

稻田甲烷排放的初级模式*

丁爱菊 王明星

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

本文建立了一个区域尺度稻田生态系统 CH_4 排放的初步模式, 该模式能从理论上反映稻田 CH_4 产生、传输与排放的机理, 并提供了一种估计不同区域气候和土壤条件下稻田生态系统 CH_4 排放总量的有效方法。模式主要包括三个部分: 水稻的生长、土壤有机物的分解和 CH_4 的产生、传输及排放过程。模式分别模拟了早稻和晚稻 CH_4 的排放, 模拟结果与实测比较接近, CH_4 的季平均排放量, 模拟值与实测值的偏差在 10% 左右。模式的敏感性实验表明, 温度是稻田 CH_4 排放规律的主要控制因子。

关键词: 甲烷; 模式; 水稻生长; 稻田。

一、引 言

大量观测事实证明, 对流层大气 CH_4 的浓度在过去 300 年间大致以指数形式增加, 过去十年间大气 CH_4 的浓度以每年约 0.8% (13×10^{-9}) 的速度增长, CH_4 浓度的这种变化将会影响对流层大气的质量并导致全球气候的变暖。大气 CH_4 浓度增加的原因可能主要是人为活动造成大气 CH_4 源的增加, 稻田是全球尺度大气 CH_4 的主要源之一, 如何准确地估计稻田 CH_4 的排放量, 并有效地控制 CH_4 的排放便成为目前的重点课题之一。近年来, CH_4 的实地观测研究较多, 主要观测点设在欧洲、北美洲和亚洲, 中国的观测点有乐山(四川)、桃源(湖南)、杭州和苏州, 观测方法有人工测量和自动箱式测量两种, 连续几年的观测研究发现, 稻田 CH_4 的排放有着很强的日变化、季节变化和年季变化^[1], 这种变化依赖于稻田 CH_4 的产生、传输和排放过程, 土壤中 CH_4 的产率是影响其排放量的主要因子之一, 土壤中产生的 CH_4 相当一部分在穿过有氧区时被氧化了^[2], 大约只有 30% 的 CH_4 排放到了大气, 而这部分 CH_4 绝大部分是通过水稻体排放的, 水稻体传输 CH_4 的能力和季节变化在早稻和晚稻生长季节比较接近, 都是在水稻移栽后, 随着水稻的生长, 水稻体排放 CH_4 的能力不断增强, 到抽穗中期达到最大^[3]。通过实地观测, 得到了宝贵的第一手资料, 也对稻田 CH_4 排放的机理有了较清楚的物理图象, 但是, 全球水稻种植分布很广, 区域气候差异悬殊, 水稻品种和土质条件以及耕作管理的不同, 不密布网点, 就很难对整个稻作系统的 CH_4 排放量做出较为准确的估计, 然而, 实际观测所需的时间长, 耗用人力物力很大, 因此, 建立一个能体现实际气候、土壤、田间管理对水稻的生长及 CH_4 排放的影响的稻田

1994年2月4日收到, 12月14日收到修改稿。

* 国家攀登计划 85-27 项。

CH₄ 排放模式, 是准确估计稻田 CH₄ 排放总量的另一条有效途径。本文将描述一个区域尺度稻田 CH₄ 排放的生物物理过程模式, 模式考虑了水稻的生长过程、土壤有机物含量及天气条件对稻田 CH₄ 排放率的影响, 模式需要输入现有的气象观测资料和某些土壤物理化学参数。

二、模式的建立

如图 1 所示^[4], 在有水稻生长的稻田中, 水体和表层土壤是有氧环境, 较深层的土壤是无氧区。在深层土壤的无氧环境中, 厌氧细菌的活动首先使土壤有机质腐败, 产生简单的有机酸(如乙酸)和 H₂、CO₂, 这些简单的有机酸和 H₂、CO₂ 可以被产 CH₄ 菌利用产生 CH₄, 产生的 CH₄ 通过三个途径输送到大气中。土壤中产生的 CH₄ 可以被植物根系吸收, 然后经过植物内通气组织从叶孔和叶鞘排放到大气, 由于植物根系表面存在一薄的氧化膜, CH₄ 在那里有一部分被氧化。土壤中产生的 CH₄ 也可以通过分子扩散过程输送到大气, 但是, 由于土壤中和水体中 CH₄ 气体分子扩散都很慢, 而且输送途径上有较厚的有氧层, 相当一部分 CH₄ 在途中被氧化, 所以, 分子扩散作用的输送效率很低。如果土壤中 CH₄ 的产率特别高, 则会形成 CH₄ 含量丰富的气泡, 气泡上升过程中有一部分 CH₄ 越过有氧区时被氧化, 另一部分随着气泡在水表破裂喷射到大气中。

