4$  排放量具有非常重要的意义。国内外学者对中国稻田  $\text{CH}_4$  排放量的估算进行了很多研究<sup>[7-14]</sup>,表1给出了不同作者

表1 中国稻田 CH<sub>4</sub> 排放估算<sup>[5]</sup>

参考文献	年排放量/Tg	估算方法
Khalil et al., 1991	30	依据四川两年的观测数据
Khalil et al., 1993	16	用4个不同的排放系数,农业统计年鉴的稻田面积,考虑了化肥的施用量增加,有机肥施用量的减少
	23	同上,不考虑化肥的施用量
Khalil and Shearer, 1994	21.4	发表数据的平均通量,中国农业统计年鉴水管理和温度
吴海宝, 1993	7.02	根据物质平衡原理,提出估算 CH <sub>4</sub> 排放量的公式
	21.6	0.5 g CH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> ·day,并用了 Matthews (1991) 等的作物日历水稻种植面积
Bachelet and Neue, 1993	13.46	NPP的5%, Matthews的种植面积,用降水量和温度模式模拟
	21.32	添加的有机碳量的30%, Matthews的种植面积
	14.71	同上,但依据土壤类型进行了调整
Bachelet et al., 1995	6.79	NPP的5%,年平均温度和降水量,美国农业部(USDA)1989年水稻面积
	16	碳输入的30%, USDA1989年的水稻面积
	10.47	碳、氮输入和温度对 CH <sub>4</sub> 的回归, USDA1989年的水稻面积
Lin, 1993	11.3	北京附近5个排放通量和中国农业统计年鉴的水稻面积
Wang et al., 1993, 1994	15	5个不同地区的排放通量和中国农业统计年鉴的水稻面积
Wang et al., 1996	9.7 ~ 12.7	考虑了地区性的土壤、水稻品种、施肥、水管理和气候等排放因子利用模式计算,农业统计年鉴的稻田面积
Kem et al., 1995	9.97	碳、氮输入和温度对 CH <sub>4</sub> 的回归,国际水稻研究所(IRRI)1990年的水稻面积
Kem et al., 1995	19.1 ± 6.4	北京、南京、乐山、杭州和湖南省的排放通量,考虑了农业耕作、水稻品种和温度影响
Mudge & Adler, 1995	41.4	依据发表研究的一个排放通量和联合国粮农组织(FAO)1991年的稻田面积

对中国稻田 CH<sub>4</sub> 排放量的估算结果<sup>[5]</sup>。

在表1中最小估算值是由 Bachelet 等给出的,他们选择 NPP 的 5% 作为排放系数,水稻面积采用 USDA 提供的 1990 年的中国水稻面积,估算值为 6.79Tg/yr<sup>[11]</sup>。最大估算值由 Mudge & Adler(1995)依据所有水稻取同一排放系数以及 FAO 的水稻种植面积计算得出,其值为 41.4Tg/yr<sup>[12]</sup>。

Khalil 等(1993)根据中国农业统计年鉴的稻田面积分别赋予南方地区的早、中、晚稻和北方单季稻不同的排放系数,在没有考虑化肥的施用量的情况下估算出中国稻田 CH<sub>4</sub> 排放总量为 23Tg/yr,在考虑到化肥施用量增加而有机肥量减少的情况下估算量为 16Tg/yr<sup>[13]</sup>。从他的估算可以看出化肥能够明显减少稻田 CH<sub>4</sub> 的排放,因此可以利用化肥和有机肥混施的方法来减少稻田 CH<sub>4</sub> 的排放。

另外,蔡祖聪利用实验观测结果以及回归方程估算出中国稻田 1991~1995 年平均

CH<sub>4</sub> 排放总量为 7.6Tg<sup>[14]</sup>。有些学者还利用卫星遥感技术计算区域水稻面积,遥感水稻长势,再结合箱法测量的稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量对稻田 CH<sub>4</sub> 排放量进行估算,闫敏华等计算出 1997 年长春地区稻田 CH<sub>4</sub> 排放总量为 0.0203Tg/yr<sup>[15]</sup>。

由于稻田 CH<sub>4</sub> 排放受众多因素的影响,而这些因素又存在时间和空间变异性,且相互影响,因此,各位作者给出的排放量不尽相同,要想准确估算稻田 CH<sub>4</sub> 排放量还需加强对不确定性因子和模式输入参数的研究。

## 2 减少稻田甲烷排放的措施

减少稻田 CH<sub>4</sub> 排放的措施主要是减少产 CH<sub>4</sub> 的基质,改变适宜 CH<sub>4</sub> 菌活动的环境条件,抑制 CH<sub>4</sub> 菌的活性,但同时又不能减少水稻的产量。为此,许多科学家在进行稻田 CH<sub>4</sub> 排放观测的同时,也进行了稻田 CH<sub>4</sub> 减排措施的研究<sup>[16~22]</sup>。从目前开展的研究来看,减排措施主要有以下几个方面:稻田施

