

稻田甲烷排放模型研究

——模型及其修正

张 稳^{1,2}, 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: 在过去十多年来, 关于稻田甲烷排放的模拟已经进行了不少有益的探索并且开发出了数个有关的模型。模型的成功研制是准确定量估计不同区域范围内稻田甲烷排放的前提。以往大部分模型由于模拟精度不高, 或者是其要求太多的输入参数, 因而限制了它在大尺度范围内的广泛应用。在一个比较成熟的模型基础上, 进行了必要的修正与扩充。增加了稻田甲烷通过气泡方式排放的模拟模块, 并修正了原模型中关于土壤氧化还原电位变化的模拟, 使之能适应于多种稻田水管理方式。新修正的模型(CH₄MOD)不仅保留了原模型输入参数较少和易于获得的优点, 而且能适应多种水稻耕作方式, 这为进一步利用模型技术准确估计大尺度区域稻田甲烷排放提供了一种新的科学方法。

关键词: CH₄MOD; 稻田; 甲烷; 模型

Modeling methane emission from rice paddies: model and modification

ZHANG Wen^{1,2}, 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(11): 2347~2352.

Abstract: Precise estimates of CH₄ emissions from rice fields have been difficult to determine due to regional differences in spatial and temporal variability in climate, soils and agricultural practices. To obtain estimates of methane emissions from regional or global rice paddies, attention must be focused on an examination of methodologies by which the current high uncertainties in the estimates might be reduced. One possible way to do this is the development of predictive models. With an understanding of the processes of methane production, oxidation and emission, Huang *et al.* developed a model to predict methane emission from rice paddy soils. Validated against independent field measurements of methane emission from rice paddies in USA, China and Italy, Huang's model provides a realistic estimate of the observed results. However, Huang's model was primarily developed for continuous flooding and not for intermittent irrigation rice paddies. Moreover, the methane emission via ebullition was not taken into account in their model. The objective of this paper is to modify Huang's model so as to make it capable of simulating methane emissions from irrigated rice fields under various agricultural practices.

We accept the hypothesis from the original model that methanogenic substrates are primarily derived from rice plants and added organic matter. Rates of methane production in flooded rice soils are determined by the availability of methanogenic substrates and the influence of environmental factors. The fraction of methane emitted through plants is controlled by rice growth and development. Rates of methane transported from soil to the atmosphere via plants are determined by the rates of production and the emitted fraction. Modification to the original model focuses on the effect of water regime on methane production/emission and the methane transport via bubbles. The effect of water regime was quantified by soil Eh. Changes 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); 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, 河北省人, 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

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: 2004-03-12; **Accepted date:** 2004-08-20

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

the soil Eh during drainage course and re-flooding course were simulated by two differential equations, respectively. Simulation of the soil Eh during the re-flooding course associated the decomposition of added organic carbon. Methane emission via bubbles was modeled by soil temperature, rice root growth and the difference between methane production rate and a critical rate when the bubbles occur.

New features of the present model, named as CH₄MOD, are the incorporation of bubble flux process and the drainage events into the original model. Overall, the advantages of this model make it particularly applicable to the simulation of methane emissions from irrigated rice fields with few input parameters of irrigation patterns, type and amount of organic matter amendment, rice grain yield, air temperature, and soil sand percentage.

Key words: CH₄MOD; rice paddies; methane; model

文章编号:1000-0933(2004)11-2347-06 中图分类号:Q958 文献标识码:A

甲烷(CH₄)是重要的温室气体之一,以20a 时间尺度计,其全球增温潜势(Global Warming Potential)是CO₂ 的62 倍^[1]。全球而言,稻田的甲烷排放约占总排放的9%~30%^[2,3]。对于稻田甲烷排放的精确估计一直是一个有待更多努力的问题,其主要困难在于气候、土壤以及农业耕作方式等影响稻田甲烷排放的因素在时间和空间上都存在着巨大的差异。早期的估计是将某一地点的观测结果外推到区域乃至全球尺度^[4,5],或者是将稻田甲烷排放与某个变量(如稻田的净初级生产力,稻谷产量等)建立统计关系,然后加以估算^[6~8]。这些简单的方法忽略了稻田甲烷产生、氧化以及排放过程的复杂机理,不可避免地使估计值带有巨大的误差。为了提高估计的精度,采用机理化的模型方法成为必然的选择。利用模型技术建立起的稻田甲烷产生、氧化以及排放过程与其主要影响因子之间的动力学关系方程组,能大大提高估计的精度。更进一步地,将模型与GIS 技术相结合,使得模型可以针对影响稻田甲烷排放诸多因素的时空变化,模拟出更加接近实际状况的结果。通过这种途径进行大尺度区域的稻田甲烷排放估计,比简单的外推估计更合理和具有更强的解释性。

