

李婷婷, 黄耀, 张稳, 等. 2010. 自然湿地甲烷排放模拟研究——模型的修正与验证 [J]. 气候与环境研究, 15 (3): 246–256. Li Tingting, Huang Yao, Zhang Wen, et al. 2010. Modeling CH<sub>4</sub> emissions from natural wetlands—Model modification and validation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (3): 246–256.

# 自然湿地甲烷排放模拟研究 ——模型的修正与验证

李婷婷<sup>1,2</sup> 黄耀<sup>1</sup> 张稳<sup>1</sup> 宋长春<sup>3</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 130012

**摘要** 以稻田甲烷排放模型 (CH<sub>4</sub>MOD) 框架为基础, 基于稻田同自然湿地产甲烷底物、植物生长过程以及土壤氧化还原电位变化过程之间的差异, 对模型进行了修改, 建立自然湿地甲烷排放模型 (CH<sub>4</sub>MOD<sub>wetland</sub>)。利用三江平原淡水沼泽和若尔盖高原泥炭沼泽的甲烷排放观测数据对模型进行了验证。结果表明: 模型可以有效地模拟三江平原沼泽甲烷排放的季节和年际变化特征, 但是在若尔盖高原模拟效果欠佳; 模拟和观测的甲烷排放季节总量在两地均有良好的一致性, 线性相关系数  $R^2$  为 0.96 ( $n=7$ , 显著性水平  $p<0.001$ ); 模拟值和实测值之间的均方根误差, 平均偏差和模型效率分别为 14.1%, -6.7% 和 0.95。

**关键词** CH<sub>4</sub>MOD<sub>wetland</sub> 湿地 甲烷 模型

**文章编号** 1006-9585 (2010) 03-0246-11 **中图分类号** P421 **文献标识码** A

## Modeling CH<sub>4</sub> Emissions from Natural Wetlands —Model Modification and Validation

LI Tingting<sup>1,2</sup>, HUANG Yao<sup>1</sup>, ZHANG Wen<sup>1</sup>, and SONG Changchun<sup>3</sup>

1 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Jilin 130012*

**Abstract** Wetlands are one of the most important sources of atmospheric CH<sub>4</sub>, but the quantity of this source is still highly uncertain. We developed a biogeophysical model called CH<sub>4</sub>MOD<sub>wetland</sub> to simulate CH<sub>4</sub> emissions from natural wetlands based on CH<sub>4</sub>MOD that simulates CH<sub>4</sub> emissions from irrigated rice paddies. The development of CH<sub>4</sub>MOD<sub>wetland</sub> focused on the supply of methanogenic substrates, the process of vegetation growth, and the variation of soil redox potential that differ from the rice paddy. CH<sub>4</sub>MOD<sub>wetland</sub> was validated against independent datasets from Sanjiang Plain and Zoigê Plateau. Model validation showed that the observed seasonal and interannual variations of CH<sub>4</sub> emissions from marshland in northeastern China were well captured, but that from peatland in southwest plateau of China were less well; Nevertheless, modeled seasonal amount of CH<sub>4</sub> emissions agreed observed well

**收稿日期** 2009-02-17 收到, 2010-01-20 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金重点项目 40431001

**作者简介** 李婷婷, 女, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事湿地生态模型研究。E-mail: litingting@mail.iap.ac.cn

in the two places, yielding an  $R^2$  of 0.96 ( $n=7$ ,  $p<0.001$ ); The root-mean-squared error, mean deviation, and model efficiency between modeled and observed values are 14.1%, -6.7%, and 0.95, respectively.

**Key words** CH4MOD<sub>wetland</sub>, wetland, methane, model

## 1 引言

甲烷(CH<sub>4</sub>)是重要的温室气体之一,在过去的150多年,大气中甲烷的浓度增加了150%,是所有温室气体中增幅最迅速的(IPCC, 2007)。全球而言,自然湿地的甲烷排放占总排放的20%,是最重要的大气甲烷自然源(Wuebbles and Hayhoe, 2002; Kapoor, 2005)。

近年来,有关中国自然湿地甲烷排放的观测研究较多(黄国宏等, 2001; Ding et al., 2002, 2004; Ding and Cai, 2007),特别是中国最大的沼泽集中分布区三江平原(Yang et al., 2006; 王毅勇等, 2006; Song et al., 2007)。过去50年三江平原气温明显升高(闫敏华等, 2001; 潘华盛等, 2003; 王亚平等, 2008),且 $1.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的自然湿地被垦殖为农田(张树清等, 2002),这使得三江平原甲烷排放通量的研究具有特殊意义。已有研究表明,三江平原甲烷排放通量呈现出明显的时间和空间变化:受气候影响,甲烷通量年际变化显著(Yang et al., 2006; Song et al., 2007);不同植被和土壤类型间甲烷排放通量也有很大差异(Ding et al., 2005; 王毅勇等, 2006)。为估算中国区域湿地甲烷排放通量, Ding et al. (2004)采用将某一实验地点的观测结果外推到区域尺度的方法,这种简单的外推法不可避免的使估计值带有巨大的误差。为了提高估算精度,采用机理化的模型方法成为必然的选择。

目前国内外有关稻田甲烷排放模型的研究很多(Cao et al., 1995; 丁爱菊和王明星, 1995; Huang et al., 1998; Li, 2000; Bodegom et al., 2001)。Huang et al. (1998, 2004)开发的稻田甲烷排放模型——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(Huang et al., 2004; 张稳等, 2004),该模型的输入参数相对较少且容易获取,这对于模型的区域化应用非常有利(张稳等, 2004)。本文以CH4MOD的模型框架为基础,针对自然湿地同稻田甲烷排放

的区别,对CH4MOD进行修改,建立自然湿地甲烷排放模型CH4MOD<sub>wetland</sub>,用于模拟自然湿地甲烷排放,同时也为利用模型估算三江平原气候变化和湿地垦殖对于甲烷排放的影响提供工具。

## 2 模型概述

本研究接受CH4MOD的基本假设:甲烷基质主要源于植物根系分泌物及加入到土壤中的有机物的分解;甲烷的产生率取决于甲烷基质的供应以及环境因子的影响;植物传输是主要的甲烷排放途径,在植物生长初期,气泡排放起重要的作用。

然而,自然湿地同稻田之间存在一些差异:产甲烷底物方面,湿地植物死亡后以凋落物的形式进入土壤,此外,湿地生态系统在地表累积了大量有机质(Bertness, 1988; Froelking et al., 2001; Gorham et al., 2003; Zhang et al., 2008),地上、地下部分凋落物和土壤有机质的分解是产甲烷基质的重要来源;环境影响因子方面,在稻田中,土壤氧化还原电位( $E_h$ )的变化是由稻田水管理方式决定的,而在自然湿地中, $E_h$ 的变化是由地表水深的变化决定的(Singh, 2001; Ding et al., 2002),自然湿地中 $E_h$ 变化较为缓慢(高俊琴等, 2004);植物生长方面,水稻在成熟后被收割,而湿地植物在生长季后期地上部分植物会逐渐凋落。

