

# 稻田甲烷排放模型研究

## ——模型灵敏度分析

张 稳, 黄 耀, 郑循华, 于永强

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 模型方法对区域稻田甲烷排放估计的不确定性主要源于模型参数在区域范围内的误差, 这种误差导致的估计不确定性由模型灵敏度决定。采用一种动力学分析与统计分析相结合的方法对稻田甲烷模型 CH4MOD 进行了参数灵敏度分析, 结果表明, 稻田水管理方式的灵敏度最高, 灵敏度指数为 0.64, 其次为稻田土壤的砂粒含量参数, 灵敏度指数 0.50, 灵敏度最低的参数是水稻移栽期地上生物量。以模型灵敏度指数为基础, 建立了模型估计值不确定性与模型参数区域化误差间的数量关系, 利用这一量化关系得出我国 2000 年稻田甲烷排放的不确定性范围为 3.09 ~ 10.61Tg。此外, 模型灵敏度参数的大小也反映了模型要素对稻田甲烷排放影响的大小, 因而分析的结果对于采取合理措施减少稻田甲烷排放具有指导意义。

**关键词:** CH4MOD; 模型; 灵敏度; 不确定性

文章编号: 1000-0933(2006)05-1359-08 中图分类号: Q141, S154.1 文献标识码: A

### Modeling methane emission from rice paddies: model sensitivity analysis

ZHANG Wen, HUANG Yao, ZHENG Xun-Hua, YU Yong-Qiang (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1359 ~ 1366.

**Abstract:** Model estimates of methane emission from regional and global rice paddies have been gaining international interesting. Structurally, methane emission models are characterized in terms of their component processes and their inter-relationships. Once a model is developed, it is necessary to take into account the many sources of uncertainty in the processes modeled. Uncertainties of model estimates come primarily from spatial database errors when up scaling is performed, while the magnitude of the uncertainties induced by the database errors depends straightly on the sensitivity of model output to the input parameters. The objective of this paper is to develop a methodology of sensitivity analysis applicable to a methane emission model CH4MOD, and to further link the sensitivity analysis with the spatial database errors for assessing the uncertainties of model estimates of methane emission from Chinese rice paddies.

Sensitivity of CH4MOD output to the model input is characterized by a sensitivity index defined as a ratio of relative change of model output ( $dy/y$ ) to that of model input parameter ( $dx/x$ ). By applying the statistical analysis on a vast amount of model outputs against the random combinations of the model parameters, the sensitivity index was first calculated for each parameter in CH4MOD. The uncertainties of CH4MOD output were then assessed by linking the sensitivity index with the spatial database errors. The parameters in CH4MOD include soil sand percentage ( $Sand$ ), rice variety index ( $VI$ ) and grain yield ( $GY$ ), rice aboveground biomass at transplanting ( $W_0$ ) and the intrinsic growth rate of aboveground biomass ( $r$ ), organic matter amendment ( $OM$ ) and irrigation regime ( $W_{Pm}$ ).

Sensitivity analysis showed that the irrigation regime is the most sensitive factor with a sensitivity index of 0.64. The sensitivity of remaining parameters is ranked by their sensitivity indices as  $Sand$  (0.50) >  $VI$  (0.48) >  $OM$  (0.43) >  $r$

**基金项目:** 中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-SW-01-13)

**收稿日期:** 2005-06-18; **修订日期:** 2006-02-09

**作者简介:** 张稳(1968 ~), 男, 河北省人, 博士, 主要从事 GIS 应用与全球变化研究. E-mail: zhangween@yahoo.com

**Foundation item:** The project was supported by the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (approved # KZCX1-SW-01-13)

**Received date:** 2005-06-18; **Accepted date:** 2006-02-09

**Biography:** ZHANG Wen, Ph. D., mainly engaged in GIS application and global change. E-mail: zhangween@yahoo.com

$(0.42) > GY (0.32) > W_0 (0.08)$ . By running CH4MOD, methane emission from Chinese rice paddies was estimated to be 6.02 Tg in the year of 2000. The uncertainties ranged from 3.09 to 10.61 Tg based on the calculations from the sensitivity indices and the spatial database errors. These values are similar to previous model estimates reported by other scientists.

It was concluded that the sensitivity index proposed in this paper is capable of quantifying the sensitive difference among the model parameters. Moreover, the uncertainties of model estimates on a regional scale can be evaluated by linking the sensitivity index with the model input parameters in terms of spatial database errors.

