

# 基于涡度相关通量数据的植被 最大光能利用率反演研究\*

张 强<sup>①</sup> 张 黎<sup>①</sup> 何洪林<sup>①</sup> 韩士杰<sup>②</sup> 李英年<sup>③</sup>  
欧阳竹<sup>①</sup> 石培礼<sup>①</sup> 王辉民<sup>①</sup> 郝彦宾<sup>④</sup> 张一平<sup>⑤</sup> 闫俊华<sup>⑥</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; <sup>②</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; <sup>③</sup>中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; <sup>④</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>⑤</sup>中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; <sup>⑥</sup>中国科学院华南植物园, 广州 510650)

**摘要** 准确估计和预测陆地生态系统碳循环时空变化是预测气候变化的基础, 也是目前全球变化研究中最重要的前沿领域之一。最大光能利用率( $\epsilon_{\max}$ )是遥感估算陆地生态系统初级生产力的关键参数之一, 本研究基于 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型, 采用马尔科夫链-蒙特卡罗 (Markov Chain Monte Carlo, 简称 MCMC) 方法, 利用中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 8 个野外台站的涡度相关通量观测数据对  $\epsilon_{\max}$  进行反演, 得到  $\epsilon_{\max}$  的最优估计值及其不确定性, 并利用优化后的  $\epsilon_{\max}$  对 2003~2008 年各生态系统总初级生产力 (Gross Primary Productivity, 简称 GPP) 及其不确定性进行了模拟。结果表明: 8 个生态系统  $\epsilon_{\max}$  后验估计结果均呈近似正态分布, 森林、农田和草地生态系统  $\epsilon_{\max}$  分别为  $0.737 \pm 0.026 \sim 0.850 \pm 0.035 \text{ g C/MJ} \cdot \text{PAR}$ ,  $1.056 \pm 0.090 \text{ g C/MJ} \cdot \text{PAR}$  和  $0.199 \pm 0.068 \sim 0.469 \pm 0.043 \text{ g C/MJ} \cdot \text{PAR}$ ;  $\epsilon_{\max}$  估计的不确定性将导致内蒙、当雄和海拔草地生态系统 GPP 年总量的模拟值产生 9.17%~14.20% 的误差, 长白山、鼎湖山、千烟洲和西双版纳 4 个森林生态系统 GPP 年总量的误差为 3.52%~7.79%, 禹城农田生态系统 GPP 年总量的误差为 8.52%。对  $\epsilon_{\max}$  进行优化后, GPP 年总量模拟值的相对误差显著降低, 有效改善了原模型对内蒙草地生态系统 GPP 年总量的高估和除当雄草地生态系统外其他 6 个生态系统 GPP 年总量的低估。

**主题词** CASA 模型 马尔科夫链-蒙特卡罗方法 GPP 参数估计  
**中图分类号** Q148, TP79 **文献标识码** A

陆地生态系统碳循环作为全球碳循环的重要环节, 在全球变化中有着重要的意义和作用。准确估计和预测陆地生态系统碳循环时空变化是预测气候变化的基础, 也是目前全球变化研究中最重要的前沿领域之一。近几十年来, 科学家采用清查方法、涡度相关测定技术、遥感模型、陆地生态系统过程模型及大气反演等多种手段开展陆地生态系统碳循环的定量研究。模型模拟是开展大尺度陆地生态系统碳循环研究和预测未来气候变化情况下陆地生态系统碳循环变化的重要途径。其中, 基于光能利用率原理<sup>[1]</sup>的遥感模型, 如 CASA<sup>[2]</sup>、GLO-PEM<sup>[3]</sup>、C-Fix<sup>[4]</sup>、VPM<sup>[5]</sup>、EC-LUE<sup>[6]</sup>等模型常被

用于估算陆地生态系统的植被生产力<sup>[7~9]</sup>。最大光能利用率( $\epsilon_{\max}$ )是光能利用率模型中最为关键的参数。它表征理想条件下植被对光合有效辐射的利用率, 它的取值随植被类型的不同而有所差异<sup>[10,11]</sup>, 并且受到叶片氮含量的影响<sup>[12,13]</sup>。利用全球 17 个点的植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, 简称 NPP) 观测资料, Potter 等<sup>[2]</sup>采用最小二乘法估算出 CASA 模型中  $\epsilon_{\max}$  为  $0.389 \text{ g C/MJ} \cdot \text{PAR}$ 。这一取值为全球平均值, 如采用该数值模拟区域或更小尺度的植被生产力将会产生低估<sup>[14,15]</sup>。Running 等<sup>[16]</sup>利用 Biome-BGC 模型模拟的全球植被 NPP 与植被吸收的光合有效辐射