针对上述区别,对CH4MOD进行如下修改:(1)增加凋落物和土壤有机质分解提供产甲烷基质;(2)以地表水深控制土壤 $E_h$ 变化;(3)增加植物凋落过程的模拟;(4)对气泡排放经验方程进行了修改。图1为自然湿地甲烷产生、氧化、排放过程的概念模型图。

### 2.1 CH4MOD模型基本概述

#### 2.1.1 产生甲烷的基质

产甲烷基质主要来源之一为植物根系分泌物。原模型描述为

$$C_p = 1.8 \times 10^{-3} \times f_v \times f_T \times W_i^{1.25}, \quad (1)$$

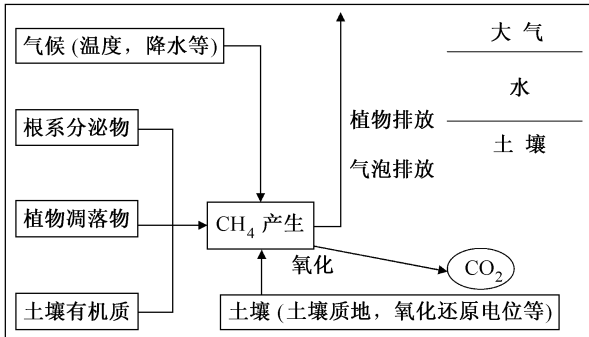


图1 自然湿地甲烷产生、氧化、排放过程的概念模型

Fig.1 Conceptual explanation for modeling the process of methane production, oxidation, and emission from natural wetlands

式中,  $C_p$  为植物根系分泌物供给的产甲烷底物 (单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $f_T$  为土壤温度函数,  $W_i$  为逐日 (第  $i$  天) 地上生物量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $f_v$  为植被类型系数。

### 2.1.2 土壤环境对甲烷产生的影响

土壤环境对甲烷产生的影响主要包括土壤质地 (土壤砂粒含量  $S_{\text{AND}}$ ), 土壤温度 ( $T_{\text{soil}}$ ) 以及土壤氧化还原电位 ( $E_h$ )。模型通过引入对应于这些土壤环境因素的影响函数来量化他们对甲烷产生的影响, 并分别表示为

土壤质地影响函数:

$$f_s = 0.325 + 0.0225 \times S_{\text{AND}}, \quad (2)$$

土壤温度影响函数:

$$f_T = \begin{cases} Q_{10}^{\frac{T_{\text{soil}}-30}{10}} & (T_{\text{soil}} < 30 \text{ } ^\circ\text{C}), \\ 1 & (T_{\text{soil}} \geq 30 \text{ } ^\circ\text{C}), \end{cases} \quad (3)$$

土壤  $E_h$  影响函数:

$$F_{E_h} = \begin{cases} \exp(-1.7 \times \frac{150 + E_h}{150}) & (E_h > -150 \text{ mV}), \\ 1 & (E_h \leq -150 \text{ mV}), \end{cases} \quad (4)$$

其中, 土壤温度  $T_{\text{soil}}$  通过气温数据  $T_{\text{air}}$ , 通过经验公式  $T_{\text{soil}} = 4.4 + 0.76 \times T_{\text{air}}$  进行计算。自然湿地中, 土壤  $E_h$  由水深决定, 当地表水深大于 0 时,  $E_h$  逐渐降低, 反之,  $E_h$  逐渐升高。本研究仍然采用原模型中的一阶微分方程 (差分形式) 来模拟土壤  $E_h$  的变化:

$$E_h^i = E_h^{i-1} - \theta \times (E_h^{i-1} - E_{\text{hc}}), \quad (5)$$

其中,  $E_h^i$  为第  $i$  日的土壤还原电位,  $E_{\text{hc}}$  为土壤氧

化还原电位的临界值, 自然湿地土壤  $E_h$  变化较为缓慢;  $\theta$  为差分系数由高俊琴等 (2004) 和 Singh (2001) 的  $E_h$  实测数据确定, 在地表干旱状态和淹水状态  $\theta$  值分别为 0.025 和 0.13。

### 2.1.3 甲烷产生率与排放率

甲烷的产生率取决于甲烷基质的供应以及环境因子的影响, 原模型中甲烷基质主要来源于植物根系分泌物以及外源有机质的分解, 湿地生态系统中植物凋落物以及土壤有机质的分解与稻田中的外源有机质分解过程相同。土壤中甲烷的产生率  $P$  ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 表示为:

$$P = 0.27 \times F_{E_h} \times (C_p + C_{\text{Lana}} + C_s), \quad (6)$$

$C_{\text{Lana}}$  和  $C_s$  ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 分别表示凋落物和土壤有机质的厌氧分解供给的产甲烷底物。

甲烷总排放率  $E$  为植物排放速率  $E_p$  和气泡排放速率  $E_{\text{bl}}$  之和:

$$E = E_p + E_{\text{bl}}. \quad (7)$$

在植物传输过程中, 部甲烷会被氧化, 植物排放速率表示为:

$$E_p = (1 - P_{\text{ox}}) \times (P - E_{\text{bl}}), \quad (8)$$

式中,  $P_{\text{ox}}$  为甲烷在植物传输过程中被氧化的比例, 值为 0.5 (Walter and Heimann, 2000; Zhang et al., 2002)。

## 2.2 对 CH4MOD 所做的修改

### 2.2.1 植物生长过程

与水稻有所区别的是, 湿地植物地上部分生物量在生长季后期会逐渐凋落, 因此 CH4MOD<sub>wetland</sub> 在模拟植物生长过程中增加了凋落过程的模拟:

$$W_i = \begin{cases} \frac{W_{\text{max}}}{1 + \frac{W_{\text{max}} - W_0}{W_0} \times e^{-r \times t}} & (T_{A0} < T_A \leq T_{\text{Amax}}), \\ W_{i-1} - \beta \times T_s & (T_A > T_{\text{Amax}}), \end{cases} \quad (9)$$

$$T_A = \sum_{i=1}^n T_i \quad (T_i < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 时, 令 } T_i = 0 \text{ } ^\circ\text{C}), \quad (10)$$

$$T_s = \sum_{j=n+1}^m (20 - T_j) \quad (T_j > 20 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ 时, 令 } T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}), \quad (11)$$

其中,  $T_{A0}$  ( $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ) 和  $T_{\text{Amax}}$  ( $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ) 分别代表植物萌发和达到最大地上生物量时的积温 ( $>0$   $^\circ\text{C}$ )。当植物地上生物量 ( $W_i$ ) 达到最大值 ( $W_{\text{max}}$ ) 之前用 logistic 方程计算,  $W_0$  为初始地上