**Key words:** CH4MOD, model; sensitivity analysis; uncertainty estimation

大气甲烷( $\text{CH}_4$ )是仅次于  $\text{CO}_2$  的重要温室气体,全球稻田是大气甲烷的重要排放源之一。近十余年来,为了估计区域乃至全球稻田甲烷的排放,国内外在稻田甲烷排放模型的研究方面取得了很大的进展<sup>[1-7]</sup>。利用 GIS 技术将模型参数转换为空间数据集,实现模型的区域化应用,是提高模型对区域稻田甲烷排放估计精度的有效途径。

评价模型估计结果的不确定性是模型研究的重要内容。对于通过模型与 GIS 相结合进行的区域稻田甲烷排放估计而言,不确定性主要来源于输入参数的误差<sup>[8,9]</sup>,参数误差对模拟结果不确定性的贡献与模型的灵敏度密切相关。模型灵敏度分析的目的在于识别参数灵敏度的高低,最大限度地降低高灵敏度参数的误差,从而有效地缩小模型估计的不确定性范围。通常的模型灵敏度分析都采用动力学的分析方法<sup>[9-14]</sup>。对每一个目标参数,在保持其它参数不变的条件下,分析模型对目标参数变化的响应。这种分析方法将每个待分析的参数分次独立进行,并且需要预先设定某个特定的情景模式<sup>[10-12]</sup>,因而分析结果只具有典型情景下的有效性,缺乏与实际情况的一致性。在一个大尺度区域范围,参数的空间变化往往是同时发生的,通常的动力学分析很难定量地给出一个能综合反映多种情景下模型的参数灵敏度指标,也很难将区域参数误差与灵敏度分析结果进行有机结合来计算模型估计结果的不确定性范围。

本文旨在引入一个新的分析方法,对稻田甲烷排放模型 CH4MOD<sup>[6]</sup>进行参数灵敏度分析,给出一组能综合表示模型参数在区域中各种情景下的灵敏度指数,并且建立起模型区域估计结果不确定性范围与模型灵敏度指数及模型参数误差之间的数量关系。

## 1 灵敏度分析的原理与方法

对于每一个输入参数来说,模型对它的变化具有不同的输出响应,即模型对参数的灵敏度不同。高灵敏度参数的微小偏差会造成模型输出的较大不确定性,而低灵敏度参数则不会对输出结果有很大的影响,即使数据有一定的误差。经典的模型灵敏度分析方法<sup>[8-11]</sup>首先确定一组待分析的输入参数作为目标参数,然后通过保持其它参数不变,依次改变其中某一目标参数的取值,获得相应模型输出的变化。这种分析方法可以获得特定情景下模型输出对于目标参数的动力学响应灵敏度,但这样得到的模型灵敏度具有一定的片面性,因为对于区域尺度来说,几乎没有哪个参数是保持不变的,所有的模型参数都存在一定程度的空间或/和时间变化。并且在不同的背景参数下(即除目标参数之外其它参数取不同的值),目标参数的灵敏度也可能发生变化。要综合分析模型的灵敏度,必须保持背景的参数不断变化,并同时分析模型的输出随着目标参数的变化情况。

本文采用动力学分析和统计分析相结合的方法,通过改变一定值域范围内的目标参数和背景参数,对稻田甲烷排放模型 CH4MOD 进行灵敏度分析。首先应用 CH4MOD 计算不同情景下稻田甲烷排放量,然后对众多的情景模式及其输出结果进行统计分析,从而获得具有广泛表示意义的模型参数灵敏度(图 1)。

CH4MOD 的输入参数包括:稻谷产量( $GY$ )、移栽期水稻植株地上部分生物量( $W_0$ )、外源有机质添加量( $OM \rightarrow OM_N, OM_S$ )、水稻品种系数( $VI$ )、水稻内秉增长率( $r$ )、稻田土壤砂粒含量( $Sand$ )、气温( $T_{air}$ ,或土壤温度  $T_{soil}$ )、水稻的移栽和收获日期( $S_i, S_e$ )以及稻田水管理模式( $W_{pm}$ )<sup>[15]</sup>。其中除了  $W_{pm}$ 、水稻移栽和收获日期参数外,其它均为实变量参数。本次灵敏度分析仅对除气温(或土壤温度)及与之相关的  $S_i$  和  $S_e$  之外的其它