1. 模式的假设

稻田 CH₄ 的产生与排放过程是作物生长学、微生物学、土壤水动力学以及气液反应动力学融为一体的复杂过程, 为使问题得以简化, 模式假设:

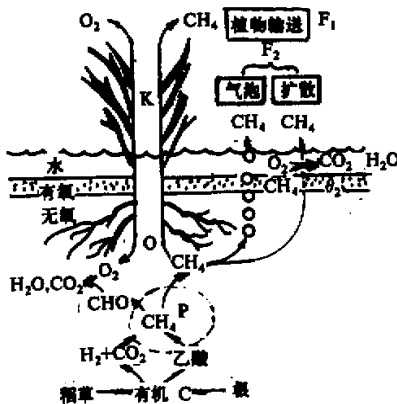


图 1. 有植被的浅水生态系统中 CH₄ 产生、传输和转化过程

土壤中 CH₄ 的产率为 $P(\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1})$, 植物根系提取 CH₄ 的速率为 $Q_1(\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1})$,

(1) 稻田正常灌溉, 水稻正常生长所需的养分供应充足;

(2) CH₄ 产生的碳源有两个: 一是土壤有机质和施加有机肥的分解, 二是水稻体新陈代谢的排出物;

(3) CH₄ 产生只当土壤氧化还原势能 (E_h) 值降到某一临界值 ($E_h < -250 \text{ mV}$) 以后才发生;

(4) CH₄ 产生的反应速率遵循 Arrhenius 公式;

(5) 土壤中产生的 CH₄ 经三条途径向大气传输: ①水稻植物体传输, ②土壤中的扩散, ③冒气泡;

(6) CH₄ 穿过氧化区时的扩散过程遵循气液反应的扩散-反应理论。

有氧层中 CH_4 的消耗为 $Q_2 (\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1})$, 植物对 CH_4 的排放率为 $F_1 (\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1})$, 水表向大气排放 CH_4 的速率为 $F_2 (\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1})$, 植物的排放率系数为 k , 则有总排放率 F 为

$$F = F_1 + F_2, \quad (1)$$

$$F_1 = k \cdot Q_1, \quad (2)$$

$$F_2 = P - Q_1 - Q_2. \quad (3)$$

从而

$$F = P - (1 - k) \cdot Q_1 - Q_2. \quad (4)$$

(4)式的求解要涉及水稻的生长、有机物的分解和气液扩散—反应理论, 这里列出了主要的算法和方程式。

2. CH_4 的产生率 (P)

根据假设, CH_4 产生的有机质来源主要有两个: 一是植物光合作用固定 CO_2 , 然后经新陈代谢后的根系排出物; 二是来自土壤有机物的分解产物。水稻植物体生长第 d 天各个部分 X (根、茎、叶、果实等) 的呼吸强度 ($R_{X,d}$) 可用其损失的干重 (g) 表示^[5]:

$$R_{X,d} = (W_{d-1} + W_{\text{plus},d}) \cdot (M_R) \cdot (T_{C,d}) \cdot \left(\frac{24 - L_d}{12} \right), \quad (5)$$

其中, W_{d-1} 为第 $d-1$ 天某一部分的干重 (g m^{-2}), $W_{\text{plus},d}$ 为第 d 天水稻的增重 (g m^{-2}), L_d 为第 d 天的日长 (h), M_R 和 $T_{C,d}$ 分别为持续呼吸作用系数和温度相关系数,

$$M_R = 0.0075, \quad (6)$$

$$T_{C,d} = 0.04 + 0.0019T_d + 0.001T_d^2, \quad (7)$$

$$T_d = T_{\text{min},d+1} + (T_{\text{max},d-1} - T_{\text{min},d+1}) / 4. \quad (8)$$

$T_{\text{max},d}$ 和 $T_{\text{min},d}$ 分别是第 d 日的最高气温和最低气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