生物量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $t$  为植物开始萌发后的天数,  $T_s$  为小于  $20^\circ\text{C}$  的积温, 用于计算植物凋落过程。植物地上部分内秉增长率  $r$  为  $T_A$  的函数:

$$r = a \times (T_A/1000)^b, \quad (12)$$

其中,  $a$ 、 $b$  及式 (9) 中的  $\beta$  为经验常数, 其值由三江平原 2002~2004 年毛果苔草和小叶章地上生物量实测数据 (郝庆菊, 2006) 以及若尔盖高原乌拉苔草和木里苔草的最大生物量 (田应兵等, 2003) 采用非线性回归分析法确定。通过回归方法计算出的  $a$  和  $b$  的值分别为 0.073 和  $-0.078$ , 三江平原  $\beta$  值为 0.05, 若尔盖高原为 0.01。将三江平原毛果苔草和小叶章地上生物量模拟值与观测值进行回归分析, 其相关系数  $R^2$  为 0.84 ( $n=80$ , 显著性水平  $p < 0.001$ )。

### 2.2.2 植物凋落物的分解

湿地植物凋落物包括地上和地下部分凋落物。地上部分凋落物包括上一年生长季末未分解的凋落物和当年生长季后期每日凋落到土壤中的植物。后者由连续两日地上生物量 ( $W_{i-1}$ ,  $W_i$ ) 之差决定。根据文献调研 (马学慧等, 1996; 田应兵等, 2003), 小叶章、毛果苔草、乌拉苔草和木里苔草四种植物的地下净初级生产力占植物净初级生产力的比例 ( $F_R$ ) 分别为 46%、62%、65% 和 68%。本研究对苔草类和小叶章  $F_R$  的取值分别为 60% 和 50%。三江平原地下生物量季节动态研究表明, 在早春, 地下生物量较大, 而后逐渐下降至六月初达到最低, 最后逐渐升高并于生长季末达到最大值 (何池全, 2003)。因此本研究假定地下生物量凋落的时间为上一年生长季末至次年 6 月初, 凋落物总量等于地下净初级生产力。地下生物量凋落过程非常复杂, 本文假定植物地下部分日凋落量为均值。

在湿地生态系统中, 水位是厌氧和好氧环境的分界线。凋落物的厌氧分解是产甲烷基质的重要来源, 本研究采用 CH4MOD 模型中的一阶动力学方程形式模拟凋落物分解过程 (Huang et al., 1998, 2004):

$$C_{Lana} = f_T \times F_L \times f_{Wana} \times [0.027 \times F_N + 0.003 \times (1 - F_N)] \times (L - \Delta L), \quad (13)$$

$$C_{Laer} = f_T \times (1 - F_L) \times f_{Waer} \times [0.027 \times F_N + 0.003 \times (1 - F_N)] \times (L - \Delta L), \quad (14)$$

$$\Delta L = C_{Lana} + C_{Laer}, \quad (15)$$

$$F_N = (150 + 1.5N_0 - 0.57G_0) / 100, \quad (16)$$

式中,  $C_{Lana}$  为凋落物厌氧分解供给的产甲烷底物 (单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $C_{Laer}$  为地上凋落物的好氧分解 (单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $L$  为凋落物量 (单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $F_N$  为凋落物中初始的易分解组分比例 (单位:  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 可由凋落物中初始氮含量  $N_0$  ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 以及木质素含量  $G_0$  ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 计算 (黄耀等, 2003)。  $f_{Wana}$  和  $f_{Waer}$  分别代表水分对厌氧和好氧分解的影响,  $f_{Waer}$  为  $f_{Wana}$  的 0.4 倍 (Neckles et al., 1994), 本研究假定地下凋落物全部处于厌氧环境中,  $F_L$  为地上凋落物淹没在水中的比例, 是地表水深 ( $W_D$ ) 的函数:

$$F_L = \omega \times W_D, \quad (17)$$

本研究采用 Ding et al. (2002) 在三江平原观测的小叶章、乌拉苔草和毛果苔草三种植物的地上凋落物淹没在水中的比例确定比例系数  $\omega$ ,  $\omega$  值为 0.0345。

### 2.2.3 土壤有机质的分解

假定土壤有机质全部处于厌氧环境中, 土壤有机质的分解亦采用原模型中一阶动力学方程形式:

$$C_{SOM} = k_{SOM} \times f_{Wana} \times f_s \times f_T \times D_{SOM}, \quad (18)$$

$$D_{SOM} = O_M \times \rho \times H \times 10^4, \quad (19)$$

式中,  $C_{SOM}$  为土壤有机质的分解提供的产甲烷底物 (单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $k_{SOM}$  代表土壤有机质的一阶动力学腐解系数, 取值为  $8 \times 10^{-6} \text{d}^{-1}$  (Scanlon and Moore, 2000)。  $D_{SOM}$  为土壤有机质密度 (单位:  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), 可由土壤有机质含量  $O_M$  ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 土壤容重  $\rho$  ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), 和土壤厚度  $H$  (cm), 用公式 (9) 计算, 本研究假定土壤厚度  $H$  为 50 cm (刘景双等, 2003)。

### 2.2.4 气泡排放速率

CH4MOD 中气泡排放速率是水稻根生物量的经验函数, 但是湿地植物的地下生物量远远大于水稻, 因此本研究对气泡排放速率模拟进行修改。在植物生长初期, 气泡排放为主要的甲烷排放途径, 随着植物的生长, 气泡排放所占比例逐渐降低, 气泡排放速率  $E_{bl}$  被描述为:

$$E_{bl} = F_{bl} \times \left(1 - \frac{W}{W_{max}}\right) \times P, \quad (20)$$

式中  $F_{bl}$  为气泡排放占甲烷产生的最大比例, 本研究假设当地表水深小于 0 cm 时气泡排放等于 0 (Walter and Heimann, 2000)。

### 3 模型参数校正

#### 3.1 数据来源

用于模型参数校正与模型验证的观测数据来源于黑龙江省三江平原 (47°35'N, 133°31'E; 海拔 56 m), 和四川省若尔盖高原 (32°47'N, 102°32'E; 海拔 3470 m)。

三江平原是中国最大的淡水沼泽集中分布区, 主要的植被类型为小叶章 (*Deyeuxia angustifolia*) 和毛果苔草 (*Carex lasiocarpa*), 对应的土壤类型分别为沼泽化草甸土和腐殖质沼泽土 (张文菊等, 2004)。在 2002~2005 年植物生长季内 (4~10 月), 每周两次采用静态暗箱法对甲烷气体进行采集, 并进行静止水深的同步观测 (Yang et al., 2006; Song et al., 2007; 郝庆菊, 2006)。毛果苔草沼泽在 2002 年 4 月初至 6 月 20 日期间水深数据缺测, 采用降水与实际蒸散的差值计算水深, 实际蒸散采用 Penman-Menteith (P-M) 模型计算 (Allen et al., 1998); 小叶章沼泽在 2002 年水深数据缺测, 对 2003~2004 年两种类型湿地水深实测数据进行统计平均得, 毛果苔草沼泽的平均水深比小叶章沼泽高 8 cm, 以此关系计算小叶章沼泽 2002 年静止水深数据。

