

稻田甲烷排放模型研究

——模型的验证

张 稳¹, 黄 耀^{1,2*}, 郑循华², 李 晶², 于永强²

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要:模型的有效性检验是模型应用于估计区域尺度稻田甲烷排放量的基本前提, 尤其是针对多种不同的土壤、气候以及农业管理方式等可能影响稻田甲烷排放的环境条件下的模型检验。利用覆盖全国主要水稻产区的 94 个甲烷排放观测案例对稻田甲烷排放模型(CH4MOD)进行了验证。这些观测区域分布范围北至北京(40°30'N, 116°25'E), 南至广州(23°08'N, 113°20'E), 东起杭州(30°19'N, 120°12'E), 西到四川的土主(29°40'N, 103°50'E)。既有双季稻, 也有单季稻, 稻田灌溉及施肥方式也多种多样, 对我国水稻生产具有较广泛的代表性。观测获得的稻田甲烷排放季节总量从 3.1 kgC/hm² 到 761.7 kgC/hm², 平均值为 199.4(±187.3) kgC/hm²; 相应的模拟值分别为 13.9、824.3 和 224.6(±187.0)kgC/hm²。模拟值与实测值的线性相关系数(r^2)为 0.84($n=94, p<0.001$)。CH4MOD 模型能够通过较少的输入参数有效地模拟我国主要农作方式下的稻田甲烷排放。

关键词:CH4MOD; 模型; 甲烷排放; 稻田; 验证

Modeling methane emission from rice paddies: Model validation

ZHANG Wen¹, HUANG Yao^{1,2}, ZHENG Xun-Hua², LI Jing², YU Yong-Qiang² (1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2679~2685.

Abstract: Several models have been developed over the past decade to estimate methane emission from rice paddies. However, few models have been validated against field measurements with various parameters of soil, climate and agricultural practice. Thus, reliability of the model's performance remains questionable particularly when extrapolating the model from site micro-scale to regional scale. The objective of this paper is to validate a model that is dedicated to simulating methane emission from rice paddies, and hence to evaluate the model performance.

The model, named as CH4MOD, was validated against a total of 94 field observations conducted in China. These observations covered main rice cultivation regions from northern (Beijing, 40°30'N, 116°25'E) to southern China (Guangzhou, 23°08'N, 113°20'E), and from eastern (Hangzhou, 30°19'N, 120°12'E) to southwestern (Tuzu, 29°40'N, 103°50'E) China. Both single rice and double rice cultivations are distributed in these regions with different irrigation patterns and various types of organic matter incorporation. Model inputs include rice grain yield, soil sand percentage, amount of organic amendment, water management pattern, and daily air temperature. The validation indicated that model simulations generally agreed with the observations. The observed seasonal amount of methane emission ranged from 3.1 to 761.7 kg C/hm² with an average of 199.4±187.3 kg C/hm². In consonance with the observations, model simulations resulted in an average value of 224.6±187.0 kg C/hm², ranging from 13.9 to 824.3 kg C/hm². Comparison between the computed and the observed total seasonal methane

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); 国家重点基础研究发展计划资助项目(G1999011805)

收稿日期:2004-03-12; **修订日期:**2004-08-20

作者简介:张稳(1968~), 男, 河北人, 博士, 主要从事 GIS 应用与全球变化研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

致谢:感谢全球变化研究亚太观测网(Asian-Pacific Network for Global Change Research)APN 2001-16 提供部分试验数据, 同时感谢中国科学院大气物理研究所的王明星研究员、王跃思研究员和韩圣慧博士以及地理科学与资源研究所的庄大方研究员对本项工作的大力支持

Foundation item: the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01-13); the National Key Basic Research Development Foundation of China (No. G1999011805)

Received date:2004-02-12; **Accepted date:**2004-08-20

Biography: ZHANG Wen, Ph. D., mainly engaged in GIS application and global change.

emission yielded a correlation coefficient r^2 of 0.84 with a slope of 0.92 and an intercept of 41.1 ($n=94$, $p<0.001$). Compared with the original model, the CH4MOD can well capture the signals of bubble fluxes and the effect of water regime on methane emission. Model simulation for 94 cases resulted in the bubble flux contribution of 5%~45% to the overall emissions, which is comparable to literature reports.

It was concluded that the CH4MOD can reasonably simulate the effect of water regime on methane production/emission and the methane transport via bubbles. Model validation against independent observations demonstrated that the CH4MOD is capable of simulating methane emissions from irrigated rice fields with a minimal amount of inputs and parameters.

Key words: model; CH₄ emission; rice fields; agricultural practices; validation

文章编号:1000-0933(2004)12-2679-07 中图分类号:P402 文献标识码:A

模型的有效性检验是客观估计区域尺度(从一个乃至数个基本行政单位的中小尺度到国家、全球的大尺度)稻田甲烷排放量的基本前提。但是,一个模型离开其开发环境而被应用于另一个区域时,尤其是当土壤、气候以及农业耕作制度等条件具有很 大差异的情况下,模型的有效性是首先要予以证明的一个问题。对于模拟稻田甲烷排放这样的生态模型,情况更加如此。CH4MOD 的原型是在美国德州开发的稻田甲烷排放模拟模型,它适宜于持续淹水的单季稻稻田,并已利用美国、意大利和中国等地的试验数据经过了充分验证^[1]。与原模型相比,CH4MOD 模型增加了对多种稻田水管理方式下甲烷排放的模拟,并且考虑了我国双季晚稻稻田常见的气泡甲烷排放。修正后的模型需要经过广泛的试验数据验证,才能使得利用该模型估计的稻田甲烷排放量具有可信性。我国水稻种植面积居全球第二,从南到北,从东到西,稻田土壤及气候环境变化明显,稻作方式也多种多样,因此模型的验证也需要涵盖多种自然背景以及农作管理下的稻田试验。我国关于稻田甲烷排放的系统观测始于 20 世纪 80 年代,迄今为止已积累了大量的观测数据^[2~10],这为 CH4MOD 模型的适应性验证提供了较全面的数据基础。