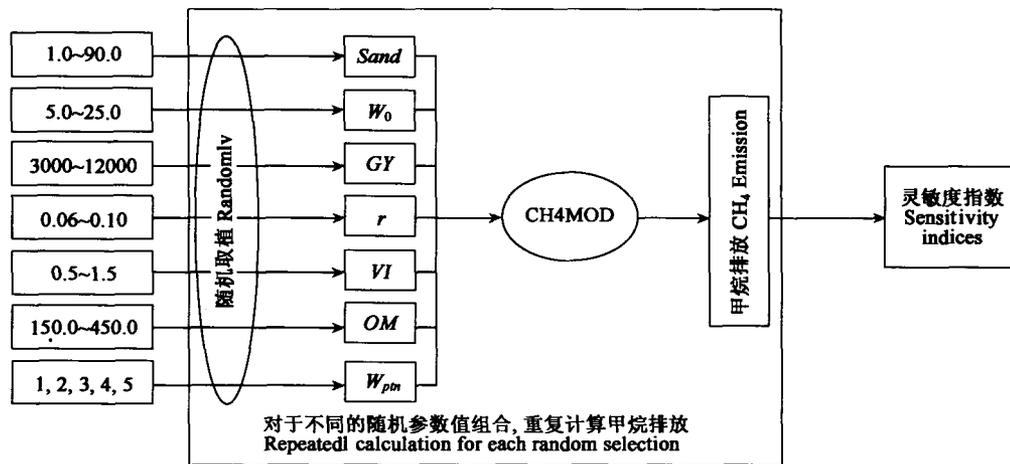


图 1 模型参数灵敏度分析方法示意

Fig.1 Illustration of method for model sensitivity analysis

参数进行(表 1)。

1.1 模型输入参数的随机取值与甲烷排放的模拟

在各个模型参数的值域范围内,随机选取一组参数  $\{Sand^{(i)}, W_0^{(i)}, GY^{(i)}, r^{(i)}, VI^{(i)}, OM^{(i)}, W_{ptn}^{(i)}\}$  (其中上标  $i$  表示第  $i$  次的选择),将所选的参数组合输入模型计算出相应的稻田甲烷季节排放量。随着输入参数随机组合的不断变化,获得大量与此对应的模型输出,这些输出结果是统计分析的基础。

1.2 虚拟逐日气温数据序列

为了利用模型计算稻田甲烷的季节排放量,需要气温数据作为逐日气象驱动力。在灵敏度分析时,采用虚拟的气温数据来代替实际的台站观测气温能够使模型获得各种气候条件下的气温序列。对于每一组随机选取的模型初始化参数(表 1),利用下列公式生成模拟的逐日气温序列  $T_{air}^{(i)}$  :

$$T_{air}^{(i)} = T_{max} - |t - S_{max}| \times D_T + R(-5.0, 5.0) \tag{1}$$

$$D_T = \begin{cases} (T_{max} - T_{min}) / (S_{max} - S_e), & t \leq S_{max} \\ (T_{max} - T_{min}) / (S_e - S_{max}), & t > S_{max} \end{cases} \tag{2}$$

$$S_{max} = R(S_s, S_e) \tag{3}$$

$$T_{max} = R(25.0, 35.0) \tag{4}$$

$$T_{min} = R(10.0, 20.0) \tag{5}$$

式中,函数  $R(x, y)$  表示介于  $x$  与  $y$  之间的一个随机数;  $S_s$  和  $S_e$  分别表示模型运行的起始与结束时间(即稻田的移栽与收获日期),变量  $t$  表示模型运行的时间变量 ( $S_s \leq t \leq S_e$ );  $S_{max}$  表示水稻生长季中最高日平均气温发生日期。  $T_{max}$  和  $T_{min}$  分别表示生长季的最高、最低日气温。

1.3 模拟结果的统计分析与参数灵敏度指数的计算

1.3.1 实变量参数的灵敏度指数计算 如上所述,模型输入参数的误差是造成目前区域稻田甲烷排放估计

表 1 CH4MOD 的输入参数

Table 1 Input parameters of CH4MOD

参数名称 Parameters	值域 Value domain	参数说明 Description
<i>Sand</i>	1.0 ~ 90.0	土壤砂粒含量 Soil sand (%)
$W_0$	5.0 ~ 25.0	移栽时的稻田初始地上生物量 Above-ground biomass on transplanting day ( $g/m^2$ )
<i>GY</i>	3000.0 ~ 12000.0	稻谷产量 Rice grain yield ( $kg/hm^2$ )
<i>OM</i>	150.0 ~ 450.0	外源有机质添加量 Organic matter amendment ( $g/m^2$ )
$r$	0.06 ~ 0.10	水稻内秉增长率 Rice intrinsic growth rate
<i>VI</i>	0.5 ~ 1.5	水稻品种系数 Rice cultivar
$W_{ptn}$	1, 2, 3, 4, 5	稻田水管理模式 Water management pattern