若尔盖高原是中国最大的泥炭沼泽分布区, 主要的植被类型为乌拉苔草 (*Carex meyeriana*) 和木里苔草 (*Carex muliensis*), 土壤类型为泥炭沼泽土 (王德宣等, 2002)。在 2001 年植物生长季内 (5~10 月) 进行甲烷排放通量和静止水深的观测, 观测方法以及频率与三江平原相同 (王德宣等, 2002)。

三江平原的气象数据来源于中国生态系统研究网络大气科学分中心 ([http://159.226.113.66/web\[2008-01-01\]](http://159.226.113.66/web[2008-01-01])), 若尔盖高原的气温数据来源于中国气象科学数据共享服务网 ([http://cdc.cma.gov.cn/\[2008-01-01\]](http://cdc.cma.gov.cn/[2008-01-01]))。

#### 3.2 参数校正

CH4MOD<sub>wetland</sub> 中需要进行校正的参数为  $f_v$ ,  $f_{wana}$  和  $F_{bl}$ 。用于参数校正的数据为 2002 年三江平原气温、静止水深数据以及 2002 年三江平原毛果苔草和小叶章沼泽甲烷排放通量实测数据 (郝庆菊, 2006; Song et al., 2007)。

本研究采用如下假定校正  $f_v$  和  $F_{bl}$ : 每年植物净初级生产力的 2.5% 转化成甲烷 (Huang et al., 1997; King et al., 2002); 土壤中 85% 的甲烷通过植物传输到大气中 (Whiting and Chanton, 1992; Shannon et al., 1996; Joabsson et al., 1999), 气泡排放占总排放量的 15%。具体校正方法为不考虑凋落物和土壤有机质分解 ( $C_L$ 、 $C_S$  为 0), 设  $f_v=1$ ,  $F_{bl}$  初值为 0.1 并以 0.1 为单位递增, 将  $f_v$  和不同  $F_{bl}$  值依次带入模型计算仅由根系分泌物产生的甲烷排放通量, 以气泡排放比例 ( $E_{bl}/E_0$ ) 最接近 15% 为标准确定  $F_{bl}$ ,  $f_v$  的计算方法为:  $f_v = \frac{C_{NPP} \times 2.5\%}{C_{CH_4}}$ ,  $C_{NPP}$  为植物净初级生产力含碳量;  $C_{CH_4}$  为当  $C_L$ ,  $C_S$  均等于 0, 且  $f_v=1$  时模拟的甲烷排放通量含碳量。经校正得,  $F_{bl}$  的值为 0.6, 小叶章和毛果苔草的  $f_v$  值分别为 2.8 和 2.4。

$f_v$  和  $F_{bl}$  确定后, 进行  $f_{wana}$  的校正。设  $f_{wana}$  初值为 0.1, 以 0.1 为单位递增, 将不同  $f_{wana}$  值带入模型中模拟 2002 年三江平原毛果苔草沼泽甲烷排放通量, 以模拟值与实测值平均偏差 (RMD) 最小为标准,  $f_{wana}$  值被校正为 0.3。

### 4 验证结果与讨论

自然湿地甲烷排放模型是一个逐日驱动模型, 模型在三江平原小叶章淡水沼泽 (2003~2004 年), 毛果苔草淡水沼泽 (2003~2005 年), 若尔盖高原乌拉苔草泥炭沼泽 (2001 年) 以及木里苔草泥炭沼泽 (2001 年) 进行了验证。

#### 4.1 模型验证的统计检验方法

本研究采用均方根误差 (RMSE), 平均偏差 (RMD), 模型效率 (EF), 以及模拟值和实测值之间的线性回归四类统计标准评价模型模拟的精确度。RMSE 用来评估模拟值与实测值之间的一致程度, RMD 反映了模拟值与实测值之间的系统偏差, EF 反映模拟值对观测数据的趋势描述的效果, EF 的值为正表示模拟值对观测数据趋势描述优于仅用观测平均值的所做的描述, 反之亦然 (Smith et al., 1997)。RMSE, RMD 和 EF 的计算公式分别为:

$$RMSE = \frac{100}{O} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}, \quad (21)$$

$$RMD = \frac{100}{O} \sum_{i=1}^n \frac{P_i - O_i}{n}, \quad (22)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{O} - O_i)^2}, \quad (23)$$

式中， $P$  和  $O$  分别为模拟和实测值。 $\bar{O}$  为实测数据的平均值， $n$  为实测数据的样本量。

#### 4.2 模型的输入，输出与参数

模型的输入参数包括地上生物量最大值 ( $W_{max}$ )，地下净初级生产力占植物净初级生产力的比例 ( $F_R$ )，植物萌发和达到地上最大生物量所需积温 ( $T_0$  和  $T_{Amax}$ )，土壤砂粒含量 ( $S_{AND}$ )，土壤容重 ( $\rho$ )，土壤有机质含量 ( $O_M$ )，日平均气温 ( $T_{air}$ ) 和逐日水深 ( $W_D$ )。

CH4MOD<sub>wetland</sub> 模型是一个逐日驱动模型，模型在初始化输入参数以及逐日气温和水深数据的驱动下输出逐日的地上生物量 ( $W_i$ )，土壤氧化还原电位 ( $E_h$ )，根系分泌物、植物凋落物和土壤有机质分解的甲烷产生速率，甲烷排放速率（通过植物以及气泡传输）等。本研究对于模型甲烷排放速率  $E$  重点进行了重点试验验证。模型中所有变量及参数的有关说明见表 1。

#### 4.3 三江平原甲烷排放季节性变化的模拟验证

图 2 为模拟和观测的三江平原甲烷排放季节性变化，模拟的季节性变化趋势与观测结果有良好的 consistency。甲烷的季节变化趋势由水深、气温和地上植物的生长过程共同决定。当地表常年积水时，甲烷的季节变化趋势同气温以及地上生物量