肥管理,水稻品种,水分管理,稻田  $\text{CH}_4$  抑制剂的研制和应用,合适的栽培方式等。

### 2.1 施肥管理

研究表明,只施化学肥料对稻田  $\text{CH}_4$  排放有明显的抑制作用<sup>[20]</sup>,而且稻田的产量也不低,但是长期施用化肥又会对土壤及生态环境产生较大的影响,所以应在大量施用有机肥的水稻产区施行化肥和有机肥混施的方法来减少稻田  $\text{CH}_4$  排放<sup>[20]</sup>。还有研究表明,施用有效微生物菌剂(EM)可取代化肥增加产量,抑制  $\text{CH}_4$  排放,但是此种技术在中国还处于初级实验阶段<sup>[22]</sup>。

腐熟度较高的沼渣肥作为一种特殊形式的有机肥,能很明显地降低  $\text{CH}_4$  排放量<sup>[19,21]</sup>。但是未经干燥、堆腐阶段的沼渣肥中含有大量活性  $\text{CH}_4$  菌,会使土壤中有有机物加速向  $\text{CH}_4$  转化,因此沼渣肥施用前应经过一定时间的干燥以灭菌或降低  $\text{CH}_4$  菌的活性<sup>[21]</sup>。

### 2.2 种植高产低甲烷排放的水稻品种

一般认为稻田  $\text{CH}_4$  排放和水稻植物体总质量成反比关系,也就是说具有较大植物体的水稻品种的稻田  $\text{CH}_4$  排放较小。因此要减少稻田  $\text{CH}_4$  的排放又不影响产量必须选用一些对  $\text{CH}_4$  氧化能力强、低排放且高产的水稻品种。目前,有研究者发现种植杂交稻比常规稻的  $\text{CH}_4$  排放量少(见表2),而且杂交水稻的单位面积产量也比常规稻高出30%<sup>[21]</sup>。但是这方面的研究还需要水稻专家的进一步努力才能研制出适合于各地的高产低  $\text{CH}_4$  排放的水稻品种。

表2 四川不同水稻品种  $\text{CH}_4$  排放通量  
( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )的比较<sup>[21]</sup>

测量年份	1988	1989	1990	1991	1992
杂交稻(株高 91.2cm)	48.2	50.74	76.78	67.45	56.96
普通稻(株高 83.8cm)	85.22	56.71	81.44	80.69	65.75

### 2.3 水分管理

水是影响稻田  $\text{CH}_4$  排放的决定性因子,通过改变稻田的水分管理可以调节土壤的 Eh 从而控制稻田  $\text{CH}_4$  产生<sup>[21]</sup>。大量的观测表明,间歇灌溉是一种可行的减排措

施<sup>[19-21,23]</sup>。它能够使土壤经常接触空气,有利于提高土壤的 Eh,抑制产  $\text{CH}_4$  菌的活动,促进  $\text{CH}_4$  的氧化,从而减少  $\text{CH}_4$  的排放。但是,间歇灌溉也存在一定的缺陷,就是在稻田无水的情况下,其他一些气体(主要是氧化亚氮)的排放可能会增长。因此,在减少稻田  $\text{CH}_4$  排放研究时要综合考虑各种因素,不能顾此失彼。

### 2.4 稻田甲烷抑制剂的研制和使用

李晶等通过实验发现,稻田使用称为 AMI-AR2 的液体状肥料型  $\text{CH}_4$  抑制剂,不仅能抑制稻田  $\text{CH}_4$  排放,而且有一定的经济效益。此抑制剂通过把有机质转化成腐殖质,减少  $\text{CH}_4$  形成的基质,增加稻田的肥力和水稻的产量。但是它只适用于中等肥力和肥力条件差的稻田中,这种技术尚处于实验阶段<sup>[21]</sup>。另有研究表明,农药型  $\text{CH}_4$  排放抑制剂 GCH 和肥料型抑制剂 PB-1 对水稻田  $\text{CH}_4$  排放有抑制效果并能减轻病虫害,而且对水稻有增产作用,这两种抑制剂可降低稻田  $\text{CH}_4$  排放 9%~15%<sup>[24]</sup>。其中 GCH 是一种广谱灭菌和表面活性剂,能抑制  $\text{CH}_4$  的活性,适用于容易发生病虫害的地区;PB-1 是一种特殊腐殖质,能促使土壤有机质分解腐殖酸,减少  $\text{CH}_4$  的生成<sup>[23]</sup>,其原理和 AMI-AR2  $\text{CH}_4$  抑制剂相同。但是, $\text{CH}_4$  排放抑制剂的技术和推广应用目前均处于研究阶段,实际应用还有距离。

### 2.5 合适的栽培方式

许多实验表明,采用垄作水稻栽培法(即水稻种植点高于株间土壤,株间土壤淹水而水稻植物根部不淹或少淹)能够减少  $\text{CH}_4$  排放<sup>[19,20]</sup>。垄作栽培能够改善水稻植株根部的通气条件,提高土壤的 Eh,从而有利于根系的发育并抑制  $\text{CH}_4$  的排放。