第一作者简介: 张 强 女 27 岁 硕士研究生 自然地理学专业 E-mail: zhangqiang1228@igsnr.ac.cn  
\* 国家重点基础研究发展规划项目 (973 项目) (批准号: 2010CB833503 和 2010CB950603) 和中国科学院战略性先导科技专项项目 (批准号: XDA05050600) 共同资助  
2014-02-26 收稿, 2014-04-22 收修改稿  
通讯作者: 张 黎 陆地生态系统碳氮循环模拟及模型数据融合研究 E-mail: li.zhang@igsnr.ac.cn

(Absorbed Photosynthetic Active Radiation, 简称 APAR) 的比例, 计算出 11 类植物群系 (Biome) 的  $\varepsilon_{\max}$ , 其数值在 0.604 ~ 1.259g C/MJ·PAR 之间。Zhu 等<sup>[17]</sup> 利用中国林业部 1989~1993 年林业普查资料中 NPP 实测数据及相关文献数据, 基于 CASA 模型对  $\varepsilon_{\max}$  进行估计, 认为我国典型植被  $\varepsilon_{\max}$  在 0.389~0.985g C/MJ·PAR 之间。

近些年来, 随着涡度相关技术的发展和运用, 国内外学者利用涡度相关系统测定的净 CO<sub>2</sub> 碳交换量数据对不同生态系统  $\varepsilon_{\max}$  进行估计, 结果表明: 农田生态系统  $\varepsilon_{\max}$  在 0.65 ~ 2.00g C/MJ·PAR 之间, 小麦  $\varepsilon_{\max}$  最低 (0.85g C/MJ·PAR), 其次为大豆 (0.65~0.90g C/MJ·PAR), 水稻和玉米最高, 在 1.30~1.95g C/MJ·PAR 之间<sup>[18]</sup>; 中国北方针叶林的  $\varepsilon_{\max}$  在 0.62~0.83g C/MJ·PAR 之间, 中国北方农田的  $\varepsilon_{\max}$  为 0.76~0.92g C/MJ·PAR<sup>[19]</sup>。可以看出, 目前对植被  $\varepsilon_{\max}$  的估计还存在较大的不确定性。上述研究大多采用最小二乘法开展  $\varepsilon_{\max}$  参数估计, 只能获得  $\varepsilon_{\max}$  参数的局部最优解, 对估计结果的不确定性尚不清楚。

鉴于以上研究现状, 本文采用马尔科夫链-蒙特卡罗 (Markov Chain Monte Carlo, 简称 MCMC) 方法, 利用中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 8 个站点的涡度相关通量数据, 对 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型中关键参数—— $\varepsilon_{\max}$  进行反演, 获得  $\varepsilon_{\max}$  的后验分布概率, 进而统计其最优值及不确定性, 并讨论  $\varepsilon_{\max}$  估计的不确定性对总初级生产力 (Gross Primary Productivity, 简称 GPP) 模拟结果的影响。本研究

将有助于进一步认识中国典型陆地生态系统的  $\varepsilon_{\max}$  及其不确定性, 改善对光能利用率模型中  $\varepsilon_{\max}$  参数的设定, 为提高中国陆地生态系统碳循环的模拟精度奠定基础。

# 1 材料和方法

## 1.1 研究数据

CASA 模型的输入数据包括遥感 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 数据、气象数据 (气温、降水量和太阳辐射)、植被及土壤数据。研究时段为 2003~2008 年, 时间步长为 8 天。除 NDVI 数据外, 模型所需的气象数据、土壤类型、植被类型数据以及用于反演  $\varepsilon_{\max}$  的涡度相关通量数据均源于 ChinaFLUX 的 8 个野外观测台站, 分别是长白山温带针阔混交林 (CBS)、千烟洲亚热带常绿针叶林 (QYZ)、鼎湖山亚热带常绿针阔混交林 (DHS)、西双版纳热带常绿阔叶林 (XSBN)、内蒙温带典型草原 (NMG)、海北高寒灌丛草甸 (HB)、当雄高寒草原化草甸 (DX)、禹城暖温带农田 (YC)。站点的相关信息见表 1。