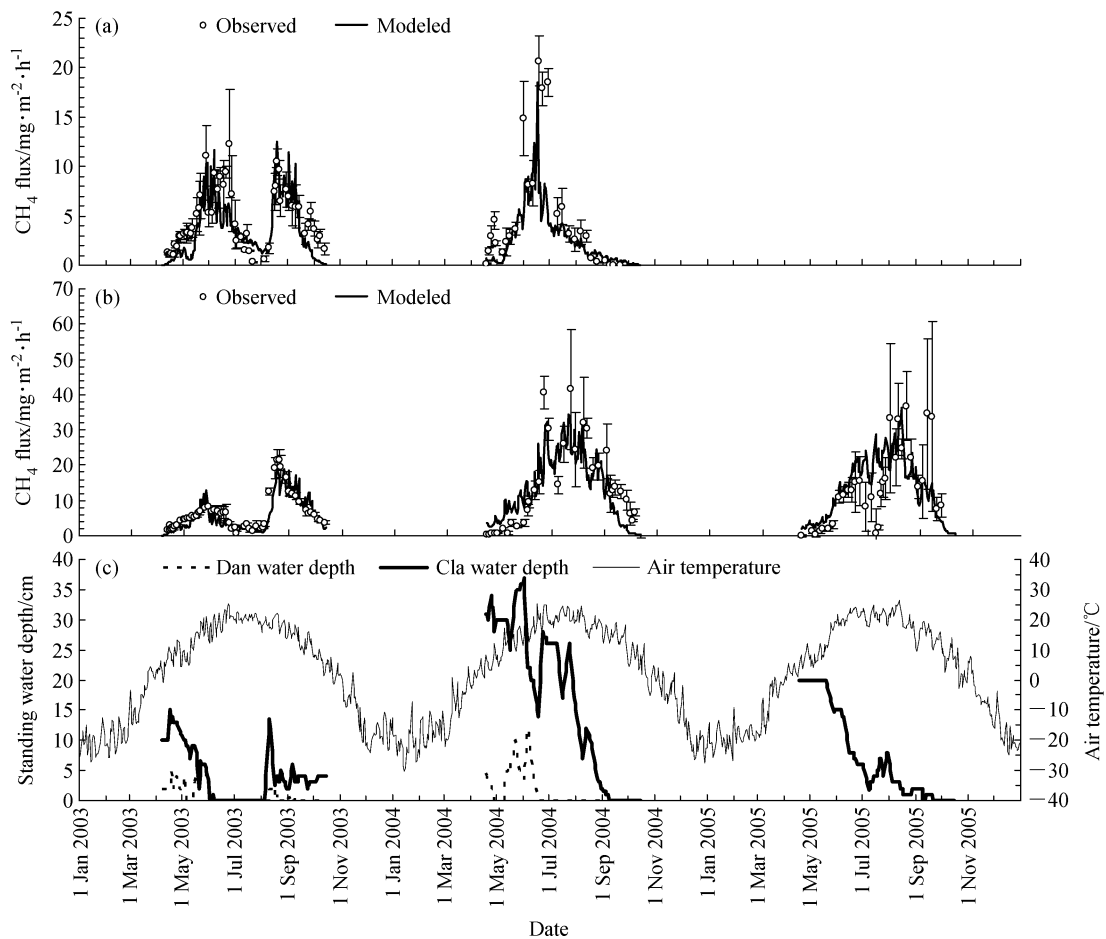


图 2 三江平原甲烷排放模拟值与观测值的比较以及相应的环境变量：(a) 小叶章沼泽 (Dan)；(b) 毛果苔草沼泽 (Cla)；(c) 环境变量。垂直误差线代表三个重复观测的标准误  
 Fig. 2 Comparison of simulated and observed seasonal patterns of CH<sub>4</sub> emissions from marshland and corresponding environments in the Sanjiang Plain: (a) *Deyeuxia angustifolia* (Dan); (b) *Carex lasiocarp* (Cla); (c) environments. The vertical bars are standard errors of three replicated measurements

表 1 CH4MOD<sub>wetland</sub> 模型输入参数、输出结果、变量和常量的定义及描述

Table 1 Description of model input parameters, output result, variables, and empirical constants

变量	定义及描述	取值	来源
产甲烷底物	$f_v$ 植被类型系数	输入参数 2.8 <sup>a</sup> , 2.4 <sup>b, c, d</sup>	本研究
	$W_0$ 地上生物量初值	$2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$	本研究
	$W_{\max}$ 地上生物量最大值	输入参数 485 <sup>a</sup> , 450 <sup>b</sup> , 340 <sup>c</sup> , 290 <sup>d</sup> $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	郝庆菊 (2006), 田应兵等 (2003)
	$T_{A0}$ 植物萌发所需积温	输入参数 50 <sup>a, b</sup> , 10 <sup>c, d</sup> $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	本研究
	$T_{A\max}$ 地上生物量达最大值所需积温	输入参数 2000 <sup>a, b</sup> , 800 <sup>c, d</sup> $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	本研究
	$T_s$ 植物衰老积温	模型变量 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )	本研究
	$W_i$ 逐日地上生物量	模型输出 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Huang et al. (1998, 2004)
	$N_0$ 植物凋落物初始 N 含量	输入参数地上凋落物 19.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 地下凋落物 9.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Silver and Miya (2001), Laursen (2004)
	$G_0$ 植物凋落物初始木质素含量	输入参数地上凋落物 170 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 地下凋落物 200 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Silver and Miya (2001), Laursen (2004)
	$F_R$ 植物地下净初级生产力占总净初级生产力的比例	输入参数 0.5 <sup>a</sup> , 0.6 <sup>b, c, d</sup>	马学慧等 (1996), 田应兵等 (2003)
	$k_{\text{SOM}}$ 土壤有机质的一阶动力学降解系数	$8 \times 10^{-6} \text{ d}^{-1}$	Scanlon and Moore (2000)
	$O_M$ 土壤有机质含量	输入参数 70 <sup>a</sup> , 246 <sup>b</sup> , 520 <sup>c, d</sup> $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全国土壤普查办公室 (1994, 1996)
	$\rho$ 土壤容重	输入参数 1.00 <sup>a</sup> , 0.74 <sup>b</sup> , 0.75 <sup>c, d</sup> $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	全国土壤普查办公室 (1994, 1996)
	$H$ 土壤厚度	输入参数 50 cm	刘景双等 (2003)
	$a, b$ 植物生长相关系数	经验常数 0.073, -0.078	本研究
	$\beta$ 植物凋落相关系数	经验常数 0.05 <sup>a, b</sup> , 0.01 <sup>c, d</sup>	本研究
	$\omega$ $F_L$ 变化系数	经验常数 0.0345	Ding et al. (2002)
	$T_{\text{air}}$ 日平均气温	模型输入 ( $^{\circ}\text{C}$ )	Huang et al. (1998, 2004)
	$W_D$ 水深	模型输入 (cm)	本研究
	$L$ 植物凋落物总量	模型变量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	本研究
	$F_N$ 凋落物中初始的易分解组分比例	模型变量 ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	黄耀等 (2003)
	$r$ 植物生长的内禀增长率	模型变量 ( $\text{d}^{-1}$ )	本研究
	$F_L$ 地上凋落物淹没在水中的比例	模型变量	本研究
	$D_{\text{SOM}}$ 土壤有机质密度	模型变量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	本研究
	$C_p$ 植物根系分泌物供给的产甲烷底物	模型输出 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	Huang et al. (1998, 2004)
	$C_{\text{Lana}}$ 植物凋落物厌氧分解供给的产甲烷底物	模型输出 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	本研究
	$C_{\text{Laer}}$ 地上凋落物好氧分解	模型输出 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	本研究
	$C_{\text{SOM}}$ 土壤有机质分解供给的产甲烷底物	模型输出 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	本研究
甲烷产生和排放	$P_{\text{ox}}$ 甲烷在植物传输过程中被氧化的比例	0.5	Walter and Heimann (2000), Zhang et al. (2002)
	$F_{\text{bl}}$ 气泡排放占甲烷产生的最大比例	0.6	本研究
	$P$ 甲烷产生速率	模型输出 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	Huang et al. (1998, 2004)
	$E_p$ 植物排放速率	模型输出 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	Huang et al. (1998, 2004)
	$E_{\text{bl}}$ 气泡排放速率	模型输出 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	本研究
	$E$ 甲烷总排放速率	模型输出 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	Huang et al. (1998, 2004)
环境因子对甲烷产生和排放的影响	$Q_{10}$ 温度系数	3.0	Huang et al. (1998, 2004)
	$S_{\text{AND}}$ 土壤砂粒含量	输入参数 56.0 <sup>a</sup> , 47.0 <sup>b</sup> , 66 <sup>c, d</sup>	全国土壤普查办公室 (1994, 1996)
	$E_{\text{h0}}$ 初始氧化还原电位	水深 $\leq 0$ 时取 150 mV; 水深 $> 0$ 时取 -150 mV	本研究
	$E_{\text{hc}}$ 土壤氧化还原电位的临界值	水深 $\leq 0$ 时取 150 mV; 水深 $> 0$ 时取 -150 mV	本研究
	$\theta$ 土壤氧化还原电位变化系数	水深 $> 0$ 时取 0.13; 水深 $\leq 0$ 时取 0.025	Singh (2001), 高俊琴等 (2004)
	$f_{\text{Wana}}$ 水分对厌氧分解的影响系数	0.30	本研究
	$f_{\text{Waer}}$ 水分对好氧分解的影响系数	0.12	Neckles and Neill (1994)
	$f_T$ 土壤温度函数	模型变量	Huang et al. (1998, 2004)
	$T_{\text{soil}}$ 土壤温度	模型变量 ( $^{\circ}\text{C}$ )	Huang et al. (1998, 2004)
	$f_s$ 土壤质地函数	模型变量	Huang et al. (1998, 2004)
	$F_{\text{Eh}}$ 土壤氧化还原电位函数	模型变量	Huang et al. (1998, 2004)
	$E_{\text{h}}$ 土壤氧化还原电位值	模型变量 (mV)	Huang et al. (1998, 2004)

