

基于模型和 GIS 技术的中国稻田甲烷排放估计

黄 耀, 张 稳, 郑循华, 韩圣慧, 于永强

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 将一个比较成熟的稻田甲烷排放模型 CH₄MOD 和 GIS 空间化数据库结合, 模拟估计了中国大陆 2000 年水稻生长季稻田甲烷的排放。模型的空间输入参数包括: 逐日气温、耕层土壤砂粒含量、外源有机质施用量、稻田水分管理模式、水稻移栽期与收获期、水稻种植面积与单产, 空间分辨率为 10km × 10km。模拟结果表明: 2000 年稻田甲烷排放量为 6.02Tg, 其中: 早稻生长季排放 1.63Tg、晚稻 1.46Tg、单季稻 2.93Tg。提高区域稻田甲烷排放估计精度的进一步目标应放在减小输入参数误差和提高空间数据精度上, 在现有数据库基础和模型——GIS 技术下探讨我国稻田甲烷排放估计的不确定性范围是必要的。

关键词: CH₄MOD; GIS; 模型; 稻田; 甲烷

文章编号: 1000-0933(2006)04-0980-09 中图分类号: Q142 文献标识码: A

Estimates of methane emission from Chinese rice paddies by linking a model to GIS database

HUANG Yao, ZHANG Wen, ZHENG Xun-Hua, HAN Sheng-Hui, YU Yong-Qiang (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 980 ~ 988.

Abstract: Methane is one of the principal greenhouse gases. Irrigated rice paddies are recognized to contribute to the atmospheric methane concentration. Methane emission from rice paddies is among the most uncertain estimates of the agricultural sector in rice-growing countries. Efforts have been made over the last decade to estimate CH₄ emission from Chinese rice paddies via model method. However, these estimates showed great uncertainties due to different models and up scaling methods. Reduction in the uncertainties might be achieved by coupling field-scale model to regional databases. The objective of this paper is to develop a methodology of coupling a CH₄ emission model to regional databases by which the CH₄ emission from Chinese rice paddies is then estimated.

CH₄MOD, a model for simulating CH₄ emission from rice paddies with a minimal number of inputs and parameters that are commonly available, is of great potential for up scaling as it has provided a realistic estimate of the observed results from various soils, climates and agricultural practices. By linking spatial databases to CH₄MOD, CH₄ emission from Chinese paddies in 2000 rice-growing season was simulated with a daily step. The spatial databases were created by GIS with a spatial resolution of 10km × 10km, which include soil sand percentage, amounts of crop straw and roots from previous season as well as farm manure, water management pattern, dates of rice transplanting and harvesting, acreage of rice planted, rice grain yield and daily air temperature. The software of ArcGIS was used for all of the GIS needs, including the data access, the projection definition, the overlaying of

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); 联合国全球环境基金项目(CPR/00/G31/A/1G/99)

收稿日期: 2005-01-18; **修订日期:** 2005-10-15

作者简介: 黄耀(1956-), 男, 江苏省人, 博士, 教授, 主要从事陆地碳氮循环模型与全球变化研究. E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

致谢: 感谢中国科学院资源环境科学数据中心提供部分基础数据, 同时感谢中国气象局气象信息中心为本研究提供气象数据

Foundation item: The project was supported by Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01-13), Global Environmental Facility of United Nations(CPR/00/G31/A/1G/99)

Received date: 2005-01-18; **Accepted date:** 2005-10-15

Biography: HUANG Yao, Ph.D., Professor, mainly engaged in modeling terrestrial carbon and nitrogen cycling and global change. E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

Acknowledgments: Thanks were given to the Resources and Environmental Science Data Center, Chinese Academy of Sciences, and also to the National Meteorological Information Center of China Meteorological Administration for the data supports

different vector layers, the creation of grids (an raster format of ArcGIS software) by converting vector data, and the conversion of data between grid and ASCII formats.

Methane emission from rice paddies of mainland China in 2000 rice-growing season was estimated to be 6.02 Tg (1 Tg = 10^9 kg). (1.46Tg) are from the early-rice and the late-rice growing seasons, respectively.

It was concluded that regional CH_4 emission from rice paddies could be estimated by coupling CH4MOD to regional databases with a high spatial resolution. A further effort should be focused on improving the quality of the spatial databases, especially in the amount of added organic matter and water regime. It is also necessary to evaluate the uncertainties of the present estimates by which the way to improving accuracy could be approached.

Key words: CH4MOD; GIS; model; rice paddy; methane

由大气中温室气体浓度增加导致的全球变暖是当今国际社会普遍关注的重要议题。甲烷(CH_4)是重要的温室气体之一,在 100 年时间尺度上,单位质量 CH_4 的全球增温潜势(GWP, Global Warming Potential)是 CO_2 的 23 倍。灌溉稻田是大气 CH_4 的重要来源^[1],政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change)就各国编制稻田 CH_4 排放清单具有明确的要求(IPCC, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>)。我国是水稻种植大国,水稻总产与种植面积分别占全球的 34% 和 22%(FAO, <http://apps.fao.org/>),客观估计我国稻田 CH_4 排放量对于评价区域乃至全球稻田对大气 CH_4 浓度的贡献具有积极意义。