1 数据来源

用于模型验证的观测数据来源于我国 5 个主要水稻产区的 9 个试验点,观测时间跨度为 1988~1999 年,涵盖了多种稻田水管理方式、有机肥使用方式以及不同的作物轮作制度。这些试验点的基本情况见表 1。我国的单季稻主要分布在东北、华北、西南、西北、华东以及中南。除北方部分地区由于气候条件的限制外,单季稻区一般都是旱-水轮作,包括麦-稻、绿肥-稻、油菜-稻等轮作方式,间或有冬季休闲田。本文用于模型验证的单季稻田甲烷排放数据为 46 组(即 46 个水稻生长季的稻田甲烷观测记录),主要来自于北京、江苏、浙江、重庆和河南的观测结果。双季稻分布于我国热量条件较好的华南、西南以及华东。用于模型验证的双季稻田甲烷排放数据为 48 组(24×2),主要来自广东、湖南、四川以及浙江的观测结果。

气温数据来源于当地的常规气象观测。利用气温数据,通过经验公式 $T_{soil}=4.4+0.76\times T_{air}$ 可以计算出土壤温度^[1]。

表 1 用于模型验证的案例概况

Table 1 Summary of the observations used for model validation

试验点 Sites	地理位置 Location	土壤砂粒含量 Sand percentage(%)	试验时间 Time	种植制度* Rotation	组数 Cases	数据来源 Data sources
广州 Guangzhou	23°08'N, 113°20'E	46.3	1994	D	4	中国科学院大气物理研究所 IAP, CAS ^b
长沙 Changsha	28°09'N, 113°06'E	62.0	1995~1997	D	20	APN 数据库 APN Database
桃源 Taoyuan	28°55'N, 110°30'E	21.2	1992	D	8	Shuangguan 等 ^[2,3]
土主 Tuzhu	29°40'N, 103°50'E	78.5	1988~1994	S	7	Khalil 等 ^[6]
重庆 Chongqing	29°48'N, 106°18'E	57.0	1995~1997	S	11	APN 数据库 APN Database
杭州 Hangzhou	30°19'N, 120°12'E	23.0	1995~1998	D,S	16,7	APN 数据库 APN Database
南京 Nanjing	31°51'N, 118°49'E	4.8	1999	S	4	本研究组 This group
封丘 Fengqiu	35°24'N, 114°24'E	2.0, 20.0, 80.0	1993~1994	S	6	APN 数据库 APN Database
北京 Beijing	40°30'N, 116°25'E	55.0	1995~1997	S	11	Wang 等 ^①

D 双季稻 Double rice; S 单季稻 Single rice; b. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences

① 王增远、徐雨昌、李震等 1994~1997 年间国际稻田甲烷排放研究进展报告(UNDP-IRRI,GLO/91/G31). 北京,1998

2 模型的输入

模型的输入参数包括稻谷单产(GY)、土壤砂粒含量(SAND)、外源有机质的种类(用于确定有机物的难分解组分OM_S和易分解组分OM_N的比例,见表2)和添加量、水分管理模式(见表3)和逐日气温(T_{air})。

在用于验证的94组试验观测数据中,有些记录了对应的稻谷单产数据,但有些没有记载。对于缺失的单产数据,本文采用当地的平均稻谷单产来代替。关于土壤砂粒含量的数据,大部分试验观测没有记录,因此本文通过中国科学院南京土壤研究所的中国土壤数据库来插值估算试验点的土壤砂粒含量。该数据库将土壤质地划分为砾石(粒径>2mm)、粗砂(2~0.2mm)、细砂(0.2~0.02mm)、粉沙(0.02~0.002mm)和粘粒(粒径<0.002mm)。本文所指的土壤砂粒含量是粒径介于2mm和0.02mm之间的土壤机械组成。

稻田的外源有机质包括人工添加到稻田中作为有机肥的粪肥、绿肥、沼渣、作物秸秆以及前茬作物自然留田的作物根系(可由作物的根冠比计算得出)和地上短茬(约是地上秸秆总生物量的10%)。若是无前作的休闲田,则认为有杂草留田,并且留田杂草的生物量根据气候条件的不同有很大差异(从北到南为0~2000 kg/hm²)。对于双季稻作制,约有50%的前茬秸秆还田到后季晚稻田中。

稻田水管理一直是我国水稻种植中的一项重要内容。为了控制无效分蘖、改善水稻根区微环境从而提高产量,在水稻的营养生长期进行烤田以及在随后的生殖生长期采取间歇灌溉是常用的水分管理模式。烤田时间的长短以及间歇灌溉频率的大小与土壤性质以及天气状况密切相关,各地也有很大差异。我国水稻种植实践中常用的几种稻田水分管理模式汇总^[13,14]于表3中。一般来说,地势较高而又缺乏排灌设施的田块,都采用围田集雨的方式保证水分,因而稻田处于全淹水状态;低洼盐碱地则由于容易浸水而需要经常排干,多处于间歇灌溉状态;排灌条件良好的稻田则大多采用表3中的模式1或2。对于表3中各种水分管理模式,可以计算出相应稻田的土壤Eh变化和其影响系数FEh。