注: 上标 a 表示小叶章淡水沼泽, b 表示毛果苔草淡水沼泽, c 表示乌拉苔草泥炭沼泽, d 表示木里苔草泥炭沼泽。

的变化趋势相同 (图 2b)。模型对某些甲烷排放通量高值模拟偏低 (图 2b) 可以部分归因于观测通量的变异性较大; 此外, 在地表静止水层较深情况下 (图 2c), 实验过程中的人为扰动可能会增强气泡排放, 导致观测值偏高。模拟与实测数据 (图 2a 和 b) 的回归系数  $R^2=0.56$  ( $n=206$ ,  $p<0.001$ )。模拟和实测值的均方根误差 (RMSE)、平均偏差 (RMD) 和模型效率 (EF) 分别为 73.4%, -9.2% 和 0.54。

#### 4.4 若尔盖高原甲烷排放季节性变化的模拟验证

图 3 为模拟和观测的若尔盖高原甲烷排放季节性变化, 从图中可以看出, 模型基本能够模拟出甲烷排放的季节性变化趋势, 但是存在一些偏差。如乌拉苔草泥炭沼泽 9 月的模拟值偏低 (图 3a), 木里苔草泥炭沼泽 6~8 月模拟值偏高 (图 3b)。模型在若尔盖高原的模拟效果不如三江平原, 主要原因为: 本研究采用线性内插法填补两次观测之间的水深数据, 在若尔盖高原, 地表水

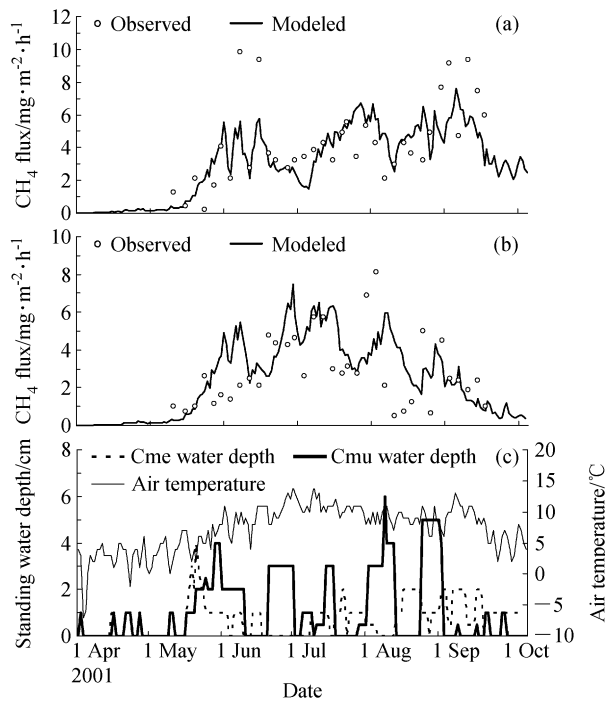


图 3 若尔盖高原甲烷排放模拟值与观测值的比较以及相应的环境变量: (a) 乌拉苔草泥炭沼泽 (Cme); (b) 木里苔草泥炭沼泽 (Dmu); (c) 环境变量

Fig. 3 Comparison of simulated and observed seasonal patterns of CH<sub>4</sub> emissions from marshland and corresponding environments in the Zoigê Plateau: (a) Peatland - *Carex meyeriana* (Cme); (b) Peatland - *Carex muliensis* (Cmu); (c) environments

深变化迅速, 并且在 2001 年 7~8 月地表呈斑块状积水 (王德宣等, 2002), 简单的线性插值法必然会给模拟结果带来不确定性 (图 3a 和 b)。若尔盖高原冷湿气候条件使得气温变化极不稳定 (王德宣等, 2002), 因此没有明显的甲烷排放高峰 (图 3a 和 b)。乌拉苔草沼泽甲烷排放通量略高于木里苔草沼泽主要是由于乌拉苔草的地上生物量较大 (表 1)。模拟与实测值 (图 3a 和 b) 的回归系数  $R^2=0.31$  ( $n=206$ ,  $p<0.001$ )。模拟和实测值的均方根误差 (RMSE)、平均偏差 (RMD) 和模型效率 (EF) 分别为 54.5%, 1.05% 和 0.28。

#### 4.5 湿地甲烷排放季节总量的模拟验证

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 9.2 和 61.3 g·m<sup>-2</sup>, 统计平均值为 30.2 g·m<sup>-2</sup>。模拟的甲烷排放季节总量最小值和最大值分别为 11.1 和 58.4 g·m<sup>-2</sup>, 统计平均值为 28.0 g·m<sup>-2</sup>。将观测值与模拟值做 OP 回归分析 (Observed vs. Predicted analysis) (Pineiro et al., 2008), 其决定系数