早期的中国稻田 CH_4 排放估计是通过大田观测数据外推到全国尺度^[2],随着人们对 CH_4 排放机理的进一步认识,模型方法逐步成为估计区域乃至全球尺度 CH_4 排放的重要工具^[3]。由于模型研制者所关注的侧重点以及空间化方案不同,不同学者对中国稻田 CH_4 排放的估计有较大的差异。Bachelet 等^[4]将统计模型与联合国粮农组织的土壤图相联结,估计中国稻田 CH_4 排放量为 9.33 ~ 21.33Tg/a; Matthews 和 Knox 等利用他们开发的 MERES 模型,根据中国 10 个气象站的逐日气象资料和以省(市、自治区)为基本行政单元的土壤数据和水稻种植面积等^[5]估计的 CH_4 排放量为 3.35 ~ 8.64Tg/a^[6]; Li 等^[7]利用 DNDC 模型,以县为基本行政单元,估算在持续灌溉条件下中国稻田 CH_4 排放量为 8.53 ~ 16.00Tg/a,烤田条件下的排放量为 2.27 ~ 10.53Tg/a。

利用模型估计国家尺度稻田 CH_4 排放的可信性至少取决于 2 个方面:模型的有效性和输入参数空间化的可靠性。模型有效性的评价在于该模型是否在不同的气候、土壤和人为影响(如农业管理)下均有效;输入参数空间化可靠与否在于参数(如有机肥施用量)本身的质量以及经尺度转换后在数值上是否代表该区域(网格)的真实情况或接近真实情况。基于对稻田 CH_4 产生、氧化和排放过程的认识,建立和完善了稻田 CH_4 模型(CH4MOD)^[8-10]。对覆盖全国主要水稻产区的 94 个甲烷排放观测案例的验证结果表明,CH4MOD 可以有效地模拟不同气候、土壤及农业管理下的稻田甲烷排放,具有广泛的适应性和很好的解释性^[9,11]。该模型具有输入参数少和易于获得的优点,可通过连接空间化输入参数来估计区域尺度的稻田甲烷排放。GIS (Geographical Information System)是管理和研究空间数据的技术系统,它可以对空间数据按地理坐标或空间位置进行多种处理和综合分析,并以地图、图形或数据的形式表示处理的结果。本文采用 GIS 对输入参数进行空间化处理,并将其与 CH4MOD 连接,模拟估计我国稻田甲烷排放及其空间分布,主要目的是为编制国家稻田 CH_4 排放清单以及制定减排措施提供依据。

1 技术与方法

1.1 CH4MOD 模型与 GIS 相结合的技术流程

CH4MOD 模型^[9,10]由 2 个子模块组成:(1)甲烷基质供应子模块:模拟水稻植株根系分泌物的释放及外源有机物(包括前作残茬、作物秸秆、有机肥等)的分解过程;(2)甲烷产生与排放子模块:模拟 CH_4 的产生过程及通过水稻植株和气泡逸出的排放过程。 CH_4 的产生和排放过程受环境因子和植物生长的影响,主要环境因

子为土壤砂粒含量、土壤温度和氧化还原电位^[9,10]。

为实现 CH4MOD 的区域化应用,将目标区域按一定的空间化方案划分成若干基本空间单元的组合(不规则单元或规则的栅格),各基本单元含有且仅有一组运行模型所需要的输入参数和变量,通过在各基本单元运行 CH4MOD 获得该单元的 CH₄ 排放量。CH4MOD 的基本输入参数包括土壤砂粒百分含量、水稻(分为单季稻、双季早稻和晚稻)单产、外源有机物(秸秆还田和农家肥等)施用量和前茬作物的根茬残留量。动态驱动变量包括作物生长、逐日土壤温度和氧化还原电位。作物生长用 logistic 生长方程通过水稻单产进行模拟,逐日土壤温度通过气温计算,土壤氧化还原电位根据稻田水分管理方式等进行模拟。水稻移栽期和收获期为模型运行时段的控制变量。图 1 为 CH4MOD 模型与 GIS 相结合的技术流程。

采用 ESRI 的 ArcGIS 进行模型参数数据库处理,包括投影定义、矢量图匹配、矢量数据栅格化、栅格文件和 ASCII 文件互转、制作专题图以及空间差异分析等;模型运算代码用 Delphi 结合 ODBC 技术编写。

1.2 目标区域的空间划分框架

与其它相关研究中采用不规则单元不同,本研究采用正方形栅格方式的空间划分方案,覆盖区域为中国大陆。从计算水稻播种面积等方面考虑,栅格系统采用 Albers 等面积圆锥投影系统,有关参数为:投影类型:Albers 等面积圆锥投影(Albers Equal Area);度量单位:米;椭球:克拉索夫斯基;第一标准纬线:25°N;第二标准纬线:47°N;中央经线:105°E;投影坐标原点纬度:0°N;纵、横轴偏移量均为 0。

在上述的坐标系统下,按照栅格方案的特点,本研究的目标区域为一个矩形,左下角坐标:(X_L, Y_L) = (-2838000, 1875000)、右上角坐标:(X_U, Y_U) = (2472000, 6075000)。该矩形中包括陆地的部分为有效目标区域,其它部分为无效目标区域。将目标区域进一步划分成若干等大小的 10km × 10km 基本空间单元,整个目标区域的栅格行列数为 420 行 × 531 列,共 223020 个基本空间单元,其中有效单元数为 97182(有些单元跨越国界)。