土壤中微生物分解有机物的过程有以下方程^[6]:

$$\frac{dC}{dt} = -\alpha \cdot G \cdot B, \quad (9)$$

式中 C 为单位土壤有机物中含碳量 (g m^{-2}), α 为增加单位生物量所需的碳, B 为分解者的生物量, G 为生长率, 由二基质反应的 Michaelis-Menten 动力学方程给出, 是 C 、 N 的函数,

$$G = \frac{G_{\text{max}} \cdot C \cdot N}{(K_C + C) \cdot (K_N + N)}. \quad (10)$$

G_{max} 是给定环境下的最大生长率 (温度、pH 的函数), K_C 是 Michaelis 常数 (描述 C 的常数), K_N 是描述 N 含量 ($G = G_{\text{max}} / 2$ 时含碳量为 C 时) 的常数, 各参量的取值为: $G_{\text{max}} = 0.01 \text{ d}^{-1}$ (30°C), $K_C = 20 \text{ g/m}^2$, $K_N = 0.4 \text{ g/m}^2$, $\alpha = 1.25$ 。

土壤中 CH_4 的产生遵循 Arrhenius 方程^[7]:

$$P = A \cdot e^{-E/RT}, \quad (11)$$

其中, E 为活化能 ($60 \sim 90 \text{ kJ/mol}$), T 为土壤温度 (K), R 为气体常数, A 为反应的特性函数, 由反应物的浓度和反应条件决定, 即受有机质的供给和土壤及水体的 E_h 的影响。根据大量的观测事实, 在正常的管理条件下, 水稻移栽后稻田基本都有 CH_4 产生。因此, 可以认为土壤 E_h 在水稻移栽后满足 CH_4 产生的条件。

3. CH_4 的氧化率 (Q_2)

产生的 CH_4 沿土壤中 CH_4 浓度的方向扩散, CH_4 穿过有氧区的扩散过程可以用气液反应理论来描述, 即在扩散方程中另附加一反应项, 于是, 扩散—反应方程为^[8]

$$D \frac{\partial [\text{CH}_4]}{\partial z^2} = \frac{\partial [\text{CH}_4]}{\partial t} + r, \quad (12)$$

式中 D 为扩散系数 ($0.076 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)^[9], z 为扩散方向坐标 (cm), $[\text{CH}_4]$ 代表 CH_4 浓度 (mol cm^{-3}), t 为时间 (s), r 为特征反应速率, 用下式表示:

$$r = \frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = k' \cdot [\text{O}_2]^2 \cdot [\text{CH}_4], \quad (13)$$

式中 $[\text{O}_2]$ 代表氧化层中氧的浓度 (mol cm^{-3}), k' 为反应速率常数 (三级反应 $\text{cm}^6 \text{ mol}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 于是, CH_4 的氧化率 Q_2 为

$$Q_2 = r \times 16 \times 10^{-6}. \quad (14)$$

4. CH_4 的提取率 (Q_1)

土壤中 CH_4 产生以后, 部分 CH_4 溶于土壤液中随质量流到达根围, 随着根对土壤液的提取进入根内, 在皮层气化^[10], 少量未溶的 CH_4 也可经气体分子扩散的形式进入根内, 进入根内的 CH_4 由植物通气组织来传输, 最后经水稻植物体的叶片和叶鞘排向大气。根系每日对土壤液的提取总量 T_{sl} ($\text{cm H}_2\text{O d}^{-1}$) 由下式确定^[5]:

$$T_{sl} = L_w \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j} - \sum_{j=1}^n \frac{M_{s,j}}{R_j}, \quad (15)$$

其中, n 为土壤分层数 (取 4), L_w 为植物叶子水势能 ($-\text{Pa}$), R_j 为 j 层到叶间的阻力 (Pa h cm^{-1}), $M_{s,j}$ 为 j 层体积水分吸摄入量 ($-\text{Pa}$), 各参量详细的计算方法见文献[5]。

由此, 植物根系提取 CH_4 的速率 Q_1 为

$$Q_1 = T_{sl} \cdot S_{\text{CH}_4}, \quad (16)$$

$$S_{\text{CH}_4}(t) = [-12.6542 \times \ln(t) - 70.8466] \times 10^{-3}, \quad (17)$$

其中, S_{CH_4} 为不同温度 (t) 下 CH_4 的溶解度 ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), t 为温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