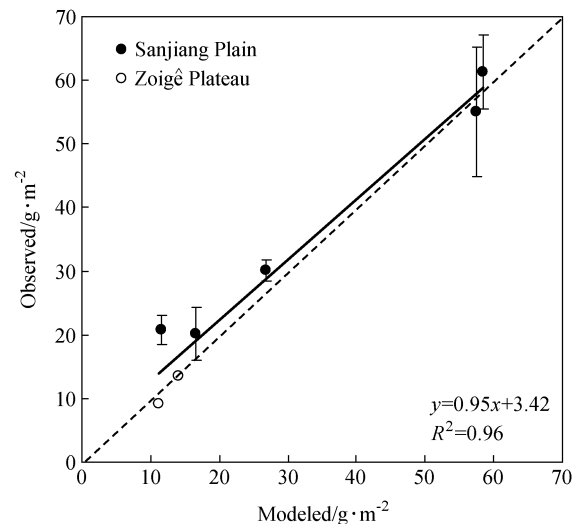


图 4 三江平原沼泽 (2003~2005 年) 和若尔盖高原泥炭沼泽 (2001 年) 甲烷季节排放总量模拟值与观测值的比较。垂直误差线代表 3 个重复样本的标准误

Fig. 4 Regression of simulated against observed total amount of seasonal CH<sub>4</sub> emission from marshland in the Sanjiang Plain (2003-2005) and from peatland in the Zoigê Plateau (2001). The vertical bars are the standard errors from three sampling replicates



$R^2=0.96$  ( $n=7$ ,  $p<0.001$ ), 相应的回归方程可表示为  $y_{\text{observed}}=0.95 \times x_{\text{modeled}}+3.42$  (图 4)。模拟和实测值的均方根误差、平均偏差和模型效率分别为 14.1%、-6.7% 和 0.95。

## 5 结论

以现有的稻田甲烷排放模型 CH4MOD 为基础, 基于自然湿地与稻田甲烷排放的差别对 CH4MOD 进行修改, 建立自然湿地甲烷排放模型 CH4MOD<sub>wetland</sub>。模型对三江平原淡水沼泽和若尔盖高原泥炭沼泽甲烷排放观测数据的验证结果表明: CH4MOD<sub>wetland</sub> 可以很好地模拟三江平原沼泽甲烷排放季节变化趋势, 但是在若尔盖高原, 模拟值与观测值之间季节变化趋势差异较大。模拟和观测的季节甲烷排放总量在两地均有较好的一致性。模型的有效性仍需更多观测数据进行进一步验证与校正。

## 参考文献 (References)

- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization, 465pp.
- Bogedom P M, Wassmann R, Metra-Corton T M. 2001. A process-based model for methane emission predictions from flooded rice paddies [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 15: 247-263.
- Cao M, Dent J B, Heal O W. 1995. Modeling methane emissions from rice paddies [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 9: 183-195.
- 丁爱菊, 王明星. 1995. 稻田甲烷排放的初级模式 [J]. *大气科学*, 19 (6): 740-745. Ding Aiju, Wang Mingxing. 1995. A preliminary model for methane emission from rice fields [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 19 (6): 740-745.
- Ding W, Cai Z, Tsuruta H, et al. 2002. Effect of standing water depth on methane emissions from freshwater marshes in north-east China [J]. *Atmos. Environ.*, 36: 5149-5157.
- Ding W, Cai Z, Wang D. 2004. Preliminary budget of methane emissions from natural wetlands in China [J]. *Atmos. Environ.*, 38: 751-759.
- Ding W, Cai Z, Tsuruta H. 2005. Plant species effects on methane emissions from freshwater marshes [J]. *Atmos. Environ.*, 39: 3199-3207.
- Ding W, Cai Z. 2007. Methane emission from natural wetlands in China: Summary of years 1995-2004 studies [J]. *Pedosphere*, 17: 475-486.
- Frolking S, Roulet N T, Moore T R, et al. 2001. Modeling northern peatland decomposition and peat accumulation [J]. *Ecosystems*, 4: 479-498.
- 高俊琴, 欧阳华, 吕宪国, 等. 2004. 三江平原小叶章湿地枯落物分解及其影响因子研究 [J]. *水土保持学报*, 18 (4): 121-136. Gao Junqin, Ouyang Hua, Lü Xianguo, et al. 2004. Study on litter decomposition and influence factors in calamagrostis angustifolia wetland in Sanjiang Plain [J]. *Journal of Soil and Water Conversation (in Chinese)*, 18 (4): 121-136.
- Gorham E, Janssens J A, Glaser P H. 2003. Rates of peat accumulation during the postglacial period in 32 sites from Alaska to Newfoundland, with special emphasis on northern Minnesota [J]. *Canadian Journal of Botany*, 81: 429-438.
- 郝庆菊. 2006. 三江平原沼泽土地利用变化对温室气体排放影响的研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 205pp.
- Hao Qingju. 2006. Effect of land-use change on greenhouse gases emissions in freshwater marshes in the Sanjiang Plain [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 205pp.
- 何池全. 2003. 毛果苔草湿地枯落物及其地下生物量动态 [J]. *应用生态学报*, 14 (3): 363-366. He Chiquan. 2003. Dynamics of litter and under-ground biomass in *Carex lasiocarpa* wetland on Sanjiang Plain [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese)*, 14 (3): 363-366.
- 黄国宏, 肖笃宁, 李玉祥, 等. 2001. 芦苇湿地温室气体甲烷 (CH<sub>4</sub>) 排放研究 [J]. *生态学报*, 21 (9): 1493-1496. Huang Guohong, Xiao Duning, Li Yuxiang, et al. 2001. CH<sub>4</sub> emissions from the reed wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica (in Chinese)*, 21 (9): 1493-1496.
- Huang Y, Sass R L, Fisher F M. 1997. Methane emission from Texas rice paddy soils. 1. Quantitative multi-year dependence of CH<sub>4</sub> emission on soil, cultivar and grain yield [J]. *Global Change Biology*, 3: 479-489.
- Huang Y, Sass R L, Fisher F M. 1998. A semi-empirical model of methane emission from flooded rice paddy soils [J]. *Global Change Biology*, 4: 247-268.
- 黄耀, 沈宇, 周密, 等. 2003. 木质素和含氮量对植物残体分解的影响 [J]. *植物生态学报*, 27 (2): 183-188. Huang Yao, Shen Yu, Zhou Mi, et al. 2003. Decomposition of plant residue as influenced by its lignin and nitrogen [J]. *Acta Phytocologica Sinica (in Chinese)*, 27 (2): 183-188.
- Huang Y, Zhang W, Zheng X, et al. 2004. Modeling methane emission from rice paddies with various agricultural practices [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D08113, doi: 10.1029/2003JD004401.
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 987pp.