为了实现模型参数数据库的空间化,除必需的模型输入参数数据库外,还需要一些辅助性的数据。方案中涉及的辅助数据库包括全国省(县级)行政区划空间数据库和数字地面高程。行政区划空间数据库是一个带有行政区划名称和国家标准行政编码的属性数据库,比例尺为 1:100000,是其它非空间数据(主要是各种统计数据)栅格化的空间索引。数字地面高程(DEM)来源于国家测绘局 1:250000 比例尺地形图的等高线,经地面高程模型计算建立的 10km × 10km 栅格化中国地面高程数据。

1.3 数据源与栅格化算法

1.3.1 逐日气温 2000 年逐日气温来自国家气象局 381 个站点的常规观测,在空间上呈点状的离散分布。为获得各基本空间单元的逐日气温,采用 Thornton 等给出的气温插值算法^[12],利用高斯滤波算子作为距离权重方程(式 1),并进行高差订正:

$$W_{(r)} = \begin{cases} 0 & r > R_p \\ \exp\left[-\left(\frac{r}{R_p}\right)^2 \alpha\right] - e^{-\alpha} & r \leq R_p \end{cases} \quad (1)$$

式中, $W_{(r)}$ 为当观测值点与目标点水平距离为 r 时,观测值对目标点的贡献权重因子; R_p 为高斯算子的截断距离; α 是一个与要素的空间距离相关性衰减率有关的参数。 α 值越大,表明插值要素的空间距离相关性的衰减率越高。由于气温的空间相关性较高,其 α 值也较小($\alpha = 3.0$)。截断距离 R_p 在 Thornton 的算法中是一个随着插值源数据的局域分布密度变化的参数,源数据的局域密度越高, R_p 的取值也越小^[12]。气温的高差订正采用逐日建立的线性回归方程完成。

1.3.2 土壤砂粒含量 土壤砂粒含量数据来源于全国第二次土壤普查的结果,剖面点数据经准确的经纬度坐标定位后用于空间化算法的数据源。采用与土壤类型数据进行空间叠加处理的方法形成覆盖全国的耕作层砂粒含量。