表 2 不同有机物的初始易分解和难分解组分比例

Table 2 Initial fractions of OM_N and OM_S in incorporated organic matter

有机物种类 Organic matter	易分解组分 OM _N	难分解组分 OM _S
水稻秸秆 Rice straw	0.59 ^a	0.41
水稻根 Rice root	0.42 ^a	0.58
小麦秸秆 Wheat straw	0.49 ^a	0.51
小麦根 Wheat root	0.31 ^a	0.69
绿肥 Green manure	0.80 ^{a,b}	0.20
农家堆肥 Farm manure	0.25 ^c	0.75
沼渣 Bio-gas residual	0.10 ^c	0.90

a 参见文献^[12]Reference No. 12;b 包括杂草 Including wild weeds;c 统计均值,取决于实际堆沤的腐熟程度,具有很大的变差 Statistic average, and greatly depending on fermentation

表 3 我国水稻种植中的主要几种水管理模式^[12,13]
Table 3 Irrigation patterns for rice cultivation in China

模式代码 Irrigation Ptn.	模式组成* Composition	描述 Description
1	F-D-F-M	多见于华北和华东的单季稻、双季早稻 Applied usually in single and early rice paddies in Northern and Eastern China
2	F-D-M	多见于华南和西南的单、双季稻 Applied usually in single and double rice paddies in Southern and South-Western China
3	F-M	类似于模式2,但没有明显的烤田 Analog to water pattern 2, but without specific drainage
4	F	排灌条件欠佳的高地稻田、冬水田和盐碱稻田 In high land or Sali-alkaline paddies where irrigation facilities are often unavailable.
5	M	有排灌条件的低洼稻田,地下水位通常较高 Low land paddies with high underground water level, drained frequently.

* F 淹水 Flooding; D 烤田 Drainage; M 间歇灌溉 Intermittent irrigation

稻田初始地上生物量(W_0 ,指移栽时单位面积的水稻植株干重)取常数15 g/m²^[14]。水稻生长的logistic方程中的内禀增长率参数 r ,Huang等^[1]的研究认为其取值为 $0.08\pm0.02d^{-1}$,本文对于单季稻取0.08,双季稻的早稻和晚稻均取0.1。模型中另一个非常重要的参数是水稻品种系数VI,它表示不同的水稻品种间在其它条件相同情况下的稻田甲烷排放率差异。Huang等认为大部分品种的VI取值为1.0左右,也有的品种取值较高(=1.5)或较低^[15]。但是我国水稻品种的VI取值未作过详细的研究,本文在模型验证时均假设其数值为1.0。

3 模型的输出

CH4MOD模型是一个逐日驱动模型,每个水稻生长季作为模型的一个运行单元。模型在初始化输入参数以及逐日气温数据的驱动下运行输出逐日的水稻地上生物量、水稻根生物量、土壤氧化还原电位(Eh)、土壤的外源有机质分解、土壤甲烷生产率、甲烷排放率(通过植株以及气泡方式)等。本文对于模型甲烷排放率重点进行了试验验证。