近十余年来,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^[9~14]。基于对稻田甲烷产生、氧化和排放等关键过程的理解,Huang 等开发了一个模拟稻田甲烷诸过程的模型^[10],并利用美国德州、中国四川和意大利vercelli 的实测数据进行了验证。IPCC 在其2000 年的报告中(Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories: IPCC, 2000)对这个模型的模拟结果给予了充分肯定。相对于其它模型,Huang's 模型的显著特点是输入参数相对较少且容易获取,这非常有利于模型的区域化应用。因为在一个大尺度的区域范围内,输入参数的可获得性是制约该模型应用于区域模拟的重要因素。大量研究证实,水管理方式明显地影响稻田甲烷产生与排放^[15~17],气泡传输是水稻生长前期稻田甲烷排放的重要途径^[18]。然而,Huang's 模型仅对持续淹水稻田有效,也未考虑甲烷的气泡传输,仅模拟了通过水稻植株的甲烷排放。这些不足无疑会大大影响模拟的精度及时空扩展的可靠性,特别是对于我国不同的稻田水管理模式。

本文的主要目的是针对 Huang's 模型的不足,重点考虑稻田水管理和气泡传输对甲烷产生/排放的影响,修正和完善 Huang's 稻田甲烷排放模型,为利用模型估计我国稻田甲烷排放的时空变化提供工具。

1 Huang's 模型概述

Huang's 模型的基本假设为,稻田土壤的甲烷基质主要源于水稻植株的根系分泌物及加入到土壤中的有机物(包括前作残茬、有机肥、作物秸秆等)的分解。甲烷的产生率取决于产甲烷基质的供应以及环境因子的影响,甲烷氧化比例受水稻的生长发育所控制。

1.1 产生甲烷的基质

产甲烷基质主要来源之一的外源有机物分解,原模型的描述方程为:

$$C_{OM} = 0.65 \times SI \times TI \times (k_1 \times OM_N + k_2 \times OM_S) \tag{1}$$

式中, C_{OM} 为外源有机物每日分解所产生的甲烷基质(g/(m²·d))。 OM_N 和 OM_S 分别为有机物中易分解组分和难分解组分的含量(g/m²), k_1 和 k_2 是对应于这两种组分的潜在分解速率的一阶动力学系数。 SI 和 TI 分别表示土壤质地和土壤温度对这一过程的影响。

水稻在正常的生理活动过程中,其根系会不断地产生一些代谢的分泌物进入土壤。这些分泌物经土壤微生物分解后作为产甲烷菌的基质:

$$C_R = 1.8 \times 10^{-3} \times VI \times SI \times W^{1.25} \tag{2}$$

式中, C_R 为每日水稻植株代谢产生的甲烷基质(g/(m²·d)), VI 为水稻的品种系数,表示不同水稻品种间的差异, W 为水稻植株的地上生物量(g/m²):

$$W = \frac{W_{\max}}{1 + B_0 \times \exp(-r \times t)} \tag{3}$$

$$B_0 = W_{\max}/W_0 - 1 \tag{4}$$

$$W_{\max} = 9.46 \times GY^{0.76} \tag{5}$$

式中, GY 为稻谷产量(g/m^2), W_0 和 W_{\max} 分别表示水稻移栽期和成熟期地上部分生物量(g/m^2), $t(\text{d})$ 表示移栽后的天数, r 为水稻地上部分内禀生长率。

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, $SAND$)、温度(T_{soil})及氧化还原电位(Eh)。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它们对甲烷产生的影响,并分别表示为:

土壤质地影响函数 $SI = 0.325 + 0.0225 \times SAND$ (6)

土壤温度影响函数 $TI = Q_{10}^{\frac{T_{\text{soil}} - 3}{10}} (T_{\text{soil}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ 当 } 30\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{soil}} \leq 40\text{ }^{\circ}\text{C})$ (7)

土壤氧化还原电位影响函数 $F_{Eh} = \exp\left(-1.7 \times \frac{150 + Eh}{150}\right) (Eh = -150 \text{ 当 } Eh < -150 \text{ 时})$

程,其取值范围为 $2 \sim 4$ ^[5,19],原模型取 $Q_{10} = 3.0$ 。 Eh 为土壤氧化还原电位(mv),原模型将其表达为初次灌溉后天数的函数^[10]。

1.3 甲烷产生率及其向大气的排放

土壤中甲烷的产生源于土壤还原条件下各种产甲烷菌的活动,在这一过程中,土壤的氧化还原电位具有关键性的影响。稻田土壤中甲烷的产生率($P, \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)表示为:

$$P = 0.27 \times F_{Eh} \times (C_{OM} + TI \times C_R) \tag{9}$$

式中,常数 0.27 是甲烷(CH_4)分子量与产甲烷基质($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)分子量的比值。

土壤中甲烷通过水稻植株的通气组织向大气排放。随着水稻的生长,甲烷向大气的排放量占土壤甲烷产生量的比例(F_p)越来越小。原模型给出方程(10)来描述这个比例的变化:

$$F_p = 0.55 \times \left(1 - \frac{W}{W_{\max}}\right)^{0.25} \tag{10}$$

由方程(9)和(10)可以得出稻田甲烷通过植株通气组织的排放率($E_p, \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)为:

$$E_p = E_p \times P \tag{11}$$

2 对 Huang's 模型的扩充与修正

Huang's 模型对于持续淹水的稻田甲烷排放具有很好的模拟效果^[10]。但是我国常用的稻田水管理是淹水、烤田、湿润灌溉相结合的灌溉方式,原模型对此没有足够精确地描述。另一方面,原模型仅仅考虑了甲烷通过植株通气组织途径的排放,而对于稻田甲烷的其它排放途径并未涉及。针对原模型的这些不足,本文进行了必要的修正与扩充。

2.1 甲烷通过气泡方式从稻田土壤中的排放

在土壤水中的甲烷达到最大饱和和溶解度之后,新产生的甲烷就会聚集形成气泡。这些气泡聚集到一定体积,在浮力作用下快速向上运动并最终通过水气界面进入大气。这个过程中气泡中的甲烷极少被氧化。这一途径主要表现在水稻生长的初期,植株通气组织不够发达的时候,随着水稻通气组织的逐步发育,甲烷的排放逐渐过渡到通过植株通气组织的途径进入大气^[5,19~22]。考虑到这些过程,稻田甲烷的总排放($E, \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)表述为:

$$E = E_p + E_{bl} = \min\left(F_p, 1 - \frac{E_{bl}}{P}\right) \times P + E_{bl} \tag{12}$$

式中, P 为土壤中甲烷的生产速率($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), E_{bl} 为甲烷通过气泡形式向大气的排放($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。本文采用李晶^①的研究结果对气泡排放过程进行模拟:

$$E_{bl} = 0.7 \times (P - P_0) \times \ln(T_{\text{soil}})/W_{\text{root}} \tag{13}$$

式中, P_0 是土壤中甲烷达到饱和后产生气泡的临界甲烷生产率($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。当土壤中水溶性甲烷达到饱和并且 $P > P_0$ 时,便会有甲烷气泡产生, P_0 的取值为 0.002 ^①。 T_{soil} 为土壤温度($^{\circ}\text{C}$)。 W_{root} 为水稻的根生物量(g/m^2),采用 Yoshida 的研究结果^[23],经单位变换后,将其表达成如下的函数:

$$W_{\text{root}} = 0.136 \times (W_{\text{root}} + W)^{0.936} \tag{14}$$

式中, W 为水稻的地上生物量(g/m^2)。利用方程(14),对给定的 W 值(方程(3)),通过一个离散化的递归算法($W_{\text{root}}^{(0)} = 0$ 作