1.3.3 水稻物候 水稻(单季稻、双季早稻和晚稻)移栽和收获期来源于张福春等主编的《中国农业气候图

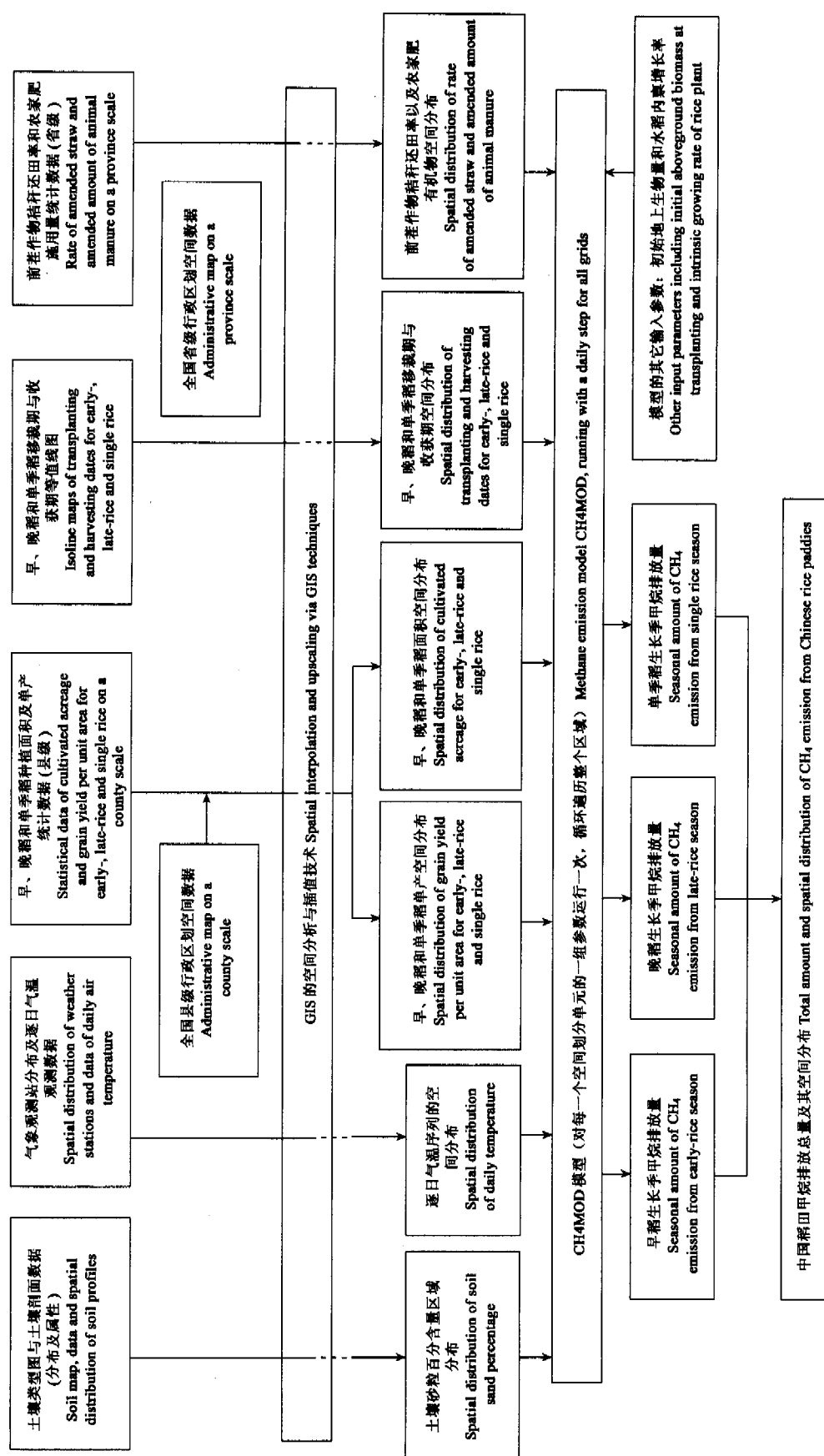


图 1 CH4MOD 模型与 GIS 相结合的中国稻田甲烷排放估算技术流程
Fig.1 Working routine of coupling CH4MOD with GIS for estimating CH4 emission from Chinese rice paddies

集》^[13]的空间分布等值线图,它的栅格化算法参照比较成熟的等高线生成 DEM 的算法。各种物候日期统一为儒略日(元月 1 号的儒略日序为 1),然后再利用 GIS 技术通过等值线构造不规则三角网,并由此转换到栅格形式。

1.3.4 水稻种植面积与单产 水稻种植面积和单产来自以县级行政单元为基础的农业统计资料,中国稻田面积空间分布来自中国科学院地理科学与资源研究所的中国土地利用 1km 栅格数据集,并重新经过 10km × 10km 栅格合成。水稻种植面积和单产栅格化的基本方案是:借助于比例尺为 1:100000 的全国县级行政边界空间数据,建立水稻统计数据与行政边界空间数据之间的关联,然后通过行政边界空间数据与中国稻田空间分布数据进行空间叠加,利用面积权重法计算每一个栅格的早、中、晚稻的种植面积与单产。

1.3.5 外源有机质 稻田有机质主要来源于 3 个途径:前季作物根茬残留、秸秆还田和农家肥(包括厩肥、人和动物的粪尿肥等)。前季作物残留包括作物根系和地上的短茬,综合赵强基等^[14]的测定数据,短茬的生物量约为作物秸秆量的 13%,根冠比平均为 0.1。作物秸秆量和根系重量通过收获作物的产量、草谷比和根冠比求得:作物秸秆量 = 草谷比 × 产量,根系重量 = 根冠比 × (作物秸秆量 + 产量)。不同作物的草谷比参考张福春等^[15]的研究结果。秸秆还田量通过秸秆收获量乘以还田率进行估算,扣除短茬自然还田,秸秆收获量为作物秸秆量的 87%。秸秆还田率和农家肥施用量通过农户抽样调查获得,有效样本 300 余个,表 1 为抽样调查的汇总结果。可以看出,秸秆还田率和农家肥施用量具有很大的空间变异。

表 1 稻田秸秆利用及农家肥施用

Table 1 Amendment of previous crop straw and animal manure

行政区域 Administrative region	秸秆还田率 Rate of straw amended(%)	农家肥施用量 Animal manure (kg C/hm ²)	行政区域 Administrative region	秸秆还田率 Rate of straw amended(%)	农家肥施用量 Animal manure (kg C/hm ²)
北京 Beijing	14	60	湖北 Hubei	15	700
天津 Tianjin	14	60	湖南 Hunan	27	470
河北 Hebei	14	340	广东 Guangdong	25	310
山西 Shanxi	14	340	广西 Guangxi	30	590
内蒙 Inner Mongolia	4	260	海南 Hainan	33	220
辽宁 Liaonin	4	260	重庆 Chongqing	17	500
吉林 Jiling	3	120	四川 Sichuan	8	480
黑龙江 Heilongjiang	33	300	贵州 Guizhou	24	780
上海 Shanghai	15	1000	云南 Yunnan	9	610
江苏 Jiangsu	15	1000	西藏 Tibet	9	610
浙江 Zhejiang	25	450	陕西 Shan'xi	10	890
安徽 Anhui	14	330	甘肃 Gansu	10	890
福建 Fujian	15	130	青海* Qinghai	—	—
江西 Jiangxi	27	460	宁夏 Ninxia	10	890
山东 Shandong	14	340	新疆 Xinjiang	10	890
河南 He'nan	14	340			

* 无水稻种植 No rice planted in Qinghai Province

将表 1 的秸秆还田率连接到省级行政区划空间数据,然后按照简单面积权重法获得栅格化的秸秆还田率,继而通过秸秆收获量求得各栅格的秸秆还田量。各栅格的农家肥施用量也通过简单面积权重法获得。各栅格前季作物根茬残留通过空间化的作物单产(1.3.4 节)求得。