不确定性的首要原因。通常实变量参数的误差表示为:  $M \pm e$ , 其中  $M$  为参数真值(实际应用中用  $M$  的估计值  $\widehat{M}$ ),  $e$  为参数误差。区域化的模型参数从统计意义上说是空间上的随机过程, 空间变异特征明显。但是由于不同的输入参数具有不同的度量纲, 为了比较模型对不同参数的灵敏度差异, 需要首先将参数误差无量纲化, 即  $e/\widehat{M}$ 。用微分形式将  $e/\widehat{M}$  表示成为:  $\frac{dx}{x}$ , 即  $d(\ln x)$ 。灵敏度分析的目的在于得出稻田甲烷排放(以  $y$  表示,  $\text{g/m}^2$ ) 变化随输入参数(以  $x_j$  表示, 其中  $j$  表示不同的模型参数, 不包括稻田水模式参数)变化的强度, 即:

$$\frac{dy}{y} \propto A_j \times \frac{dx_j}{x_j} \quad \text{或} \quad d(\ln y) \propto A_j \times d(\ln x_j) \quad (6)$$

将式(6)中的系数  $A_j$  定义为参数  $j$  的灵敏度指数。由于对于某个参数  $j$  不同的参数取值,  $A_j$  一般不保持为常数, 因此通过对大量样本的统计分析获取  $A_j$  的统计平均值, 用以总体描述不同模型参数的灵敏度差异。

**1.3.2 水管理模式参数的灵敏度指数计算** 稻田水管理模式参数是一个量化的代码, 其数值本身不具有量的意义, 因此不能用上述的方法分析其灵敏度。由于水管理模式参数的误差在于不同水管理模式的混淆, 因此水模式的灵敏度指数用公式(7)计算:

$$A_w = \left( \frac{1}{N} \times \sum_{i \neq j} \frac{|\overline{y_w^i} - \overline{y_w^j}|}{\overline{y_w^i} + \overline{y_w^j}} \right), i, j \in S \quad (7)$$

式中,  $A_w$  是水模式参数的灵敏度指数;  $S = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  为稻田水管理模式类型集合;  $\overline{y_w^i}$  和  $\overline{y_w^j}$  分别表示对应于水模式  $i$  和  $j$  的甲烷排放统计均值;  $N = 10$  为不同水模式的二元组合 ( $i \neq j$ ) 总数。公式(7)适用于统计意义上不同参数取值出现频率相同的情况, 完全随机的参数取值方案可以保证这一条件成立。

## 2 模型参数灵敏度分析结果

### 2.1 实变量初始化参数的灵敏度分析

按照上述的方法, 利用模型计算了 223020 个随机参数组的甲烷排放。根据这 223020 组样本, 对每个参数进行分组  $|d(\ln y)|$  vs.  $|d(\ln x_j)|$  统计分析。分组的依据是  $\ln(x_j)$  的等间距分组, 并以分组的统计结果作差分计算得出  $A_j$  的值。表 2 列出了部分统计结果及相应的  $A_j$ 。由于  $OM$  (外源有机质) 参数在输入模型时需要分解为  $OM_N$  (易分解组分) 和  $OM_S$  (难分解组分) 两个参数, 并且与  $OM_N$  相比,  $OM_S$  参数对稻田甲烷产生/排放的贡献要小的多, 因此表 2 中用  $OM_N$  代替  $OM$  进行外源有机质的模型灵敏度分析。通过计算获得的模型实变量参数的灵敏度从大到小依次为:  $Sand (0.50) > VI (0.48) > OM_N (0.43) > r (0.42) > GY (0.32) > W_0 (0.08)$ , 这些灵敏度指数分析结果与稻田甲烷排放观测及机理研究的结果<sup>[16-22]</sup> 基本一致。