3.1 单季稻田甲烷排放季节性变化的模拟验证

图 1 为模拟和试验测定的单季稻田甲烷排放季节性变化。可知,模拟的季节性变化趋势与观测结果具有良好的一致性。

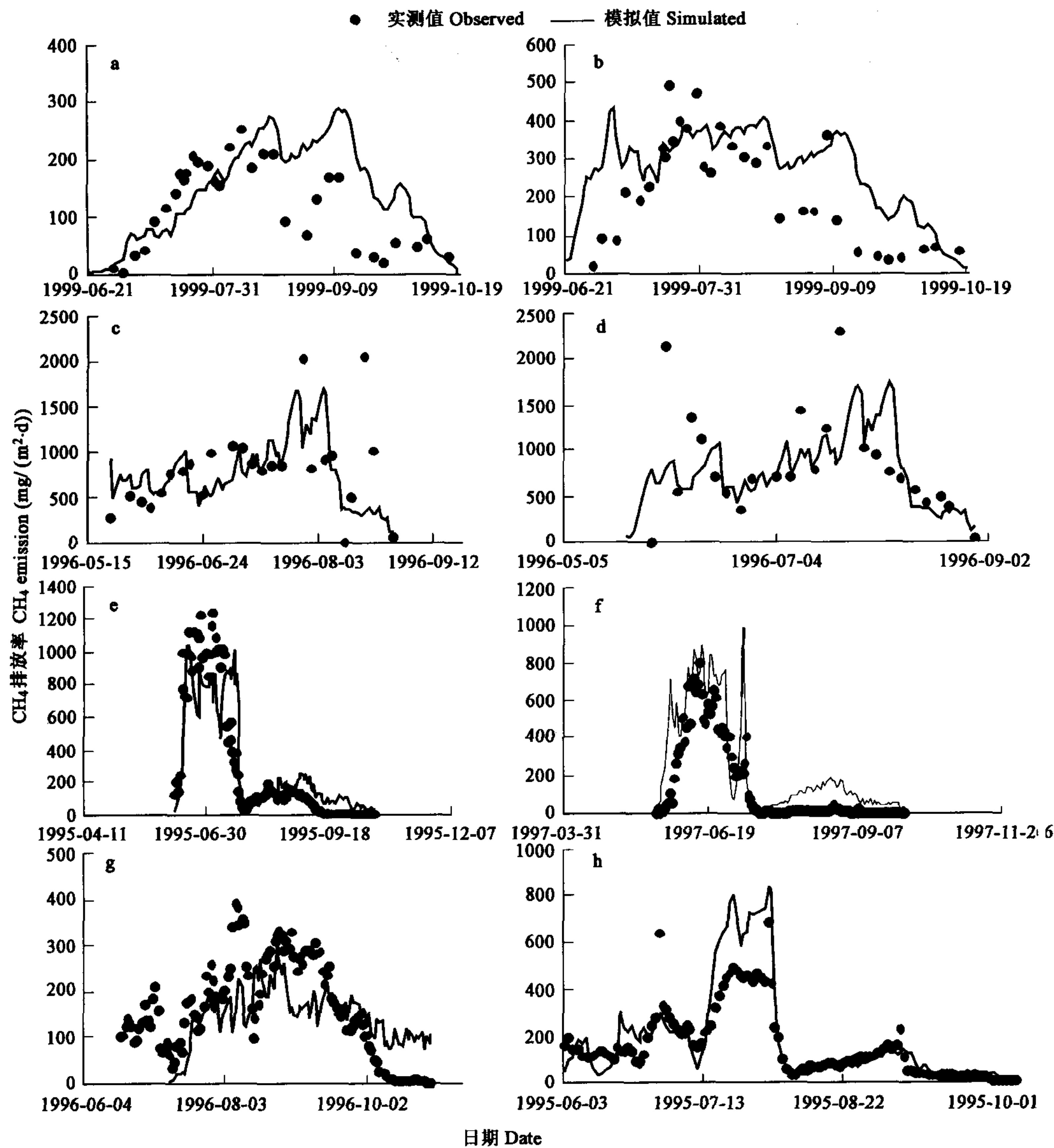


图 1 单季稻田甲烷排放模拟值与观测值的比较

Fig. 1 Comparison of simulated with observed seasonal patterns of methane emission from single rice paddies

a 南京 1999, 水模式 4, 无外源有机质, 稻麦轮作 Nanjing1999, irrigation ptn-4, no OM amendment, wheat/rice; b 南京 1999, 水模式 4, 小麦秸秆 4.5 t/hm², 稻麦轮作 Nanjing1999, irrigation ptn-4, wheat straw 4.5t/hm², wheat/rice; c 重庆 1996, 水模式 3, 农家肥 5.0 t/hm², 冬水田/水稻 Chongqing1996, irrigation ptn-3, farm manure 5.0t/hm², waterlog/rice; d 重庆 1996, 水模式 3, 农家肥 5.0 t/hm², 稻麦轮作 Chongqing1996, irrigation ptn-3, farm manure 5.0t/hm², wheat/rice; e 北京 1995, 水模式 2, 猪粪 3.6 t/hm², 稻麦轮作 Beijing1995, irrigation ptn-2, pig manure 3.6t/hm², wheat/rice; f 北京 1997, 水模式 2, 水稻秸秆 2.6 t/hm², 冬闲/水稻 Beijing1997, irrigation ptn-2, rice straw 2.6t/hm², fallow/rice; g 杭州 1996, 水模式 3, 无外源有机质, 冬闲/水稻 Hangzhou1996, irrigation ptn-3, no OM amendment, fallow/rice; h 杭州 1995, 水模式 1, 绿肥 1.1 t/hm², 冬闲/水稻 Hangzhou1995, irrigation ptn-1, green manure 1.1 t/hm², fallow/rice

3.2 双季稻田甲烷排放季节性变化的模拟验证

图 2 为 8 组(4×2)模拟与实测显示的对比结果。从图中可以看出,除了一些极端的排放(图 2-b、图 2-c),模拟结果能够很好地跟踪各种水分管理模式以及有机肥施用强度下的稻田甲烷排放。