—— 万方数据 ——
① 李晶,1999,稻田甲烷排放模型及减排技术(博士论文),中国科学院大气物理研究所

为起始, $W_{\text{root}}^{(i)} - W_{\text{root}}^{(i-1)} < 0.1$ 作为递归的结束条件), 可以计算出对应的水稻根生物量。

2.2 稻田水管理对土壤 Eh 的影响及其模拟

Mishra 等的研究表明, 稻田灌水后的数天之内 Eh 值迅速下降; 间歇灌溉时土壤 Eh 值呈波动变化^[16]。原模型中对于土壤 Eh 值变化的模拟仅限于稻田初次淹水的情况, 未涉及我国水稻种植中经常使用的烤田及间歇灌溉的水管理方式。Matthews 等的研究认为, 土壤 Eh 的变化同时还受到土壤质地以及土壤中有机的影响, 实质上是一个土壤中电子受体的消耗与恢复的过程^[13]。采用这一思想, 本文用表示资源消耗的一阶微分方程(差分形式)来模拟土壤 Eh 的变化:

$$\begin{cases} Eh^{(t+1)} = Eh^{(t)} - D_{Eh} \times (A_{Eh} + \min(1, C_{OM})) \times (Eh^{(t)} - B_{Eh}) & \text{淹水过程} \\ Eh^{(t+1)} = Eh^{(t)} - D_{Eh} \times (A_{Eh} + 0.7) \times (Eh^{(t)} - B_{Eh}) & \text{排干过程} \end{cases} \quad (15)$$

式中, t 表示淹水或烤田开始后的天数, $Eh^{(t)}$ 表示时间 t 的土壤 Eh 值, A_{Eh} 和 D_{Eh} 是差分系数。利用曹金留等^[24]在江苏句容以及本研究组在南京的田间土壤 Eh 观测数据, 通过最小二乘法可以得出 A_{Eh} 和 D_{Eh} 的值分别为 0.23 和 0.16。 B_{Eh} 为假定的土壤 Eh 值上限(对于烤田过程)和下限(对于淹水过程), 其取值分别为 300mv 和 -250mv。虽然实际上的土壤 Eh 变化范围要比本文假定的大, 但对于模拟甲烷变化来说, 当土壤 Eh 大于 300mv 或小于 -250mv 时, Eh 对土壤甲烷的产生、氧化以及排放过程影响的变化不大^[18]。对于间歇灌溉, 由于灌溉频率不同, 土壤保持湿润的程度也不同, 因而土壤 Eh 的状况也有较大差异, 很难用一个确定性方程来描述。本文假定这种情况下土壤 Eh 值在 -20mv 左右随机波动, 波动幅度为 10~20mv。

3 模型的参数与变量

通过模型对稻田甲烷的排放进行模拟, 除了利用方程组及模型变量对有关的过程进行完整精确的描述外, 还需要初始化的模型输入参数、模型常量参数以及模型的过程化驱动参数。模型中这些变量以及参数的有关说明见表 1。