2 模型的输入与运行

模型的空间化输入包括:逐日气温(1.3.1 节)、土壤砂粒含量(1.3.2 节)、水稻移栽期与收获期(1.3.3 节)、水稻种植面积与单产(1.3.4 节)、外源有机质(1.3.5 节)。其它输入参数包括水稻移栽期地上生物量、水稻生长的内禀增长率及稻田水分管理模式。水稻移栽期地上生物量取常数 15g/m²^[16],单季稻和双季稻的内禀增长率分别取 0.08 和 0.1 d⁻¹^[10]。参照高亮之和李林^[17]的研究结果,对不同水稻种植制度采用不同的水分管理模式运行模型以获得稻田土壤的氧化还原电位。早稻和晚稻的水分管理模式分别为:灌溉-烤田-复水灌

溉-间歇灌溉、灌溉-烤田-间歇灌溉;中稻(单季稻)水分管理模式为:灌溉-烤田-复水灌溉-间歇灌溉(北方稻区)、灌溉-烤田-间歇灌溉(南方稻区);华中及西南的部分冬水田为持续淹水管理模式。

利用 CH4MOD 按栅格分别模拟单季稻、双季早稻和晚稻生长季的甲烷排放。在每一个栅格上,模型从水稻移栽之日起,逐日运行至水稻收获。将单季稻、双季早稻和晚稻的逐日排放通量分别累加得到各自单位面积的季节排放量,将其乘以该栅格的播种面积得到各自的排放总量,将各排放总量累加得到该栅格的甲烷排放量,累加各栅格的甲烷排放量得到全国总量。

3 2000 年中国稻田甲烷排放

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 $15.71 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $6.82 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 和 $7.57 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。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。

图 2 为中国大陆稻田甲烷排放通量(以每生长季单位面积排放量计)和年总量的空间分布。双季早稻排放通量的高值区在湖南东部、广西东南部和广东西南部(图 2a);双季晚稻在广西东南部和广东西南部(图 2b);单季稻在两湖地区(图 2c)。2000 年我国大陆水稻生长季稻田甲烷排放总量为 6.02Tg(图 2d),其中双季早稻排放 1.63Tg、双季晚稻 1.46Tg、单季稻 2.93Tg。双季稻排放总量的高值区在湖南、江西和两广地区;单季稻在江苏、安徽、两湖地区和四川东部。排放量较高的省份为四川、湖南、湖北、广东、广西、江苏和江西,占全国总量的 68%,水稻种植面积占全国的 60%(图 3)。四川、湖南和湖北省甲烷排放高的主要原因是冬水田面积较大,冬水田促进甲烷排放^[18]。

对 53311 个有水稻种植的栅格的统计结果表明,我国水稻生长季甲烷排放通量主要出现在 $50 \sim 300 \text{ kg/hm}^2$ (图 4),占 90% 以上,这与王明星^[19]对 214 个稻田甲烷排放通量的频率分析结果较为一致。

4 讨论

4.1 国内外基于模型的稻田甲烷排放估计

模型的解释性/有效性和空间参数的代表性是判断国家尺度稻田 CH_4 排放估计值可信与否的前提。Bachelet 等基于统计模型与联合国粮农组织的土壤图,根据土壤有机碳含量和秸秆还田量估计了中国稻田 CH_4 排放^[4]。然而,有研究表明,稻田 CH_4 排放与土壤有机碳含量不具有明显的相关关系^[20],而水稻的光合产物则是稻田 CH_4 产生的重要基质^[21,22]。气候和土壤是稻田 CH_4 模型的主要空间输入参数,他们具有极大的空间异质性,提高空间插值的分辨率是减小 CH_4 排放估计误差的一个重要途径。Li 等^[7]以县(市)为基本行政单元、Matthews 和 Knox 等则以省(市、自治区)为基本行政单元^[5]和 10 个气象站的资料估计了中国稻田 CH_4 排放^[6]。显然,用低分辨率的气候和土壤空间插值作为输入参数来估计国家尺度的稻田 CH_4 排放存在极大的不确定性。

本文所采用的模型(CH4MOD)对覆盖中国主要水稻产区的 94 个甲烷排放观测案例进行了验证^[9,11],这也是国际上目前唯一经过大样本检验的稻田 CH_4 模型,其初级版本^[8]便得到 IPCC 国家温室气体排放清单编制指南^[3]的充分肯定。与国际同类研究相比,本文的气候和土壤参数具有较高的空间分辨率($10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$)。就模型的解释性/有效性和空间参数的代表性而言,本文估计的中国稻田 CH_4 排放具有较高的可信性。采用与本文相同的方法,编制了中国 1994 年稻田 CH_4 排放清单,并已通过《中华人民共和国气候变化初始国家信息通报》^[23]提交给联合国。

4.2 估计误差和不确定性的可能来源

在利用模型及 GIS 技术相结合的方法估计区域稻田甲烷排放时,由于模型的某些参数没有实测数据库的支持,往往采用经验性假定的处理方法,这些经验性假定在提高模型适用性的同时也增大了估计的不确定性范围。基于模型和 GIS 技术的中国稻田甲烷排放估计误差和不确定性可能会来自 4 个方面:

(1)模型精度 虽然 CH4MOD 被大量观测数据检验证明是有效的^[9,11],但该模型毕竟是对稻田甲烷产生、氧化及排放过程的抽象和简化。由于这些过程的复杂性,模型的机理表达总存在一定程度的简化,忽略一些