### 2.2 稻田水管理模式参数的灵敏度分析

表 3 为不同水管理模式下水稻田甲烷排放的灵敏度分析结果, 其中水管理模式 1、2、3、4 和 5 分别表示: 淹水—烤田—淹水—湿润灌溉、淹水—烤田—湿润灌溉、淹水—湿润灌溉、淹水和湿润灌溉<sup>[15]</sup>。由表 3 可以看出, 水管理模式对稻田甲烷排放具有重要的影响, 田间观测结果<sup>[19, 20, 23]</sup> 也证实了这一点。全生育期持续淹水 ( $W_{pm} = 4$ ) 是湿润灌溉方式 ( $W_{pm} = 5$ ) 甲烷排放的 4.70 ( $66.83/14.23 = 4.70$ ) 倍。相对于全生育期持续淹水方式来说, 我国常规稻田水管理模式 ( $W_{pm} = 1, 2, 3$ ), 能有效地降低 (50.0% ~ 68.6%) 稻田甲烷排放。根据公式(7) 及表 3 的结果得到水模式的灵敏度指数  $A_w$  为 0.64, 是 CH4MOD 敏感度最高的参数。

## 3 CH4MOD 模型灵敏度指数及中国稻田甲烷排放估计的不确定性

如上所述, 参数的数据质量误差是引起稻田甲烷排放模型估计值不确定性的主要原因。由参数数据质量造成的模型估计不确定性是一个参数数据误差通过模型机制向模型输出传递的过程。这种传递的强度可以用参数的灵敏度指数 ( $A_j$ ) 来表示。假设各模型输入参数间线性独立, 则全部模型参数对模型估计不确定性的综合作用可用(8)和(9)式计算:

$$V_{low} = V_{estim} \times \prod_j (1 - A_j \times D_j) \tag{8}$$

$$V_{up} = V_{estim} \times \prod_j (1 + A_j \times D_j) \tag{9}$$

式中,  $V_{estim}$  为模型的区域估计值,  $A_j$  为参数  $j$  的灵敏度指数,  $V_{low}$  和  $V_{up}$  分别为模型估计不确定性的下界和上界。  $D_j$  为模型参数  $j$  的相对误差, 即:

$$D_j = \frac{Err^{(j)}}{\widehat{M}^{(j)}} \tag{10}$$

公式(10)中  $Err^{(j)}$  和  $\widehat{M}^{(j)}$  分别为参数  $j$  的数据误差和估计值。对于模型的水模式参数来说,  $D_j$  的值为水模式错误的发生频率。式(8)在某些极端的情况下可能出现  $A_j \times D_j > 1$  的情况, 此时设定  $A_j \times D_j = 1$ 。

表 2 实变量初始化模型参数灵敏度分析结果

Table 2 Results of model sensitivity analysis for real type parameters

参数 Item	ln(x)		样本数 N	均值 Mean	中值 Median	ln(y)			$A_j$
	分组号 Group No.	组均值 Group Mean				最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Std.	
ln(VI)	1	-0.64	12177	2.88	2.93	0.00	5.01	0.77	
	2	-0.53	15543	2.93	2.96	-0.03	5.21	0.76	0.40
	3	-0.42	15600	2.98	3.01	0.21	5.16	0.77	0.46
	4	-0.31	17529	3.04	3.06	0.10	5.34	0.77	0.44
	5	-0.20	19915	3.09	3.11	0.25	5.43	0.78	0.58
	6	-0.09	24828	3.13	3.15	0.03	5.43	0.78	0.34
	7	0.03	24550	3.19	3.21	-0.08	5.52	0.79	0.60
	8	0.14	26770	3.24	3.26	0.41	5.67	0.79	0.46
	9	0.25	31220	3.30	3.31	0.29	5.77	0.80	0.53
	10	0.36	34888	3.36	3.37	0.32	5.88	0.80	0.55
	总计 Total		223020	3.16	3.18	-0.08	5.88	0.80	<b>0.48</b>
ln(Yield)	1	8.08	11526	2.92	2.96	0.00	5.04	0.76	
	2	8.22	12683	2.97	3.00	0.27	5.23	0.76	0.32
	3	8.36	14600	3.00	3.02	-0.03	5.11	0.77	0.23
	4	8.50	16778	3.04	3.06	-0.04	5.24	0.77	0.28
	5	8.64	19428	3.09	3.12	0.22	5.35	0.77	0.42
	6	8.78	21982	3.13	3.15	-0.08	5.51	0.78	0.27
	7	8.91	25760	3.17	3.19	0.12	5.53	0.78	0.30
	8	9.05	29727	3.21	3.23	0.21	5.56	0.79	0.30
	9	9.19	34010	3.27	3.29	0.10	5.84	0.80	0.42
	10	9.33	36526	3.32	3.32	0.13	5.88	0.81	0.31
	总计 Total		223020	3.16	3.18	-0.08	5.88	0.80	<b>0.32</b>
ln(OM <sub>n</sub> )	1	4.44	11857	2.88	2.88	-0.08	5.59	0.86	
	2	4.57	13630	2.92	2.93	-0.04	5.55	0.84	0.38
	3	4.69	15391	2.97	2.97	0.13	5.78	0.83	0.36
	4	4.82	17108	3.01	3.03	0.21	5.77	0.81	0.36
	5	4.94	19695	3.06	3.06	0.39	5.66	0.79	0.37
	6	5.07	22250	3.11	3.12	0.44	5.65	0.79	0.43
	7	5.19	25322	3.18	3.19	0.55	5.84	0.77	0.52
	8	5.32	28362	3.24	3.25	0.71	5.73	0.76	0.44
	9	5.44	32580	3.31	3.33	0.67	5.64	0.75	0.58
	10	5.57	36825	3.36	3.39	0.81	5.88	0.74	0.42
	总计 Total		223020	3.16	3.18	-0.08	5.88	0.80	<b>0.43</b>