3.3 稻田甲烷排放季节总量的模拟验证

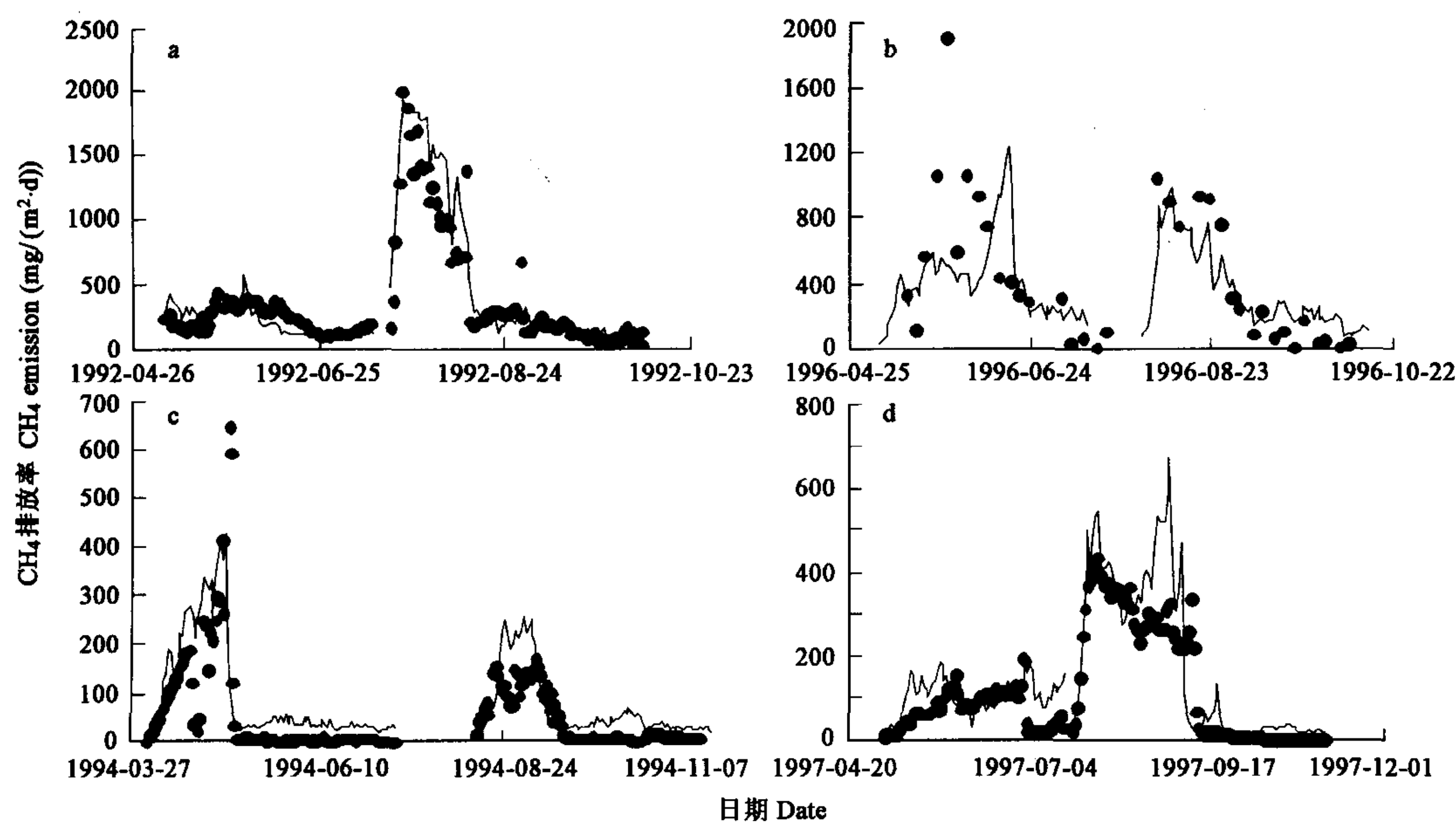


图 2 双季稻田甲烷排放模拟值与观测值的比较

Fig. 2 Comparison of simulated with observed seasonal patterns of methane emission from double rice paddies

a 桃源 1992, 早稻: 绿肥 3t/hm², 农家肥 1.9 t/hm², 水模式 3; 晚稻: 水稻秸秆 4.5 t/hm², 农家肥 1.9 t/hm², 水模式 3 Taoyuan1992, early-rice: green manure 3t/hm², farm manure 1.9t/hm², irrigation ptn-3; late-rice: rice straw 4.5t/hm², farm manure 1.9t/hm², irrigation ptn-3; b 长沙 1996, 早稻: 野草 0.46 t/hm², 水模式 3; 晚稻: 无外源有机质, 水模式 3 Changsha1996, early-rice: wild weeds 0.46t/hm², irrigation ptn-3; late-rice: no OM amendment, irrigation ptn-3; c 广州 1994, 早稻: 农家肥 3 t/hm², 水模式 3; 晚稻: 无外源有机质, 水模式 3 Guangzhou1994, early-rice: farm manure 3t/hm², irrigation ptn-3; late-rice: no OM amendment, irrigation ptn-3; d 杭州 1997, 早稻: 沼渣 0.6 t/hm², 水模式 3; 晚稻: 沼渣 0.6 t/hm², 水模式 1 Hangzhou1997, early-rice: Bio-gas residual 0.6t/hm², irrigation ptn-3; late-rice: Bio-gas residual 0.6t/hm², irrigation ptn-1

各个季节的模拟排放总量由模型计算出的逐日排放量分季节求和得出, 实测的季节排放总量通过相邻观测值作线性插值 (对于有逐日观测数据季节, 无需插值) 后求和得出。观测的甲烷季节排放总量最小值和最大值分别为 3.1 和 761.7 kgC/hm², 统计平均值及标准差分别为 199.4 和 187.3 kgC/hm²; 与此相对应的模型模拟值分别为 13.9、824.3、224.6 和 187.0 kgC/hm²。模拟与实测数据的回归分析 (图 3) 表明, 其决定系数为 $r^2=0.84$ ($n=94, p<0.001$), 相应的回归方程可表示为: $y_{CH4MOD}=0.92 \times x_{CH4OBS}+41.1$ 。其中 y_{CH4MOD} 和 x_{CH4OBS} 分别为模型估计和实际观测得到的稻田甲烷季节排放总量 (kgC/hm²)。

3.4 气泡传输与水管理对甲烷排放贡献的模拟

稻田中的甲烷气泡在许多试验观测都有记载^[2,16,17]。Holzapfel-Pschorn 和 Seiler 在意大利稻田观测到气泡排放的比例约为 10%^[19]。上官行健等在湖南桃源的试验中观测到早稻田

甲烷总排放量的 24% 是通过气泡方式排放的, 晚稻的这一比例为 55%^[3]。模型对 94 组试验数据的模拟结果显示甲烷气泡的贡献为 5%~45%, 与文献报道的结果趋于一致。图 4 为单季稻和双季稻田甲烷不同排放途径季节变化模拟结果。

3.5 与原模型的比较

本文的稻田甲烷排放模型 CH4MOD 是对 Huang 等^[1]研究工作的进一步修正与扩展。原模型适宜于模拟有机质添加量不大并且持续淹水稻田的甲烷排放模拟, 并且经过充分的验证证明了其模拟结果的可靠性。修正后的模型 CH4MOD 继承了原模型对于持续淹水稻田的良好模拟效果 (图 5-a)。从图 5-a 中可以看出, CH4MOD 与原模型具有相当一致的模拟曲线, 并且与实