表 1 模型输入参数、变量、常量及其定义描述

Table 1 Description of model input parameters, variables and empirical constants		
参变量名称 Item	定义及描述 Definition and description	取值 Value
水稻生长 Rice growth		
W	地上生物量 Above ground mass	模型变量 Variable (g/m ²)
W_0	水稻移栽期地上生物量 Above ground mass at transplanting date	15(g/m ²)
W_{max}	水稻成熟期地上生物量 Above ground mass at harvest	模型变量 Variable (g/m ²)
W_{root}	水稻根生物量 Rice root mass	模型变量 Variable (g/m ²)
GY	稻谷产量 Rice grain yield	输入参数 Input parameter (g/m ²)
r	水稻生长的内秉增长率 Rice intrinsic growth rate	单季稻 Single rice 0.08(d ⁻¹), 双季早 Early rice、晚稻 Later rice 0.1(d ⁻¹)
产甲烷基质 Methanogenic substrates		
C_R	源于水稻根际分泌物 Carbohydrates derived from rice root exudation	模型变量 Variable (g/(m ² · d))
C_{OM}	源于外源有机质分解 Carbohydrates derived from OM decomposition	模型变量 Variable (g/(m ² · d))
OM	外源有机质添加量 Organic matter amendment	输入参数 Input parameter(g/m ²)
OM_N	外源有机质的易分解组分含量 Non-structural component of OM	模型变量 Variable (g/m ²)
OM_S	外源有机质的难分解组分含量 structural component of OM	模型变量 Variable (g/m ²)
k_1	易分解组分的一阶动力学腐解系数 First order decay rate of OM_N	2.7×10^{-2} (d ⁻¹)
k_2	难分解组分的一阶动力学腐解系数 First order decay rate of OM_S	3.0×10^{-3} (d ⁻¹)
VI	水稻品种系数 Rice variety index	输入参数 Input parameter
甲烷产生及排放 Methane production and emission		
P	甲烷产生率 CH ₄ production	模型变量 Variable (g/(m ² · d))
P_0	生成气泡的临界甲烷产生率 Criterion of CH ₄ production when CH ₄ bubbles occur	0.002(g/(m ² · d))
F_p	植株甲烷排放占产生的比例 CH ₄ emitted fraction via rice plant	模型变量 Variable
E_p	植株甲烷排放率 CH ₄ emitted via rice plant	模型变量 variable, (g/(m ² · d))
E_{bl}	气泡甲烷排放率 CH ₄ emitted via bubbles	模型变量 Variable (g/(m ² · d))
E	甲烷总排放率 total CH ₄ emission	模型变量 Variable (g/(m ² · d))
环境因素的影响 Environmental factors and derivatives		
$SAND$	土壤砂粒含量 Soil sand percentage	输入参数 Input parameter, (%)
T_{soil}	土壤温度 Soil temperature	输入参数 Input parameter (C)
Eh	土壤氧化还原电位 Soil Eh	模型变量 Variable (mv)
Q_{10}	温度系数 Temperature coefficient	3.0
SI	土壤质地函数 Soil texture index	模型变量 Variable
TI	土壤温度函数 Soil temperature index	模型变量 Variable
F_{Eh}	土壤 Eh 函数 Soil Eh index	模型变量 Variable
A_{Eh}	土壤 Eh 变化的差分系数 Deferential coefficient of soil Eh	0.23(mv)
D_{Eh}	土壤 Eh 变化的差分系数 Deferential coefficient of soil Eh	0.16
B_{Eh}	土壤 Eh 的上、下限 Low and up limit for soil Eh	上限 Upper limit 300(mv) 下限 Low limit -250(mv)

4 小结和讨论

根据稻田水管理和气泡传输对甲烷产生/排放的影响的研究成果,本研究修正了 Huang's 稻田甲烷排放模型。新修正的模型(CH4MOD)不仅保留了原模型输入参数(土壤砂粒含量、气温、水稻产量、有机质种类和施用量)较少且易于获得的优点,而且增加了稻田水分管理对甲烷产生/排放的影响以及通过气泡形式的甲烷传输,使之具有更好的解释性,从而有可能用于估计不同耕作制度和水管理方式下的稻田甲烷排放。

CH4MOD 并未考虑化肥施用对甲烷排放的影响,主要原因是关于无机肥对稻田甲烷影响的生物化学机理目前尚不十分清楚,有关的试验观测结果也不一致^[5,25]。此外,CH4MOD 也未将土壤有机碳矿化作为产甲烷菌的基质,虽然以往的实验室培养研究指出^[26,27]甲烷的产生量与土壤有机碳含量有显著的正相关关系。然而,Huang 等^[28]对于 18 个不同土壤的水稻盆栽研究表明,CH₄ 排放与土壤有机碳含量之间无明显相关。其主要原因是水稻植株本身在稻田 CH₄ 排放过程中起着关键的作用,与根系分泌物为产甲烷微生物提供的营养基质相比,土壤原有有机碳矿化产生的营养基质可能是微不足道的。

模型的建立为更加准确地模拟与估计区域稻田甲烷的排放提供了一个新的技术手段。但是模型的有效性需要通过大量试验数据的广泛验证,其模拟结果才能够具有科学意义上的可靠性。关于这一方面的进一步工作将集中在对 CH4MOD 模型的广泛验证上,以期获得模型可靠性的试验证实。