植物与其环境间进行的 CH_4 气体交换是随同光合作用有关的 CO_2 的交换和蒸腾作用中水汽的交换而进行的, 这种交换主要发生在叶鞘和叶片, 叶鞘和叶片的呼吸能力越

强, 气体交换就越快, 因此, 可用它们的呼吸能力来表示气体交换的快慢, 即 (4) 式中的 k , 具体计算过程见文献[5]。

CH_4 经气泡的传输, 主要发生在土壤 CH_4 产率很高时, 由于气泡的形成与浮动非常复杂, 我们并不直接去求气泡传输 CH_4 的量, 而是求植物体排放 CH_4 的效率和 CH_4 氧化消耗的量。

三、模拟结果

模式选用 1988 年杭州气象站的天气观测资料模拟早稻 CH_4 的排放, 实测资料由

1988 年杭州 CH_4 观测站采集, 选用 1992 年湖南省常德地区气象台的天气观测资料模拟湖南晚稻 CH_4 的排放, 实测资料由 1992 年湖南桃源 CH_4 观测站采集。

图 2 和图 3 分别是 1988 年杭州早稻和 1992 年湖南晚稻 CH_4 排放的模拟结果与实测值的比较。容易看出, CH_4 的日平均排放率在水稻整个生长期呈较大的波动, 其变化形式对于早稻和晚稻是不同的。就早稻而言, 水稻整个生长期中 CH_4 的

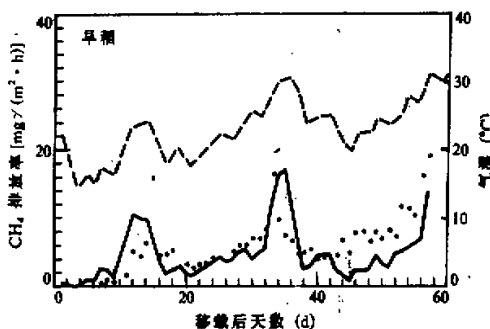


图 2 CH_4 排放的季节性变化与温度的相关
(杭州早稻, 1988 年)

· 实测, — 模拟, --- 气温

排放明显地呈现出 3 个峰值, 分别出现在水稻刚移栽后的最初十几天、水稻抽穗期和成熟前期, 与此对应的气温和水稻根系的呼吸强度都达到了峰值, 说明在相应的时期内, 土壤有机质含量较高、土壤温度适宜, 这些条件不但利于 CH_4 的产生, 而且利于 CH_4 的排放 (后述)。晚稻的季节变化形式与早稻不同, 水稻移栽后短短的几天内 CH_4 的排放即出现整个季节的最大值, 其后, CH_4 排放逐渐下降, 与此对应的气温和水稻根系的呼吸强度也是在水稻刚移栽后几日达到最大, 以后呈下降趋势。与实测资料相比, 模拟结果

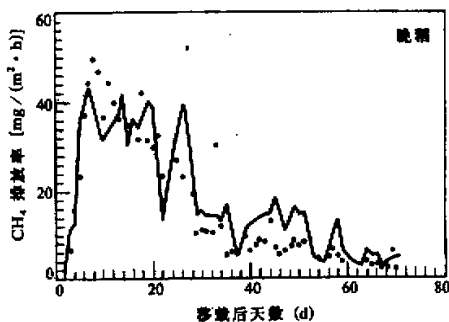


图 3 CH_4 排放的季节性变化
(湖南晚稻, 1992 年)

· 实测, — 模拟

客观地反映了 CH_4 的季节性排放规律。从平均值来看, 模拟值与实测值很接近, 杭州早稻 CH_4 季平均排放率的观测值为 $6.43 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 模拟值为 $6.19 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 湖南晚稻 CH_4 季平均排放率的观测值为 $17.42 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 模拟值为 $18.25 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 模拟值相对于观测值的偏差在 10% 左右。

水稻体对 CH_4 排放的作用

(图 4) 主要体现在根系提取溶于土壤液中 CH_4 的速率、水稻体通气组织对 CH_4 的传输效率和气孔、叶鞘与大气环境间的 CH_4 交换率。水稻移栽初期, 植物体还未发育, 其通气组织较弱, 传输 CH_4 的能力相对较小, 随着水稻的生长水稻体通气组织增强, 对 CH_4 的传输能力也日益增强, 在抽穗中期达到最大, 以后, 随着水稻的成熟, 其传输能力逐渐降低。由于根系对