NDVI 数据源自 MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI 产品 (MOD09A1), 空间分辨率为 500m。本研究根据研究站点通量塔所在的经纬度, 提取出各通量站所在格点的 NDVI (<https://wist.echo.nasa.gov/api/>)。数据在使用前已进行大气校正、辐射校正以及几何校正等必要的处理, 以消除云、大气、太阳高度角等因素对 NDVI 数据的影响, 并采用 TIMESAT 软件进行平滑处理剔除异常值<sup>[20]</sup>。

表 1 本研究所选取站点基本信息  
Table 1 Basic information of the eight sites

| 站点名称        | 长白山 (CBS)        | 千烟洲 (QYZ)   | 鼎湖山 (DHS)   | 西双版纳 (XSBN) | 内蒙 (NMG)          | 海北灌丛 (HB)         | 当雄 (DX)       | 禹城 (YC)    |
|-------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|---------------|------------|
| 生态系统类型      | 温带针阔混交林          | 亚热带常绿针叶林    | 亚热带常绿针阔混交林  | 热带常绿阔叶林     | 温带典型草原            | 高寒灌丛草甸            | 高寒草原化草甸       | 暖温带农田      |
| 经度 (E)      | 128°05′          | 115°03′     | 112°34′     | 101°15′     | 116°40′           | 101°20′           | 91°05′        | 116°34′    |
| 纬度 (N)      | 42°24′           | 26°44′      | 23°10′      | 21°55′      | 43°33′            | 37°40′            | 30°51′        | 36°50′     |
| 海拔 (m)      | 738              | 102         | 300         | 756         | 1189              | 3327              | 4333          | 28         |
| 优势植物        | 红松、椴树、蒙古栎、水曲柳和色木 | 湿地松、杉木林、马尾松 | 锥栗、黄果厚壳桂、荷木 | 山焦、云树、染木等   | 羊草、冰草、大针茅、洽草、糙隐子草 | 金露梅、针茅、垂穗披碱草、矮嵩草等 | 小嵩草、丝颖针茅、窄叶苔草 | 冬小麦、夏玉米    |
| 年均温度 (°C)   | 3.6              | 17.9        | 20.9        | 21.8        | 0.4               | -1.7              | -10.4         | 13.1       |
| 年降水量 (mm)   | 713              | 1542        | 1956        | 1493        | 350.9             | 580               | 476.8         | 610        |
| 土壤类型 (土纲)   | 淋溶土              | 富铝土         | 富铝土         | 富铝土         | 钙层土               | 雏形土               | 雏形土           | 半水成土       |
| 用于参数反演的年份/年 | 2006, 2008       | 2004, 2005  | 2005, 2007  | 2004, 2006  | 2004, 2007        | 2005, 2008        | 2004, 2005    | 2004, 2006 |

为避免 CASA 模型的异养呼吸模块中大量参数 (如土壤有机碳分解速率、碳转移速率等) 和土壤有机碳分解的温度和湿度响应函数等对  $\varepsilon_{\max}$  反演结果产生影响, 本研究选择基于涡度相关通量数据拆分出的 GPP 数据来反演  $\varepsilon_{\max}$ 。研究时段内 8 天气象数据及 GPP 观测数据均在半小时数据基础上计算获得。对半小时数据经过质量控制后的所有缺失数据进行插补, 具体的插补方法及 GPP 估算方法详见相关文献<sup>[21]</sup>。其中, 根据不同站点的实际情况, 采用气象数据最接近多年 (2003~2008 年) 平均值的年份的 GPP 实测数据对  $\varepsilon_{\max}$  进行反演, 其余年份 GPP 实测数据则用于对模拟结果的验证。各站用于反演的年份见表 1。

## 1.2 CASA 模型

CASA 模型是由遥感数据、温度、降水、太阳辐射, 以及植被类型、土壤类型共同驱动的陆地生态系统碳循环模型<sup>[2]</sup>。它包括计算 NPP 的子模型、土壤水分子模型和土壤碳氮子模型 3 个子模型, 对于植被净初级生产力的模拟采用的是基于光能利用率原理的 NPP 模型。