References:

- [1] Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). *Climate Change*, 2001. <http://www.ipcc.ch/>.
- [2] Houghton JT, Meira Filho LG, Callander BA, *et al.* Climate change 1995. In: *The Science of Climate Change*, 1st ed., Cambridge University Press, New York, 1996.
- [3] Sass RL. Mitigation of methane emission from irrigated rice agriculture, *The Earth Observer*, 1995, **4**: 64~65.
- [4] Matthews E, Fung I, and Learner G. CH₄ emission from rice cultivation: Geographic and seasonal distribution of cultivated areas and emissions, *Global Biogeochem. Cy.*, 1991, **5**: 3~24.
- [5] 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.
- [6] Anastasi C, Dowding M, and Simpson VJ. Future CH₄ emission from rice production, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 7521~7525.
- [7] Bachelet D, Kern J, and Tolg M. Balancing the rice carbon budget in China using a spatially-distributed data, *Ecol. Model.*, 1995, **79**: 167~177.
- [8] Kern JS, Bachelet D, and Tölg M. Organic matter inputs and methane emission from soils in major rice growing regions of China, In: Lal R, Kimble J, Levine E, *et al.* eds. *Soils and Global Chang.* Boca Raton, FL, 1995. 189~198.
- [9] Ding AJ, Wang MX. Preliminary model for methane emission from rice fields, *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995, **19**(6): 733~740.
- [10] Huang Y, Sass RL, and Fisher FM. A semi-empirical model of methane emission from flooded rice paddy soils, *Glob. Change Biol.*, 1998, **4**: 247~268.
- [11] Cao MK, Dent JB, and Heal OW. Modeling methane emissions from rice paddies, *Global Biogeochem. Cy.*, 1995, **9**: 183~195.
- [12] Li CS. Modeling trace gas emission from agricultural ecosystems, *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2000, **58**: 259~276.
- [13] Matthews RB, 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.
- [14] Bodegom PM van, Wassmann R, and Metra-Corton TM. A process-based model for methane emission predictions from flooded rice paddies, *Global Biogeochem. Cy.*, 2001, **15**: 247~263.
- [15] Shangguan XJ, and Wang MX. Possible measures for the reduction of methane emission from rice paddy fields, *Advance in Earth Sciences*, 1993, **8**(5): 55~62.
- [16] Mishra S, Rath AK, Adhya TK, *et al.* Effect of continuous and alternate water regimes on methane efflux from rice under greenhouse conditions, *Biol. Fert. Soils*, 1997, **24**: 399~405.
- [17] Yagi K, Tsuruta H, Kanda K, *et al.* Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field; Automated methane monitoring, *Global Biogeochem. Cy.*, 1996, **10**: 255~267.
- [18] Shangguan XJ, Wang MX, Chen DZ, *et al.* Methane transport in rice paddies. *Advance in Earth Sciences*, 1993, **8**(5): 13~22.
- [19] Khalil M, Rasmussen RA, Wang MX, *et al.* Methane emission from rice fields in China. *Environmental Science and Technology*, 1991, **25**: 979~981.
- [20] Nouchi I. Mechanisms of methane transport through rice plants, In: Minami K, Mosier A and Sass R. eds. *CH₄ and N₂O: Global Emission and Controls from Rice Fields and Other Agricultural and Industrial Sources*. YOKENDO Publishers, Tokyo, 1994. 87~104.
- [21] Denier van der Gon HAC, and Neue HU. Influence of organic matter incorporation on methane emission from a wetland rice field, *Global Biogeochem. Cy.*, 1995, **9**: 11~22.
- [22] Wassmann R, Neue HU, Alberto MCR, *et al.* Fluxes and pools of methane in wetland rice soil with varying organic inputs, *Environ. Monit. Assess.*, 1996, **42**: 163~173.
- [23] Yoshida S. *Handbook of rice crop science*, Los Baños, Laguna, the Philippines IRRI, 1981.
- [24] Cao JL, Ren LT, Wang GH, *et al.* Methane Emission from Permeable Paddy Soils, *Agro-Environmental Protection*, 2000, **19**(1): 10~

14 .