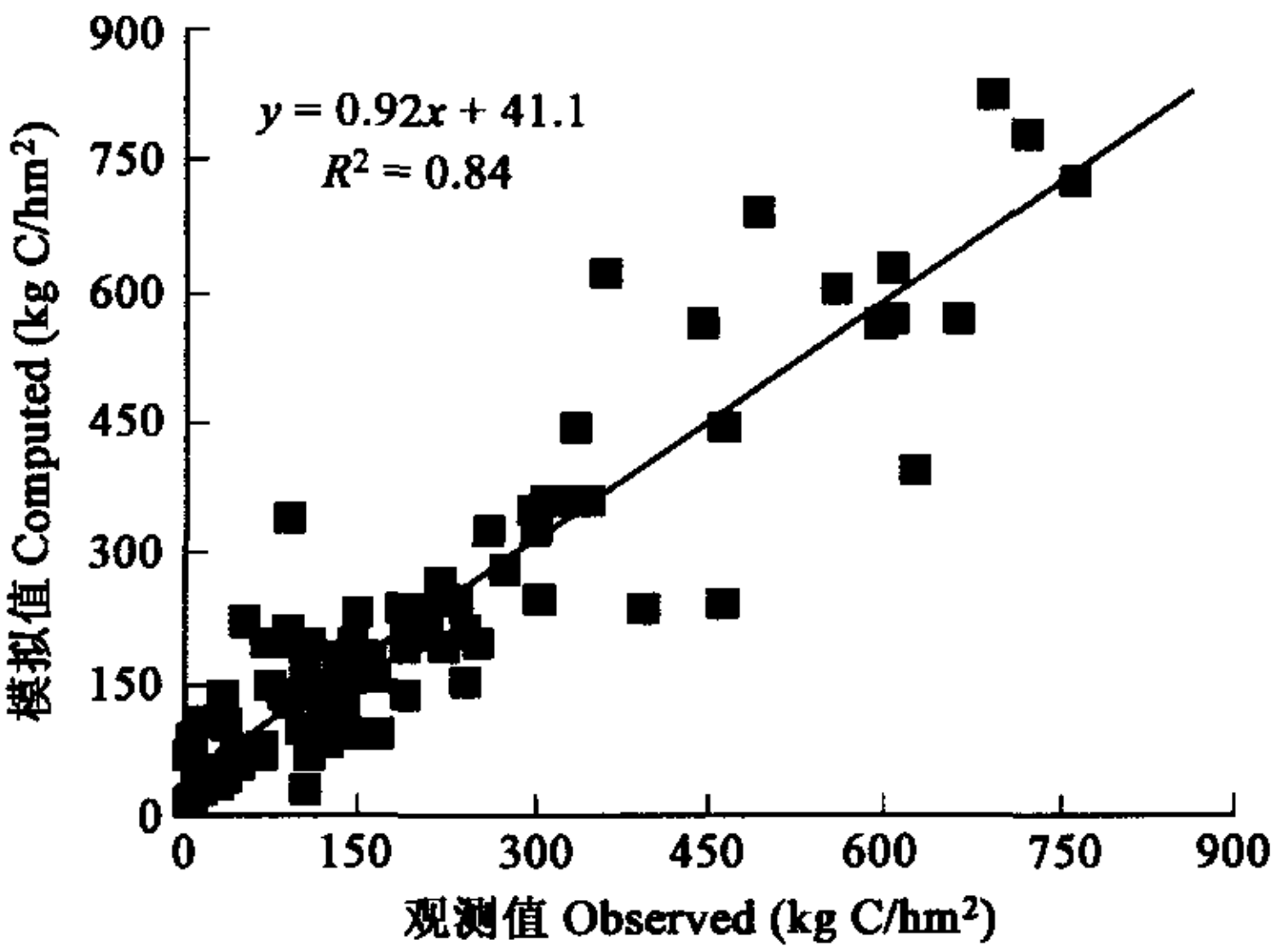


图 3 稻田甲烷季节排放总量的模拟值与观测值的比较

Fig. 3 Comparison of simulated with measured total seasonal methane emissions

测值的拟合也比较好。另一方面,当稻田添加了大量的有机质,从图 5b 的前半部分(烤田之前)可以看出,两个模型的模拟结果差别就比较明显,并且修正后的模型也更加接近实际观测数据,这主要是由于修正后的模型较原模型增加了对于稻田甲烷气泡排放的模拟。当稻田烤田并在随后采用间歇灌溉时,原模型因不能模拟这种情况下土壤的 Eh 变化而不再适用,而修正后的 CH4MOD 模型能够模拟出甲烷排放的逐日变化规律(图 5b)。