NPP 是植被吸收的 APAR 和光能利用率 ( $\varepsilon$ ) 的函数。

$$NPP = APAR \times \varepsilon = PAR \times fAPAR \times \varepsilon \quad (1)$$

$fAPAR$  是指植被对光合有效辐射的吸收比例, 依据它与植被指数 SR 和 NDVI 之间的线性关系, CASA 模型中对  $fAPAR$  的计算方法如下:

$$fAPAR = \frac{fAPAR_{SR} + fAPAR_{NDVI}}{2} \quad (2)$$

$$fAPAR(x, t) = \min \left[ \frac{SR(x, t) - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}}, 0.95 \right] \quad (3)$$

$$fAPAR_{NDVI} = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times (fAPAR_{\max} - fAPAR_{\min}) + fAPAR_{\min} \quad (4)$$

在 CASA 模型中, 光能利用率 ( $\varepsilon$ ) 表示为  $\varepsilon_{\max}$  和温度胁迫系数 ( $T_{e1}$  和  $T_{e2}$ )、水分胁迫系数 ( $W_e$ ) 的函数, 计算公式如下:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \times T_{e1} \times T_{e2} \times W_e \quad (5)$$

温度胁迫系数 ( $T_{e1}$  和  $T_{e2}$ )、水分胁迫系数 ( $W_e$ ) 的表达式详见 Potter 等<sup>[2]</sup>。本研究采用的 CASA 模型程序为 2003 版, 该程序中提供的  $\varepsilon_{\max}$  的默认值为 0.43g C/MJ·PAR。参照 Zhou 等<sup>[22]</sup>, 本文

将  $\varepsilon_{\max}$  的范围设为 0~2.76g C/MJ·PAR。

基于 CASA 模型模拟的 NPP, 利用观测算子  $\phi$  计算出 GPP 的模拟值, 即  $GPP = NPP/\phi$ 。根据 Zhang 等<sup>[23]</sup>关于 NPP 与 GPP 比率的估算, 本研究将长白山温带针阔混交林和鼎湖山亚热带常绿阔混交林的  $\phi$  值设为 0.5488, 西双版纳常绿阔叶林的  $\phi$  值设为 0.4125, 千烟洲常绿针叶林的  $\phi$  值设为 0.5853; 内蒙、海北及当雄草地生态系统的  $\phi$  值设为 0.5523, 禹城农田生态系统的  $\phi$  值设为 0.5399。

## 1.3 参数优化方法

马尔科夫链-蒙特卡罗 (Markov Chain Monte Carlo, 简称 MCMC) 方法<sup>[24]</sup>是以贝叶斯定理为基础, 假定未知参数是符合某种先验分布概率的随机变量, 利用参数的先验知识与观测信息得到参数的后验分布, 并根据后验分布来推测未知参数, 如公式 (6)。

$$\rho(p|Z) = \frac{\rho(Z|p)\rho(p)}{\rho(Z)} \quad (6)$$

公式 (6) 中,  $\rho(p)$  和  $\rho(p|Z)$  分别表示参数的先验和后验概率密度分布,  $\rho(Z)$  为实测值的概率,  $\rho(Z|p)$  为实测值在先验参数值下的条件概率密度, 又称为参数  $p$  的似然函数。假设随机误差服从零均值的正态分布, 即可将似然函数表示为:

$$\rho(Z|p) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-(x_i - u_i)^2 / 2\sigma_i^2} \quad (7)$$

公式 (7) 中,  $x_i$  和  $u_i$  分别为 GPP 的实测值和模拟值,  $\sigma_i$  为 GPP 实测数据的标准差, 假设不同时刻 GPP 实测数据的标准差相同<sup>[25]</sup>。

本文采用被广泛使用的 Metropolis-Hastings 法 (简称 M-H 法) 进行 MCMC 模拟。参照 Xu 等<sup>[26]</sup>, 本研究先假定参数后验分布为均匀分布, 利用 M-H 法预先模拟 20000 次, 根据被接受的样本计算参数的协方差  $\text{cov}(p)$ , 再假定参数后验分布为正态分布, 进行 MCMC 模拟, 采样次数为 20000 次, 详细步骤参见张黎论文<sup>[27]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 $\varepsilon_{\max}$ 反演结果