[25] Lindau CW, Bollich PK, Delaune RD, *et al.* Effect of urea fertilizer and environmental factors on methane emission from a Louisiana, USA rice field, *Plant and Soil*, 1991, **136**: 195~203.

[26] Wassmann R, Neue HU, Bueno C, *et al.* Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates. *Plant and Soil*, 1998, **203**: 227~237.

[27] Yao H, Conrad R, Wassmann R, *et al.* Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy. *Biogeochemistry*, 1999, **47**(3): 267~293.

[28] Huang Y, Jiao Y, Zong LG, *et al.* Quantitative dependence of methane emission on soil properties, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **64**(2): 157~167.

参考文献:

[9] 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.

[15] 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.

[18] 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.

[24] 曹金留,任立涛,旺国好,等. 爽水性稻田甲烷排放特点. 农业环境保护, 2000,**19**(1):10~14.

《生态旅游景区开发》评介

生态旅游(ecotourism)作为一个独立英文词汇自20世纪80年代初提出以来,逐渐受到相关业界与学界的重视,研究成果也不少。目前我国,有关生态旅游的理论书籍已有10余本,但基本是偏重于理论探索,而云南大学杨桂华教授2004年7月出版的《生态旅游景区开发》一书则是在针对具体的生态旅游景区进行案例研究基础上著成的。

该书是一本作者综合运用生态旅游基本理论和景观生态学理论研究生态旅游景区开发的力作,书中系统阐述了生态旅游的可持续性和责任性,景观生态学的多维价值、时空格局评价等理论在生态旅游景区开发的应用途径,并以我国知名的香格里拉生态旅游示范区为例进行了实证研究,其中不乏新的观点和结论,该书言简意赅,深入浅出,特色鲜明,理论联系实际,对生态旅游景区保护性开发这个命题进行了深层次的探讨。

通览全书,可以看到作者扎实的学术功底、独到的思维方式以及所具有的多学科交叉的创新能力,是一本优秀的生态旅游研究著作,该书的创新点主要表现在以下几个方面:

(1)在国内首次系统提出生态旅游责任性理论。指出生态旅游的责任关系是双向的,即生态旅游既对旅游目的地社区负责,也对生态旅游者负责,并认为这种责任模式是一种理想的旅游责任模式,是实现可持续发展的保证,并从自然生态旅游目的地、社区生态旅游目的地和生态旅游者在3个方面来探索生态旅游双向责任模式实现的途径。

(2)应用景观生态学理论对生态旅游景区开发进行了有益的探索。作者把生态旅游景区视为“生态旅游景观系统”,并分析对其景观价值、景观格局及景观变化进行评价的意义与方法,这样就给刻画与把握一个生态旅游景区的自然与文化特征提供了独特的视角,能为开发建设提供更为科学的依据。

(3)结合中国国情发展和丰富生态旅游的内涵。香格里拉生态旅游示范区所处的云南迪庆州是一个藏族同胞聚居的地域,针对该地域的特点,作者提出了宗教生态旅游产品的概念,并将其与自然生态旅游产品、民俗生态旅游产品一起构建了香格里拉的生态旅游产品体系,并将“人与自然和谐共生”作为统领这三类生态旅游产品的核心理念,为我国同类地区的研究提供了如何进行地域文化旅游开发的示范。

(4)实证研究有鲜明的理论指导。生态旅游作为一个新兴的研究领域,无疑需要借鉴许多成熟的学科来作为理论指导,但由于生态旅游兼具社会科学与自然科学的特征,在以往的实证研究中所依据的理论太过宽泛,而且理论与实证联系的紧密度不够,而本书针对研究地点的实际,成功地运用景观生态学相关理论指导开发建设,是一次有益的尝试,相信对丰富生态旅游的理论体系能有所贡献。

本书对于读者了解生态旅游的有关理论及如何开发生态旅游景区很有帮助,它引导人们从景观生态学的视角来认识与分析生态旅游景区,并为政府相关部门、企业界开发与管理生态旅游景区提供一定的理论指导和经验借鉴。因此,该书的出版,具有理论与实践双重意义,对规范与发展我国的生态旅游业将起到积极的作用。

(中国科学院地理科学与资源研究所 钟林生)