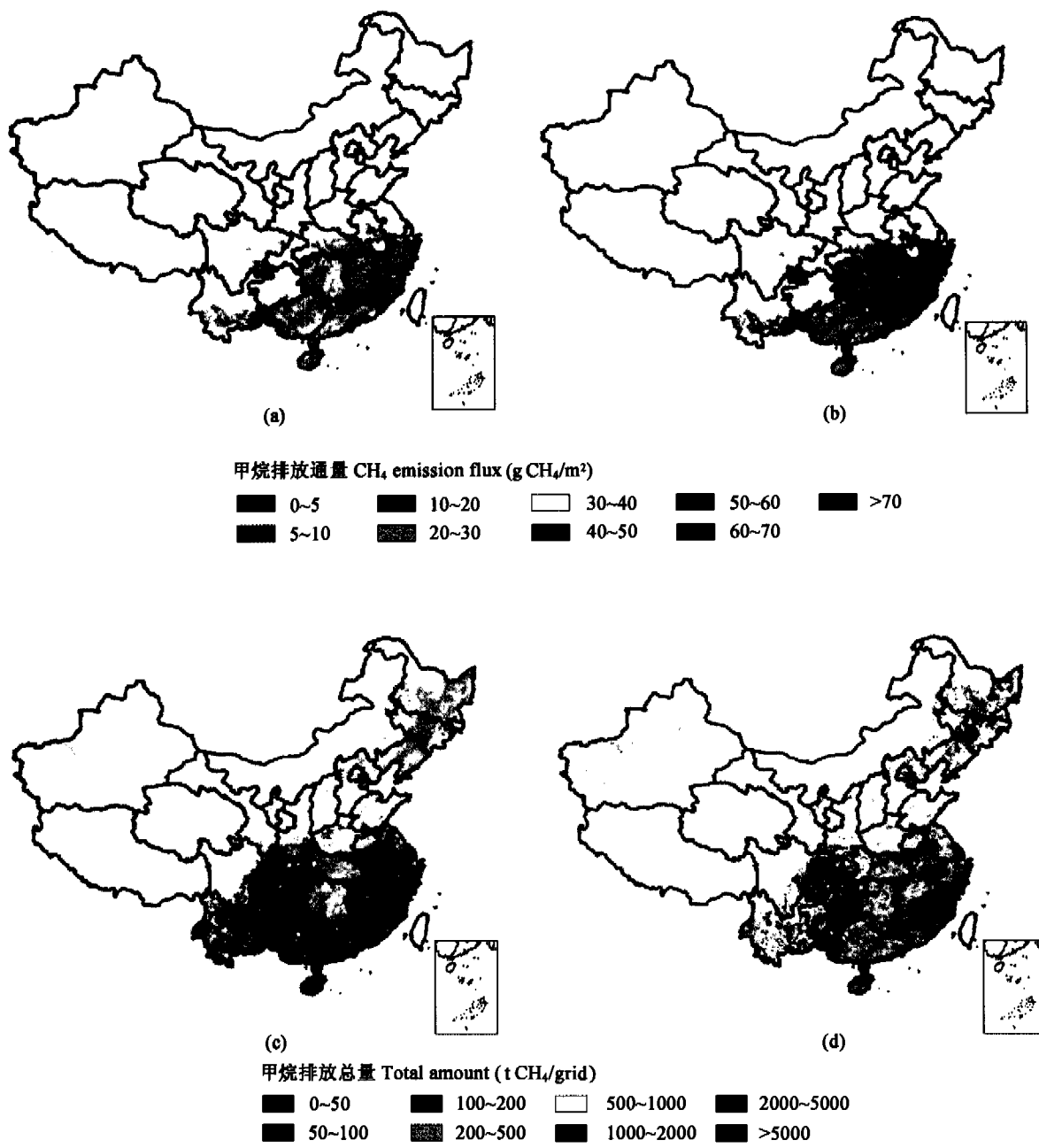


图2 中国稻田甲烷排放通量和总量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of CH_4 emission flux and total amount in Chinese rice paddies

(a) 早稻甲烷通量 CH_4 flux from early-rice; (b) 晚稻甲烷通量 CH_4 flux from late-rice;
(c) 单季稻甲烷通量 CH_4 flux from single rice; (d) 总量 total amount