图 1 为利用 MCMC 方法估计的  $\varepsilon_{\max}$  后验频率分布图。可以看出, 8 个生态系统的  $\varepsilon_{\max}$  后验分布均近似于正态分布, 表明  $\varepsilon_{\max}$  能被 GPP 实测值较好的

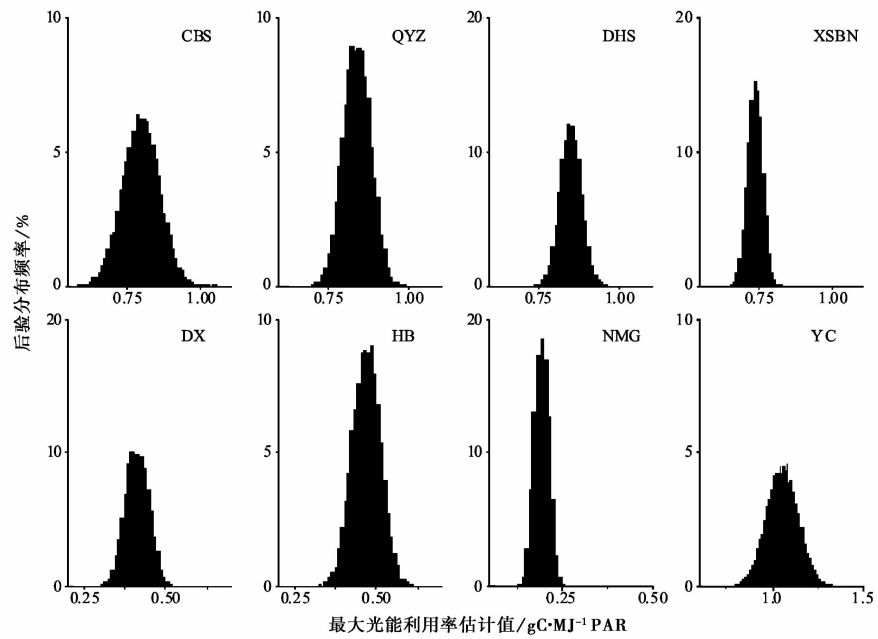


图 1 CASA 模型  $\epsilon_{\max}$  利用率的后验分布频率

Fig. 1 Posterior distribution of  $\epsilon_{\max}$  in the CASA model

约束。进一步统计出  $\epsilon_{\max}$  的后验平均值、标准差以及 90% 置信区间(表 2), 并将  $\epsilon_{\max}$  后验估计平均值作为最优值。内蒙草地生态系统  $\epsilon_{\max}$  最低, 为 0.199 g C/MJ·PAR, 明显低于 CASA 模型中  $\epsilon_{\max}$  默认值; 4 个森林生态系统  $\epsilon_{\max}$  在 0.737 ~ 0.850 g C/MJ·PAR 之间, 均高于模型中  $\epsilon_{\max}$  默认值。当雄高寒草原草甸及海北高寒灌丛草甸的  $\epsilon_{\max}$  与 CASA 模型默认值接近, 分别为 0.413 g C/MJ·PAR 和 0.469 g C/MJ·PAR。禹城农田生态系统  $\epsilon_{\max}$  值为 1.056 g C/MJ·PAR, 为 CASA 模型默认值的 2.46 倍。8 个生态系统的  $\epsilon_{\max}$  后验估计标准差在 0.026 ~ 0.090 g C/MJ·PAR 之间。 $\epsilon_{\max}$  估计值高的生态系统, 其后验估计的不确定性也大。

表 2 ChinaFLUX 的 8 站点最大光能利用率 ( $\epsilon_{\max}$ ) 的优化结果 (g C/MJ·PAR)