- Joabsson A, Christensen T R, Wallén B. 1999. Vascular plant controls on methane emissions from northern peatforming wetlands [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 14: 385–388.
- Kapoor D. 2005. Sources and sinks of methane: Future concentrations and impact on global warming [D]. M. S. thesis, University of Pittsburgh, 90pp.
- King J Y, Reeburgh W S, Thieler K K, et al. 2002. Pulse-labeling studies of carbon cycling in arctic tundra ecosystems: The contribution of photosynthates to methane emission [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 16: 1062, doi: 10.1029/2001GB001456.
- Laursen K R. 2004. The effects of nutrient enrichment on the decomposition of belowground organic matter in a *Sagittaria lancifolia*-dominated oligohaline marsh [D]. M. S. thesis, Louisiana State University, 80pp.
- Li C. 2000. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 58: 259–276.
- 刘景双, 杨继松, 于君宝, 等. 2003. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征和研究 [J]. *水土保持学报*, 17 (3): 5–8.
- Liu Jingshuang, Yang Jisong, Yu Junbao, et al. 2003. Study on vertical distribution of soil organic carbon in wetlands Sanjiang Plain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation (in Chinese)*, 17 (3): 5–8.
- 马学慧, 吕宪国, 杨青, 等. 1996. 三江平原沼泽地碳循环初探 [J]. *地理科学*, 16 (4): 323–330. Ma Xuehui, Lü Xianguo, Yang Qing, et al. 1996. Carbon cycle of a marsh in Sanjiang Plain [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 16 (4): 323–330.
- Neckles H A, Neill C. 1994. Hydrologic control of litter decomposition in seasonally flooded prairie marshes [J]. *Hydrobiologia*, 286: 155–165.
- 潘华盛, 张桂华, 徐南平. 2003. 20世纪80年代以来黑龙江气候变暖的初步分析 [J]. *气候与环境研究*, 8 (3): 348–355. Pan Huasheng, Zhang Guihua, Xu Nanping. 2003. A preliminary analysis of climate warming in Heilongjiang province since the 1980s [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8 (3): 348–355.
- Pineiro G, Perelman S, Guerschman J P, et al. 2008. How to evaluate Models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? [J]. *Ecological modeling*, 216: 316–322.
- Scanlon D, Moore T. 2000. Carbon dioxide production from peatland soil profiles: The influence of temperature, oxic/anoxic conditions and substrate [J]. *Soil Science*, 165 (2): 153–160.
- Silver W L, Miya R K. 2001. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects [J]. *Oecologia*, 129: 407–419.
- Singh S N. 2001. Exploring correlation between redox potential and other edaphic factors in field and laboratory conditions in relation to methane efflux [J]. *Environment International*, 27: 265–274.
- Shannon R D, White J R, Lawson J E, et al. 1996. Methane efflux from emergent vegetation in peatlands [J]. *Journal of Ecology*, 84: 239–246.
- Smith P, Smith J U, Powlson D S, et al. 1997. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments [J]. *Geoderma*, 81: 153–225.
- Song C, Zhang J, Wang Y, et al. 2007. Emission of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O from freshwater marsh in northeast of China [J]. *Journal of Environmental Management*, 40: 6879–6885.
- 全国土壤普查办公室. 1994. 中国土种志 (第二卷) [M]. 北京: 农业出版社, 622–637. State Soil Survey Service of China (SSSSC). 1994. *China Soil Series (Vol. 2)* [M] (in Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 622–637.
- 全国土壤普查办公室. 1996. 中国土种志 (第六卷) [M]. 北京: 农业出版社, 512–513. State Soil Survey Service of China (SSSSC). 1996. *China Soil Series (Vol. 6)* [M] (in Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 512–513.
- 田应兵, 熊明彪, 熊小山, 等. 2003. 若尔盖高原湿地土壤—植物系统有机碳的分布与流动 [J]. *植物生态学报*, 27 (4): 490–495. Tian Yingbing, Xiong Mingbiao, Xiong Xiaoshan, et al. 2003. The organic carbon distribution and flow in wetland soil-plant system in Ruergai Plateau [J]. *Acta Phytocologica Sinica (in Chinese)*, 27 (4): 490–495.
- Walter B P, Heimann M. 2000. A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 14: 745–765.
- 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 等. 2002. 若尔盖高原沼泽湿地甲烷排放研究 [J]. *地球科学进展*, 17 (6): 877–880. Wang Dexuan, Lü Xianguo, Ding Weixin, et al. 2002. Methane emission from marshes in Zoigê Plateau [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 17 (6): 877–880.
- Whiting G J, Chanton J P. 1992. Plant-dependent CH<sub>4</sub> emission in a subarctic Canadian fen [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 6: 225–231.
- Wuebbles D J, Hayhoe K. 2002. Atmospheric methane and global change [J]. *Earth-Science Reviews*, 57: 177–210.
- 王亚平, 黄耀, 张稳. 2008. 中国东北三省1960~2005年地表干燥度变化趋势 [J]. *地球科学进展*, 23 (6): 619–627. Wang Yaping, Huang Yao, Zhang Wen. 2008. Variation and tendency of surface aridity index from 1960 to 2005 in three provinces of northeast China [J]. *Advances in Earth Sciences (in Chinese)*, 23 (6): 619–627.
- 王毅勇, 郑循华, 宋长春, 等. 2006. 三江平原湿地 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 的地—气交换特征 [J]. *地理研究*, 25 (3): 457–467. Wang Yiyong, Zheng Xunhua, Song Changchun, et al. 2006. Characteristics of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O exchange between wetland and atmosphere in the Sanjiang Plain [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 25 (3): 457–467.
- 闫敏华, 邓伟, 马学惠. 2001. 大面积开荒扰动下的三江平原近 45

- 年气候变化 [J]. 地理学报, 56 (2): 159 - 170. Yan Minhua, Deng Wei, Ma Xuehui. 2001. Climate variation in the Sanjiang Plain disturbed by large scale reclamation during the last 45 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 56 (2): 159 - 170.
- Yang W, Song C, Zhang J. 2006. Dynamics of methane emissions from a freshwater marsh of northeast China [J]. Science of the Total Environment, 371: 286 - 292.
- 张树清, 庄毓敏, 汪爱华, 等. 2002. 三江平原沼泽湿地时空动态特征 [J]. 地理学报, 57: 94 - 100. Zhang Shuqing, Zhuang Yumin, Wang Aihua, et al. 2002. The spatial-temporal dynamics of marsh in the Sanjiang Plain [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 57: 94 - 100.
- 张稳, 黄耀, 郑循华, 等. 2004. 稻田甲烷排放模型研究——模型及其修正 [J]. 生态学报, 24 (11): 2347 - 2352. Zhang Wen, Huang Yao, Zheng Xunhua, et al. 2004. Modeling methane emission from rice paddies: Model and modification [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 24 (11): 2347 - 2352.
- 张文菊, 吴金水, 肖和艾, 等. 2004. 三江平原典型湿地剖面有机碳分布特征与积累现状 [J]. 地球科学进展, 19 (4): 558 - 563. Zhang Wenju, Wu Jingshui, Xiao Heai, et al. 2004. Profile distribution characteristics and accumulation of organic carbon in typical wetlands in Sanjiang Plain [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 19 (4): 558 - 563.
- Zhang W, Xiao H, Tong C, et al. 2008. Estimating organic carbon storage in temperate wetland profiles in Northeast China [J]. Geoderma, 146: 311 - 316.
- Zhang Y, Li C, Trettin C C, et al. 2002. An integrated model of soil, hydrology, and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems [J]. Global Biogeochemical Cycles, 16, 1061, doi: 10.1029/2001GB001838.