CH_4 的提取以及气孔、叶鞘与大气间的气体交换要受到降水、日照等天气条件的影响, 总的来看, 水稻体对 CH_4 的传输作用并不是平滑上升的。植物体对 CH_4 排放的相对重要性在早稻大于晚稻, 早稻植物体排放的 CH_4 占 CH_4 总排放量模拟值约 86% (实测约 73%), 晚稻模拟值约 47% (实测约 55%), 出现这一差别的原因可能是晚稻生长初期气温很高, 大量的 CH_4 经气泡排向大气, 总的效果显得 CH_4 经植物体的排放作用较小。

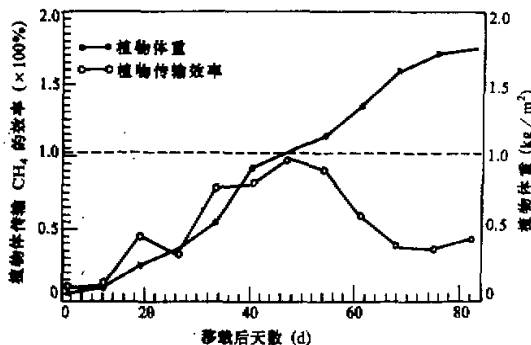


图 4 植物体对 CH_4 排放的作用

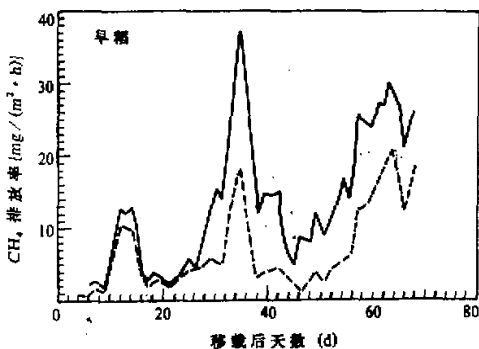


图 5 土壤有机物含量对 CH_4 排放的影响

--- 不施稻草, — 施稻草 (0.2 g m^{-2})

感地改变, 因此, 对 CH_4 的产生率和排放率的影响只表现在平均值上, CH_4 排放的峰值主要由土壤温度和 CH_4 传输途径的变化控制。

土壤中施加含 N 的有机肥 (如稻草) 会增加 CH_4 的排放率 (图 5), 但是 CH_4 排放的形态不会改变。 CH_4 的产生是产 CH_4 菌分解有机质的产物, 土壤温度、酸碱度等条件适当时, 土壤有机质含量越高, CH_4 的产率越高, CH_4 的排放率也相应升高, 但是, 淹水土壤中有有机物的分解随时间有其长期相对稳定的递减规律, 只要田间管理正常, 能保证水稻土的厌氧状态, 土壤中有有机物的分解速率一般不会因天气等外界条件的变化而敏

如果使温度保持不变 ($T_{\text{air}} =$ 常数), CH_4 的排放在水稻整个生长季节基本不变 (如图 6), 其原因可能是温度对水稻的地理分布和生育季节以及水稻的光合作用、呼吸作用、养分吸收等的重要性引起的。一般情况, 温度升高水稻的光合作用、呼吸作用加快, 养分的运输速度增大, 根系代谢加强, 根系排出物增多, 增加了土壤中有机质的含量, CH_4 产生的物质来源充足, 另外, 淹水土壤条件下, 温度升高, 土壤微生物的活动活跃, 利于 CH_4 的产生, 温度高也有利于 CH_4 形成气泡向大气扩散, 总的效果是促进 CH_4 向大气的排放; 反之亦然; 若温度不变, 上述各过程也将保持稳定, CH_4 的排放率也就变化不大。反过来, 如果让温度随时间变化, 而其他因子 (如日照、降水、蒸发等) 随时间保持一定值, 得到的结果与实况在趋势上大致相同, 这可能是因为, 降水、蒸发主要影响土壤水分的平衡, 而日照、降水、蒸发主要影响田间蒸发量, 由于水稻生长期稻田要经常灌溉, 灌溉水避免了降雨分布不规则引起的蒸发及作物蒸腾所需的水分供应不足, 稳定了土壤温度和氮、钾等无机盐的含量, 抑制了土壤有机物的分解, 地力消耗较小, 能保证水稻正常生长, 也使土壤中 CH_4 的产生不会受到太大的影响, 因此, 它们的变化就有可能对 CH_4 的排放影响较小。