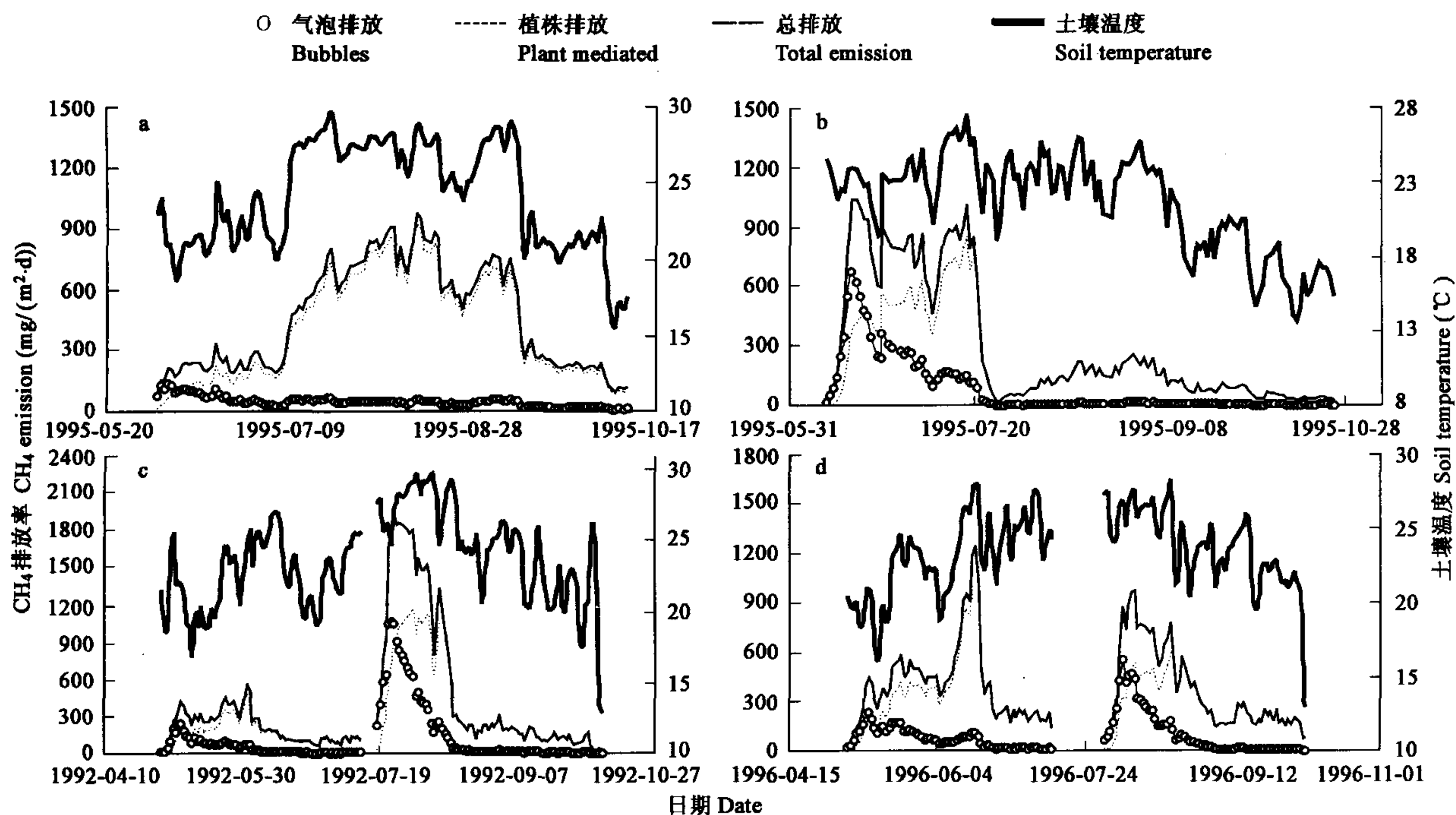


图 4 甲烷不同排放途径季节变化模拟结果

Fig. 4 Computed seasonal variations of the CH_4 emission in plant-mediated and bubbles

a 杭州 1995, 绿肥 1.1 t/hm², 水模式 4 Hangzhou1995, green manure 1.1 t/hm², irrigation ptn-4, fallow/rice; b 北京 1995, 猪粪 3.6 t/hm², 水模式 2 Beijing1995, pig manure 3.6t/hm², irrigation ptn-2, wheat/rice; c 桃源 1992, 早稻: 绿肥 3.0 t/hm², 农家肥 1.9 t/hm², 水模式 3, 晚稻: 秸秆 4.5 t/hm², 农家肥 1.9 t/hm², 水模式 3 Taoyuan1992, early-rice: green manure 3.0t/ hm²; farm manure 1.9t/hm², irrigation ptn-3; late-rice, farm manure 1.9t /hm² + rice straw 4.5t/hm², irrigation ptn-3; c 长沙 1996, 早稻: 野草 0.46 t/hm², 水模式 3, 晚稻: 无外源有机质加入, 水模式 3 Changsha1996, early-rice: wild weeds 0.46t/hm², irrigation ptn-3; late-rice: no OM amendment, irrigation ptn-3