本文的作者利用 CH4MOD 模型与 GIS 技术相结合, 模拟计算了全国 2000 年的稻田甲烷排放。2000 年中国大陆水稻种植面积为  $30.1 \times 10^6 \text{hm}^2$ , 单季稻、双季早稻和晚稻的种植面积分别为  $6.82 \times 10^6 \text{hm}^2$ 、 $7.57 \times 10^6 \text{hm}^2$  和  $15.71 \times 10^6 \text{hm}^2$ 。双季稻种植区主要在湖南、广东、广西和江西, 占全国双季稻面积的 70% 以上。计

算结果表明,2000年我国稻田甲烷排放总量为6.02 Tg,其中早稻1.63 Tg,晚稻1.46 Tg,单季稻2.93 Tg<sup>[25]</sup>。

表3 稻田水管理模式的灵敏度分析结果

Table 3 Results of model sensitivity analysis for the water management pattern parameter

水模式 Water pattern	样本数 N	y					标准差 Std.
		均值 Mean	中值 Median	最小值 Minimum	最大值 Maximum		
1	44783	33.34	30.13	1.32	150.93	18.18	
2	44636	21.04	18.66	0.92	94.50	12.54	
3	44618	25.51	23.29	1.80	103.44	13.63	
4	44455	66.83	57.64	3.43	357.27	40.67	
5	44528	14.23	12.10	1.00	73.62	8.74	
总计 Total	223020	32.17	23.99	0.92	357.27	28.60	

由于参数误差的原因,模型的估计结果具有一定程度的不确定性,为了获得这一估计不确定性的范围,依公式8、9所示,除模型的灵敏度指数外,还需要模型参数在区域上的数据误差(相对误差,见公式10)。通过对模型参数空间化过程的分析,可以得出各个参数在区域上的相对误差(表4)。

表4 模型的灵敏度指数与参数空间化误差

Table 4 Sensitivity indices and data errors of CH4MOD parameters

模型参数 Parameter	灵敏度指数 Sensitivity index	区域化数据误差 Data relative error	数据源 Data sources
SAND	0.50	0.46	中国科学院南京土壤研究所 ISS, CAS, 2004
OM	0.43	0.35	中国科学院大气物理研究所 IAP, CAS, 2004
VI	0.48	0.29 <sup>2</sup>	Huang <i>et al.</i> , 1997 <sup>[24]</sup>
GY	0.32	0.0 <sup>1</sup>	中国农业科学院 CAAS, 2001
r	0.42	0.15 <sup>2</sup>	Huang <i>et al.</i> , 1998 <sup>[1]</sup>
W <sub>0</sub>	0.08	0.39 <sup>2</sup>	中国科学院大气物理研究所 IAP, CAS, 2004