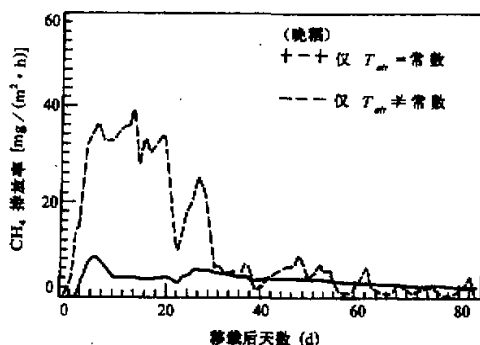


图 6 模式的敏感性实验结果

四、结 论

稻田 CH_4 排放的初级模式基本上正确地反映了实际稻田 CH_4 排放的季节性变化规律, 对 CH_4 平均排放量的估计偏差在 10% 左右。水稻生长期中 CH_4 的排放是温度、日照、降水等天气要素和土壤肥力条件共同作用的结果, 温度决定了 CH_4 排放的变化趋势, 而土壤有机质含量决定了稻田 CH_4 排放的平均量。土壤中产生的 CH_4 绝大部分是经植物体向大气排放的, 植物体对 CH_4 的传输效率在水稻中期最大。当温度很高时, 气泡也是传输 CH_4 的另一条途径。

本文提供的模式能较好的体现不同天气条件和土壤有机物含量对稻田 CH_4 排放的影响, 具有一定的实用性和推广性, 但是, 模式中对气泡的形成及传输过程作了简化处理, 还有一些土壤因子未能考虑, 因此, 还需要有更深入实验配合, 进一步完善模式。

致 谢: 作者衷心感谢上官行健博士、王跃思博士、郑循华博士和陈德章先生在做此文给予的热情帮助和支持。

参 考 文 献

- [1] Wang Mingxing et al., 1993, Methane production, emission and possible control measures in the rice agriculture, *Advances in Atmospheric Sci.*, 10(3), 307-314.
- [2] Holzapfel-Pschon et al., 1985b, Production, oxidation and emission of methane in rice paddies, *FEMS Microbiology Ecology*, 31, 343-351.
- [3] 上官行健, 1993, 稻田甲烷的传输, *地球科学进展*, 8 (5), 13-22.
- [4] 王明星, 1991, 大气化学, 气象出版社, p100.
- [5] McMenmamy J.A. et al., 1983, A Physiologically Based Rice Growth and Yield Model, IRPS, No.87, 1-61.
- [6] Parnas H. et al., 1975, Model for decomposition of organic material by microorganisms, *Soil Biol. Biochem.*, 7, 161-169.
- [7] [英] 赛克斯 (Sykes, P.), 1983, 有机化学反应机理指南, 科学出版社, p43.
- [8] 姜信真, 1989, 气液反应理论与应用基础, 烃加工出版社, p87.
- [9] Elizabeth J. F. and H. F. Hemond, 1992, Methane transport and oxidation in the unsaturated zone of sphagnum peatland, *Global Biogeochem. Cycles*, 6, No.1, 33-44.
- [10] Nouchi I., et al., 1990, Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants, *Plant Physiol.*, 94, 59-66.

A Preliminary Model for Methane Emission from Rice Fields

Ding Aiju and Wang Mingxing

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

A preliminary numerical model is built to describe the production and subsequent transport of methane in rice fields. The model embodies the effect of weather condition and some field managements on the methane emission rate. The model includes three major segments which are highly interactive in nature: growth of rice, decomposition of soil organic matter and production, transportation and emission of methane. Explicit equations for modeling each segment mentioned above are given. The main results are: 1) The seasonal variation of methane emission obtained from the model quite agrees with that from field experiments. The difference of seasonal average methane emission rate between modeling value and experiment data is about 10%. 2) During the whole rice growing period, the seasonal variation of transport ability of rice plant in model calculation is similar to the experiment data. It increases with time and reaches maximum during the stage in the middle of heading. 3) The content of soil organic matter is one of the major factors which determines methane average emission rate, and temperature controls the trend of methane emission from rice fields.

Key words: methane; model; rice field; rice growth.