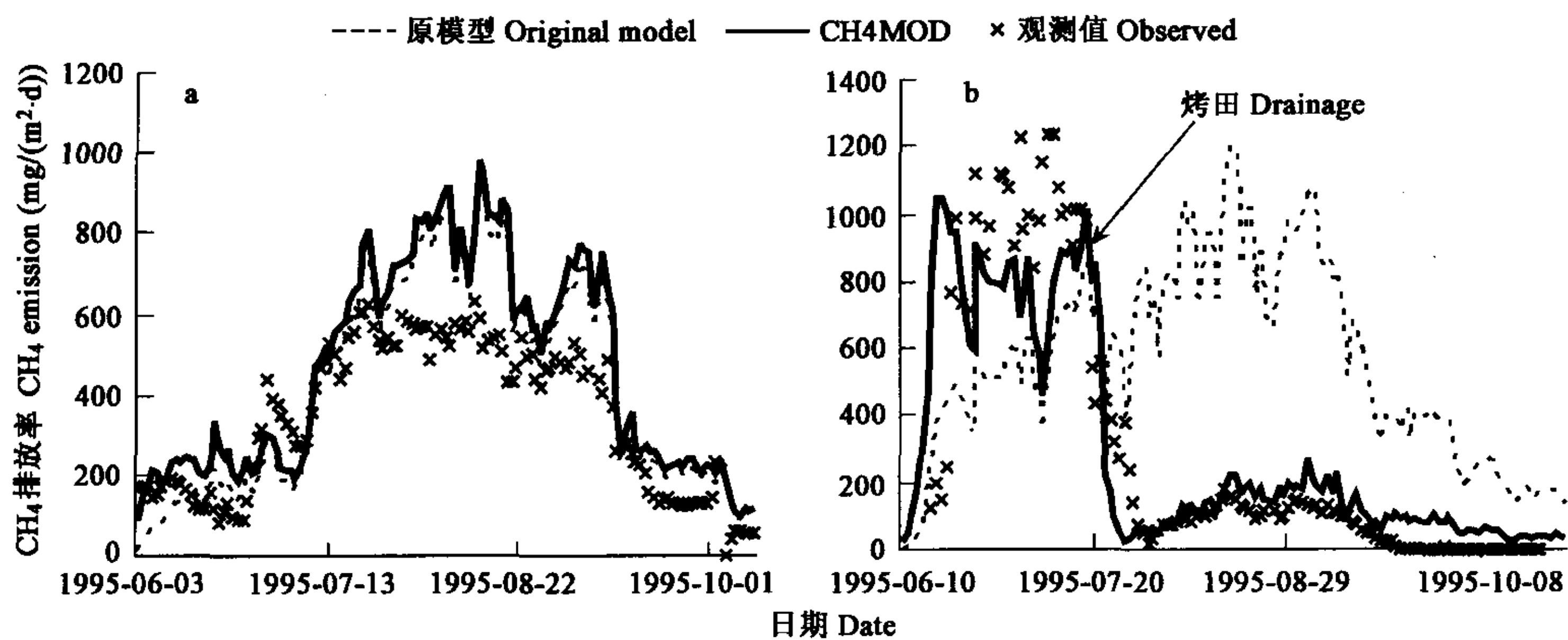


图 5 CH4MOD 与原模型的对比验证

Fig. 5 Comparison between CH4MOD and the original model

a 杭州 1995, 绿肥 1.1 t/hm², 水模式 4 Hangzhou1995, green manure 1.1 t/hm², irrigation ptn-4, fallow/rice; b 北京 1995, 猪粪 3.6 t/hm², 水模式 2 Beijing1995, pig manure 3.6t/hm², irrigation ptn-2, wheat/rice

4 结论

对大量试验数据验证的结果表明,CH₄MOD 模型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,特别是能够模拟多种水管理方式下的稻田甲烷排放以及通过气泡途径的甲烷排放,因而具有广泛的适应性和更好的解释性。该模型需要的输入参数较少,可通过与 GIS 等空间技术相结合用于大尺度区域稻田甲烷排放的估计。

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] 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.
- [3] Shangguan X J, Wang M X, Chen D Z, et al. Methane transport in rice paddies. *Advance in Earth Sciences*, 1993, **8**(5): 13~22.
- [4] Wang M X. Methane production, emission and possible control measures in the rice agriculture, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, **10**: 307~314.
- [5] 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*. Tokyo, YOKENDO Publishers, 1994. 9~26.
- [6] Khalil M, Rasmussen R A, Shearer M J, et al. Measurements of methane emission from rice fields in China. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 181~210.
- [7] Cai Z C. Measurements of CH₄ and N₂O emission from rice fields in Fengqiu. China, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1999, **1**: 1~13.
- [8] 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.
- [9] Huang Y, Jiang J Y, Zong L G, et al. Comparison of field measurements of CH₄ emission from rice cultivation in Nanjing, China and in Texas, USA. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18**(6): 1121~1130.
- [10] 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.
- [11] Huang Y, Shen Y, Zhou M, et al. Decomposition of plant residue as influenced by its lignin and nitrogen. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2003, **27**(2): 183~188.
- [12] Gao L Z, and Li L eds. *Meteorological Ecology of Rice Crop*. Beijing: China Agricultural Press, 1992.
- [13] Su G D ed. *Crop Sciences*. Guangzhou: Guangdong Higher Education Press, 2000. 108~111.
- [14] Gao L Z, Jin Z, Huang Y, et al. eds. *Rice Cultivational Simulation, Optimization and Decision Making System*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992.
- [15] Huang Y, Sass RL, and Fisher FM. Methane emission from Texas rice paddy soils 1. Quantitative multi-year dependence of CH₄ emission on soil, cultivar and grain. *Glob. Change Biol.*, 1997, **3**: 479~489.
- [16] Bartlett K B, Crill P M, Sebacher D I, et al. Methane fluxes from the central Amazonian floodplain. *J. Geophys. Res.*, 1998, **93**: 1571~1582.
- [17] Wilson J O, Crill P M, Barlett K B, et al. Seasonal variation of methane emission from a temperate swamp. *Biogeochemistry*, 1989, **8**: 55~71.
- [18] Holzapfel-Pschorn A, and Seiler W. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**: 11803~11814.

参考文献:

- [2] 上官行健,王明星,稻田 CH₄ 排放的控制措施. 地球科学进展, 1993, **8**(5): 55~62.
- [3] 上官行健,王明星,陈德章,等. 稻田甲烷的传输. 地球科学进展, 1993, **8**(5): 13~22.
- [11] 黄耀,沈雨,周密,等. 木质素和氮含量对植物残体分解的影响. 植物生态学报, 2003, **27**(2): 183~188.
- [12] 高亮之,李林. 水稻气象生态. 北京:中国农业出版社, 1992.
- [13] 苏广达. 作物学. 广州:广东高教出版社, 2000. 108~111.
- [14] 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.