1 稻谷产量数据来源于相关的统计结果,其误差可以假设为0;2 依据文献报道进行分析的结果

利用表4中的数据 and 公式8、9可以计算出模型关于我国2000年稻田甲烷排放估计值不确定性范围为:3.09~10.61Tg。关于我国稻田甲烷的排放量,不同的研究给出的估计值差异较大。最初的估计由于其对稻田甲烷排放影响因子作用的认识局限性以及估计方法上差异,给出的估计值通常较高<sup>[26,27]</sup>。随着人们对于稻田甲烷排放机理和我国稻田耕作实践认识的进一步提高,相关的估计值也在逐渐趋于更加合理。目前的估计认为我国的稻田甲烷年排放量在3.7 Tg至12.7 Tg之间<sup>[26-31]</sup>,与本文的结果也比较一致。由于稻田水管理方式的更详细数据无法获得,本次计算未包含水管理方式误差的影响。

#### 4 结论和讨论

灵敏度指数是一个量化的指标,用于描述对于一定的模型参数变化(相对变化),模型的输出有多大程度的变化响应。本文所讨论的模型灵敏度计算方法,其模型实变量参数取值都大于0,对于参数可能取负值的情况,还需要进一步研究。依据CH4MOD模型的灵敏度指数,可以识别出哪些要素总体上说对于稻田甲烷排放具有更重要的影响。从模型参数的各个灵敏度指数来看,稻田的水管理模式是影响稻田甲烷排放的最主要因素,其次为土壤的砂粒含量、水稻品种等;稻谷产量相对来说灵敏度较低,水稻移栽时的稻田生物量是最不敏感的因素。这样的分析结果表明,改变稻田水管理方式能够非常有效地降低稻田的甲烷排放,而未来水稻增产所造成的稻田甲烷排放的可能增加能够通过改善稻田水管理、改良土壤结构以及更新水稻品种等手段得到抑制乃至消除。

总之,通过本文的分析方法得出的模型灵敏度指数能以一种量化的方式区分出CH4MOD模型各参数之间的灵敏度差异,并且这一分析结果对于采取合理措施减少稻田甲烷排放是一个重要的参考。此外,利用灵敏度指数也可以建立起模型参数区域化数据误差与模型估计不确定性之间的量化关系,用于计算模型对区域稻田甲烷排放估计结果的不确定性范围。