总之,目前我国对于稻田  $\text{CH}_4$  排放的研究已经取得了很大的进展,但是还有很多不确定的因素,尤其是稻田  $\text{CH}_4$  产生氧化传输过程。此外应利用现有的资料加强模式的研究,缩小我国稻田  $\text{CH}_4$  排放量的数值范围,为农田温室气体排放和农业发展提供一些依

据。为此,稻田 CH<sub>4</sub> 排放还需要做进一步的研究。

参考文献

- 1 丁爱菊,王明星. 稻田甲烷排放的初级模式. 大气科学, 1995,19(6):733~740.
- 2 Cao M., Dent J. B. and Heal O. W.. Modeling methane emission from rice paddies. Global Biogeochemical cycles, 1995,9:183-195.
- 3 Huang Y., Sass R. L., and Fisher F. M.. A Semi-Empirical Model of Methane Emission from Flooded Rice Paddy Soils. Global Change Biology, 1996,4:247-264.
- 4 刘建栋,周秀骥,王建林等. 稻田甲烷排放的农业气象数值模拟研究. 应用气象学报, 2001,12(4):409-418.
- 5 王明星, 中国稻田甲烷排放. 北京: 科学出版社, 2001.
- 6 Huang Y., Sass R. L., and Fisher F. M.. Modeling methane emission from rice paddy soil: II. Model validation and application. Pedosphere, 1999,9(1):11-24.
- 7 吴海宝,叶兆杰. 我国稻田甲烷排放量初步估算. 中国环境科学, 1993,13(1):76-80.
- 8 吴海宝. 稻田甲烷排放量的估算方法. 浙江农业大学学报, 1992,18(1):69-72.
- 9 85-913-04-05 攻关课题组. 我国稻田甲烷排放量发展趋势预测(1990-2020), 农业环境保护, 1994,13(6):256-258.
- 10 王明星,戴爱国,黄俊等. 中国甲烷排放量的估算. 大气科学, 1993,17(1):52-64.
- 11 Bachelet D., Kem J., and Tolg M.. Balancing the rice carbon budget in China using a spatially distributed data. Ecological Modeling, 1995,79:167-177.
- 12 Mudge F., and Adger W. N.. Methane fluxes from artificial wetlands: a global appraisal. Environmental Management, 1995,19(1):39-55.
- 13 Khalil M. A. K., M. J. Shearer, and R. A. Rasmussen. Methane sources in China: Historical and Current emissions. Chemosphere, 1993,26, 127-142.
- 14 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展. 土壤, 1999,5:266-269.
- 15 闫敏华,华润葵,王德宣等. 长春地区稻田甲烷排放量的估算研究. 地理科学, 2000,20(4):386-389.
- 16 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.
- 17 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.
- 18 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.
- 19 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.
- 20 陈宗良,邵可声,李德波等. 控制稻田甲烷排放的农业管理措施研究. 环境科学研究, 1994,7(1):1-10.
- 21 李晶,王明星,陈德章. 水稻田甲烷的减排方法研究及评价. 大气科学, 1998,22(3):354-362.
- 22 苗曼倩,朱超群,莫天麟等. EM 对稻田甲烷排放抑制作用的初步研究. 应用气象学报, 1998,9(4):462-469.
- 23 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.
- 24 江永钦,李年荣,刘荣花等. 稻田甲烷排放抑制剂实验结果分析. 农业气象, 1994,(4):15-17.

## A Review on Study of Methane Emission from Rice Field in China

### II. Model and Mitigation Method

Ren Wanhui<sup>1,2</sup> Xu Li<sup>1</sup> Wang Zhenhui<sup>2</sup> M. A. K. Khalil<sup>3</sup> R. A. Rasmussen<sup>4</sup>

(1. National Climate Center, CMA, Beijing 100081; 2. Nanjing Institute of Meteorology;  
3. Department of Physics, Portland State University, P. O. Box 751, Portland, Oregon 97207, USA.;  
4. Department of Environmental Science & Engineering, Oregon Graduate Institute, 20000 N. W. Walker Rd., Beaverton, Oregon 97006, USA.)

#### Abstract

The advances for more than 20 years' studies of methane emission from rice paddy fields in China are reviewed, including the study of methane emission models and estimated methane emission from rice fields; possible techniques for reducing methane emission. Numerical model is an effective method to estimate the total amount of methane emission from rice fields. Model study is now in the developing phase. Several primary models are introduced: physical process model and empirical Model. Estimated methane emission from rice fields is ranging from 6.79 to 41.4 Tg/yr. The precision of estimated value has been improved with the development of science and technology and experiments as well. Mitigation methods are necessary to reducing methane emission, but the methods are still in the phase of study and the application of mitigation techniques is not mature.

**Key Words:** rice fields methane emission emission models mitigation methods