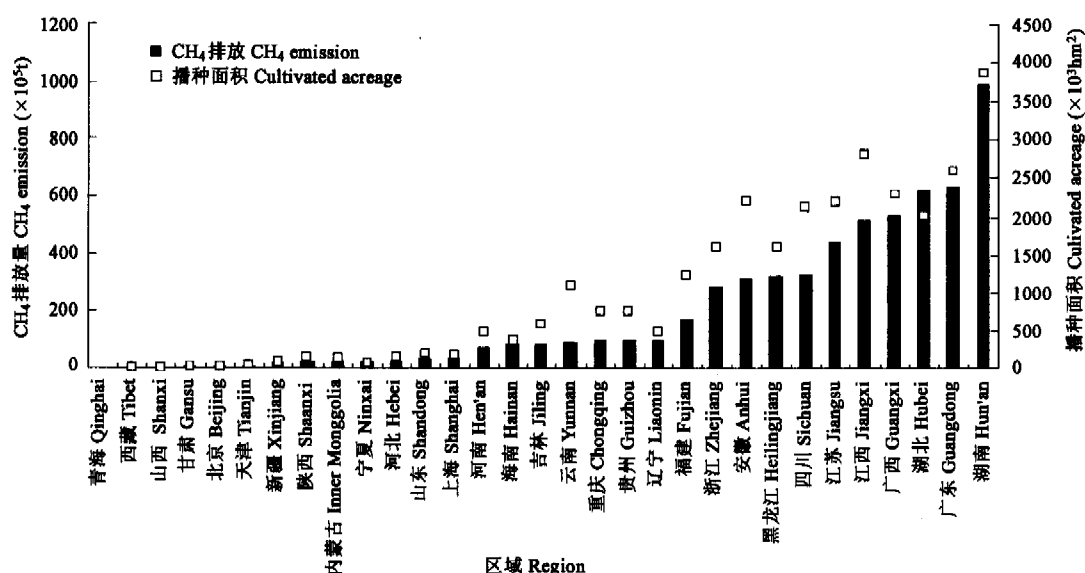


图3 省级区域甲烷排放总量与水稻种植面积

Fig.3 CH₄ emission and cultivated acreage of rice on a province scale

非决定性的细节过程,这可能导致模型的估计误差。理论上讲,对机理描述得越细致,模型的精度越高。然而,模型的精度往往相悖于模型的普遍适用性。一般情况下,精度越高的模型所需的输入参数越多,而这些输入参数通常在大尺度空间范围内难以获得。

(2)输入参数 影响稻田甲烷排放的两个主要因素是有机肥施用和水分管理,这也是模型运行的关键输入参数。通过农户抽样调查获得秸秆还田率和农家肥施用量(表1),但这些数据却不足以代表全国主要水稻产

区的情况。至于稻田水分管理模式,总体上考虑了稻田水管理的一般情况,但是更精确的稻田水管理模式数据库将有助于提高估算精度,降低模型对年排放量估计的误差。数据质量误差是观测值本身的误差,对于已经存在的观测数据,这种误差是既定的并最终影响模型对区域状况的估计。

(3)非均衡性误差 为了实现甲烷模型的区域化应用,总要将目标区域按照一定的空间划分方案划分为一些基本空间单元的组(不规则单元或规则的栅格)。每一个基本单元含有且仅有一组模型所需要的输入参数,将模型应用于每一个基本单元来获得该单元的模型计算结果。这种模型的空间应用方案含有一个基本假设,即任何参数在每一个基本空间单元内的分布是均匀的。这种假设来自参数观测值的有限空间密度(如气象站的空间分布),因为目前无法获得更加细致的空间状况。事实上,在一定的空间分辨率下(如本文采用的10km×10km栅格),每一个基本空间单元的参数并不是均匀分布的,因此均匀分布假设同样会造成甲烷模型估计的最终误差。

(4)GIS的空间插值技术及参数空间化 利用GIS技术对模型参数数据库进行的空间化栅格处理为模型区域化运行提供了完备的参数数据集。由于参数原始数据库以及数据空间化技术的局限性,从原始数据库向空间化栅格数据库的转换不可避免地导致数据误差,进而造成模型估计结果的不确定性。这种数据误差随参数性质、实测数据空间密度以及空间化方法的不同而有很大差异。例如气温要素,大气的高流动性使得该要素的空间相关性相对较高,选用适当的空间插值算法^[12]可以令其空间化处理的误差很低(5.69%)。同样是测点式分布的土壤剖面数据,由于土壤的空间变异比大气大的多,虽然土壤剖面点远比气温观测点(381)多,

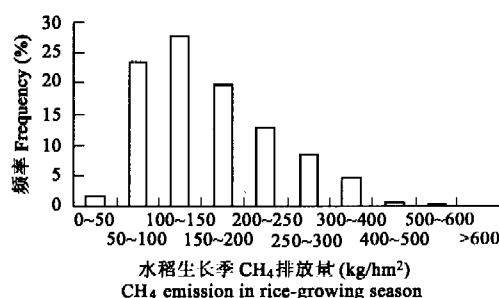


图4 中国稻田甲烷排放通量频率分布

Fig.4 Frequency distribution of CH₄ flux occurred at different levels

但其插值结果的数据误差(45.8%)却大的多。

通过上述分析,可以看出本文估计的稻田甲烷排放量具有较大的不确定性。因此,在现有的数据库基础和模型——GIS 技术下,根据误差的来源进一步探讨我国稻田甲烷排放估计的不确定性是必要的。

5 结论

区域尺度稻田甲烷排放的估计可通过 CH4MOD 模型和 GIS 空间数据库相结合的技术来实现。中国大陆 2000 年水稻生长季的稻田甲烷排放量为 6.02Tg,其中:双季早稻排放 1.63Tg、晚稻 1.46Tg、单季稻 2.93Tg。未来应对模型精度、输入参数、非均衡性误差和 GIS 空间插值技术及参数空间化过程中产生的误差和区域稻田甲烷排放估计的不确定性进行深入研究。

References:

- [1] Intergovernmental Panel of Climate Change. Climate Change, 2001. <http://www.ipcc.ch/>.
- [2] Wang M X, Dai A J and Shangguan X J. Sources of methane in China. In: K. Minami, A. Mosier and R. Sass eds. CH₄ and N₂O: Global Emissions and Controls from Rice Fields and Other Agricultural and Industrial Sources, YOKENDO Publishers, Tokyo, 1994. 9 ~ 26.
- [3] Intergovernmental Panel of Climate Change. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>.
- [4] Bachelet D, Kern J, Tolg M. Balancing the rice carbon budget in China using a spatially-distributed data. Ecological Modeling, 1995, 79:167 ~ 177.
- [5] Knox J W, Matthews R B, Wassmann R. Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in Asia III. Databases. Nutr Cycling Agroecosyst, 2000, 58 (1-3):179 ~ 199.
- [6] Matthews R B, Wassmann R, Knox J W, et al. Using a crop/soil simulation model and GIS techniques to assess methane emissions from rice fields in Asia. IV. Upscaling to national levels. Nutr Cycling Agroecosyst, 2000, 58 (1-3): 201 ~ 217.
- [7] Li C S, Mosier A, Wassmann R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling. Global Biogeochem Cycles, 2004, 18: GB1043, doi:10.1029/2003GB002045.
- [8] Huang Y, Sass R L and Fisher F M. A semi-empirical model of methane emission from flooded rice paddy soils. Global Change Biol, 1998, 4:247 ~ 268.
- [9] Huang Y, Zhang W, Zheng X H, et al. Modeling methane emission from rice paddies with various agricultural practices. J. Geophys. Res., 2004, 109: D08113, doi:10.1029/2003JD004401.
- [10] Zhang W, Huang Y, Zheng X H, et al. Modeling methane emission from rice paddies: Model and modification. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2347 ~ 2352.
- [11] Zhang W, Huang Y, Zheng X H, et al. Modeling methane emission from rice paddies: Model validation. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2679 ~ 2685.
- [12] Thornton P E, Running S W and White M A. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. Journal of Hydrology, 1997, 190: 214 ~ 251.
- [13] Zhang F C, Wang D H, Qiu B J. Map of Agro-Climate in China. Beijing: Science Press, 1987.
- [14] Zhao Q J, Li Q K. Presents and Prospects of Crop Straw Application in Southern China. In: Liu X H, Gao W S and Zhu W S eds. Mechanism and Techniques in Straw Application. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2001. 138 ~ 146.
- [15] Zhang F C, Zhu Z H. Harvest Index for Various Crops in China. Scientia Agricultural Sinica, 1990, 23(2):83 ~ 87.
- [16] Gao L Z, Jin Z Q, Huang Y, et al. eds. Rice Cultivational Simulation, Optimization and Decision Making System. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992.
- [17] Gao L Z and Li L eds. Meteorological Ecology of Rice Crop. Beijing: China Agricultural Press, 1992.
- [18] Cai Z C, Tsuruta H, Gao M, et al. Options for mitigating methane emission from a permanently flooded rice field. Global Change Biol, 2003, 9: 37 ~ 44.
- [19] Wang M X ed. Methane Emission from Chinese Rice Paddies. Beijing: Science Press, 2001. 141 ~ 150.
- [20] Huang Y, Jiao Y, Zong L G, Zheng X H, Sass R L and Fisher F M. Quantitative dependence of methane emission on soil properties. Nutr Cycling Agroecosyst, 2002, 64(1-2): 157-167.
- [21] Huang Y, Sass R L and Fisher F M. Methane emission from Texas rice paddy soils 1. Quantitative multi-year dependence of CH₄ emission on soil, cultivar and grain yield. Global Change Biol, 1997, 3:479 ~ 489.
- [22] Huang Y, Sass R L and Fisher F M. Methane emission from Texas rice paddy soils 2. Seasonal contribution of rice biomass production to CH₄ emission. Global Change Biol, 1997, 3:491 ~ 500.
- [23] The People's Republic of China Initial National Communication on Climate Change. Beijing: China Planning Press, 2004. 13 ~ 21.

参考文献:

- [10] 张稳, 黄耀, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放的模型研究——模型及其修正, 生态学报, 2004, 24(11):2347 ~ 2352.
- [11] 张稳, 黄耀, 郑循华, 等. 稻田甲烷排放的模型研究——模型的验证, 生态学报, 2004, 24(12):2679 ~ 2685.
- [13] 张福春, 王德辉, 丘宝剑. 中国农业气候图集. 北京: 科学出版社, 1987.
- [14] 赵强基, 李庆康. 南方稻区秸秆还田状况与展望. 见: 刘巽浩, 高旺盛, 朱文珊 主编. 秸秆还田的机理与技术模式. 北京: 中国农业出版社, 2001. 138 ~ 146.
- [15] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数. 中国农业科学, 1990, 23(2):83 ~ 87.
- [16] 高亮之, 金之庆, 黄耀, 等. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- [17] 高亮之, 李林. 水稻气象生态. 北京: 中国农业出版社, 1992.
- [19] 王明星. 中国稻田甲烷排放. 北京: 科学出版社, 2001. 141 ~ 150.
- [23] 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报. 北京: 中国计划出版社, 2004. 13 ~ 21.