**References:**

- [ 1 ] Huang Y, Sass R L, and Fisher F M. A semi-empirical model of methane emission from flooded rice paddy soils, *Glob. Change Biol.*, 1998, 4: 247 ~ 268.
- [ 2 ] Cao M K, Dent J B, and Heal O W. Modeling methane emissions from rice paddies, *Global Biogeochem. Cy.*, 1995, 9:183 ~ 195.
- [ 3 ] Li C S. Modeling trace gas emission from agricultural ecosystems, *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2000, 58: 259 ~ 276.
- [ 4 ] Matthews R B, Wassmann R, and Arah J. Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emission from rice fields in Asia I. Model development, *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2000, 58: 141 ~ 159.
- [ 5 ] Bodegom P M van, Wassmann R, and Metra-Corton T M. A process-based model for methane emission predictions from flooded rice paddies, *Global Biogeochem. Cy.*, 2001, 15: 247 ~ 263.
- [ 6 ] Zhang W, Huang Y, Zheng X, *et al.* Modeling Methane Emission from Rice Paddies: Model and Modification. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2347 ~ 2352
- [ 7 ] Ding A J, Wang M X. Preliminary model for methane emission from rice fields, *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995, 19(6): 733 ~ 740.
- [ 8 ] van Bodegom P M, Leffelaar P A, Stams A J M, *et al.* Modeling methane emissions from rice fields: Variability, uncertainty, and sensitivity analysis of processes involved, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58 (1 ~ 3), 231 ~ 248.
- [ 9 ] Li C S, Mosier A, Wassmann R, *et al.* Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling, *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18, doi:10.1029/2003GB002045.
- [ 10 ] Matthews R B, Wassmann R, and Arah J. Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emission from rice fields in Asia II. Model validation and sensitivity analysis, *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2000, 58: 141 ~ 159.
- [ 11 ] Walter B P, and Heimann M. A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate, *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14 (3), 745 ~ 765.
- [ 12 ] Lynch A H, Mellwaine S, Beringer J, *et al.* An investigation of the sensitivity of a land surface model to climate change using a reduced form model, *Climate Dynamics*, 2001, 17:643 ~ 652.
- [ 13 ] Morgan M G, and Henrion M. *Uncertainty: A Guide to Dealing With Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, NY, 1990.
- [ 14 ] Xu C, Hu Y, Chang Y, *et al.* Sensitivity analysis in ecological modeling, *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6): 1056 ~ 1062.
- [ 15 ] Zhang W, Huang Y, Zheng X, *et al.* Modeling Methane Emission from Rice Paddies: Model Validation. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2679 ~ 2685.
- [ 16 ] Sass R L. Mitigation of methane emission from irrigated rice agriculture, *The Earth Observer*, 1995, 4: 64 ~ 65.
- [ 17 ] Schütz H, Holzapfel-Pschorn 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: 16405 ~ 16416.
- [ 18 ] Kern J S, Bachelet D, and Tölg M. Organic matter inputs and methane emission from soils in major rice growing regions of China, In: R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B. A. Stewart eds. *Soils and Global Chang.* Boca Raton, FL., 1995. 189 ~ 198.
- [ 19 ] Cai Z C, Tsuruta H, and Minami K. Methane emission from rice fields in China: measurements and influence factors. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 17231 ~ 17242.
- [ 20 ] Shangguan X J, and Wang M X. Possible measures for the reduction of methane emission from rice paddy fields, *Advance in Earth Sciences*, 1993, 8(5): 55 ~ 62.
- [ 21 ] Huang Y, Jiao Y, Zong L G, *et al.* Quantitative dependence of methane emission on soil properties. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64(2): 157 ~ 167.
- [ 22 ] Cai Z, Shen G, Yan X, *et al.* Impact of soil texture, temperature and Eh on methane emission from rice fields. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35: 145 ~ 153
- [ 23 ] Mishra S, Rath A K, Adhya T K, *et al.* Effect of continuous and alternate water regimes on methane efflux from rice under greenhouse conditions, *Biol. Fert. Soils*, 1997, 24:399 ~ 405
- [ 24 ] Huang Y, Sass R L, Fisher F M. Methane emission from Texas rice paddy soils 1. Quantitative multi-year dependence of CH<sub>4</sub> emission on soil, cultivar and grain yield. *Global Change Biology*, 1997, 3: 479 ~ 489
- [ 25 ] Huang Y, Zhang W, Zheng X, *et al.* Estimates of methane emission from Chinese rice paddies by linking a model to GIS database. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4):980 ~ 988.
- [ 26 ] Bachelet D, Kern K, and Tölg K. Balancing the rice carbon budget in China using a spatially-distributed data, *Ecol. Model.*, 1995, 79: 167 ~ 177.

- [27] Kern J S, Bachelet D, and Tölg M. Organic matter inputs and methane emission from soils in major rice growing regions of China. In: *Soils and Global Change*, edited by R. Lal, J. Kimble, E. Levine and B.A. Stewart), Boca Raton, FL., 1995. 189 ~ 198.
- [28] Huang Y, Sass R L, and Fisher F M. Modeling methane emission from rice paddy soils II: model validation and application, *Pedosphere*, 1999, 9(1): 11 ~ 24.
- [29] Matthews R B, Wassmann R, Knox J W, *et al.* Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emission from rice fields in Asia. IV: Upscaling to national levels. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2000, 58: 201 ~ 207.
- [30] Li C S, *et al.* Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980 ~ 2000. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(20): 1972 ~ 1975.
- [31] Yan X, Cai Z C, Toshimasa O and Hajime A. Methane emission from rice fields in mainland China: Amount and seasonal and spatial distribution. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108; NO. D16, 4505, doi:10.1029/2002JD003182.

#### 参考文献:

- [6] 张稳, 黄耀, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放模型研究——模型及其修正. *生态学报*, 2004, 24(11): 2347 ~ 2352.
- [7] 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.
- [14] 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 等. 生态模型的灵敏度分析. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1056 ~ 1062.
- [15] 张稳, 黄耀, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放模型研究——模型的验证. *生态学报*, 2004, 24(12): 2347 ~ 2352.
- [20] 上官行健, 王明星. 稻田 CH<sub>4</sub> 排放的控制措施. *地球科学进展*, 1993, 8(5): 55 ~ 62.
- [21] 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. *土壤学报*, 1998, 35: 145 ~ 153.
- [25] 黄耀, 张稳, 郑循华, 等. 基于模型和 GIS 技术的中国稻田甲烷排放估计. *生态学报*, 2006, 26(4): 980 ~ 988.