Table 2 Simulation of the maximum light use efficiency ( $\epsilon_{\max}$ ) for the eight sites of ChinaFLUX (g C/MJ·PAR)

| 站点代码 | 站点名称 | 基于 MCMC 的后验估计结果 |       |                |
|------|------|-----------------|-------|----------------|
|      |      | 平均值             | 标准差   | 90% 置信区间       |
| CBS  | 长白山  | 0.796           | 0.062 | [0.694, 0.898] |
| QYZ  | 千烟洲  | 0.841           | 0.049 | [0.772, 0.909] |
| DHS  | 鼎湖山  | 0.850           | 0.035 | [0.798, 0.904] |
| XSBN | 西双版纳 | 0.737           | 0.026 | [0.695, 0.778] |
| NMG  | 内蒙   | 0.199           | 0.068 | [0.162, 0.227] |
| HB   | 海北灌丛 | 0.469           | 0.043 | [0.398, 0.539] |
| DX   | 当雄   | 0.413           | 0.059 | [0.351, 0.472] |
| YC   | 禹城   | 1.056           | 0.090 | [0.912, 1.201] |

2.2  $\epsilon_{\max}$  估计的不确定性对 GPP 模拟结果的影响

利用统计出的  $\epsilon_{\max}$  后验估计结果的不确定性, 进一步估算  $\epsilon_{\max}$  的不确定性对 CASA 模型 GPP 年总量多年平均值模拟结果的影响。内蒙和当雄 2 个草地生态系统 GPP 模拟值最低, 分别为 183±30 和 215±33 g C/m²/a; 长白山、鼎湖山、千烟洲和西双版纳 4 个森林生态系统 GPP 模拟值分别为 1236±96 g C/m²/a, 978±39 g C/m²/a, 1269±74 g C/m²/a 和 2678±96 g C/m²/a; 禹城农田生态系统 GPP 模拟结果年总量模拟结果为 1508±134 g C/m²/a。与各生态系统 GPP 年总量模拟结果平均值相比, 由于  $\epsilon_{\max}$  估计的不确定性, 将导致内蒙、当雄和海北草地生态系统 GPP 年总量的模拟值产生 9.17% ~ 14.20% 的误差, 长白山、鼎湖山、千烟洲和西双版纳 4 个森林生态系统 GPP 年总量的误差为 3.52% ~ 7.79%, 禹城农田生态系统 GPP 年总量的误差为 8.52%。

2.3 GPP 模拟结果与实测值比较

分别采用  $\epsilon_{\max}$  默认值和反演得到的  $\epsilon_{\max}$  最优值对 8 个生态系统 2003 ~ 2008 年每 8 天的 GPP 进行模拟, 并利用 GPP 观测数据对模拟结果进行验证。与基于  $\epsilon_{\max}$  默认值的模拟结果相比, 参数优化后 GPP 模拟值与实测值的相关系数 ( $R$ ) 未发生变化, 除西双版纳常绿阔叶林 ( $R = 0.30$ ) 和禹城农田生态

系统 ( $R = 0.68$ ) 外, 其他 6 个生态系统的  $R$  值在 0.83~0.90 之间。参数优化前后, 除海北高寒灌丛草甸生态系统和当雄高寒草地生态系统 GPP 模拟值的均方根误差 (RMSE) 的变化仅在 1.0% 以内, 其他 6 个生态系统的均方根误差表现出显著降低。其中, 内蒙草地生态系统的 RMSE 降低了 67.0%, 长白山温带针阔混交林和禹城农田生态系统的 RMSE 分别下降了 40.7% 和 42.9%, 千烟洲针叶林、鼎湖山针阔混交林和西双版纳常绿阔叶林的 RMSE 的下降幅度在 27.7%~30.3% 之间。基于  $\varepsilon_{\max}$  默认值及最优值的 GPP 模拟结果及实测值的对

比如图 2 所示。可以看出,  $\varepsilon_{\max}$  优化后的 CASA 模型能够较好地模拟出除西双版纳常绿阔叶林之外其他 7 个生态系统 GPP 的季节动态, 但对峰值的模拟还存在一定的偏差, 高估了千烟洲常绿针叶林和鼎湖山常绿针阔混交林 2003~2005 年夏季 GPP, 低估了当雄和海北高寒草地以及禹城农田 2007~2008 年生长旺季期间的 GPP, 并且对千烟洲和鼎湖山常绿林冬季 GPP 的模拟存在低估。

参数优化前后 GPP 年总量模拟值与实测值对比如图 3 所示。其中, 图 3a 为参与  $\varepsilon_{\max}$  反演的 GPP 数据的回代检验, 图 3b 为未参与  $\varepsilon_{\max}$  反演的其他年

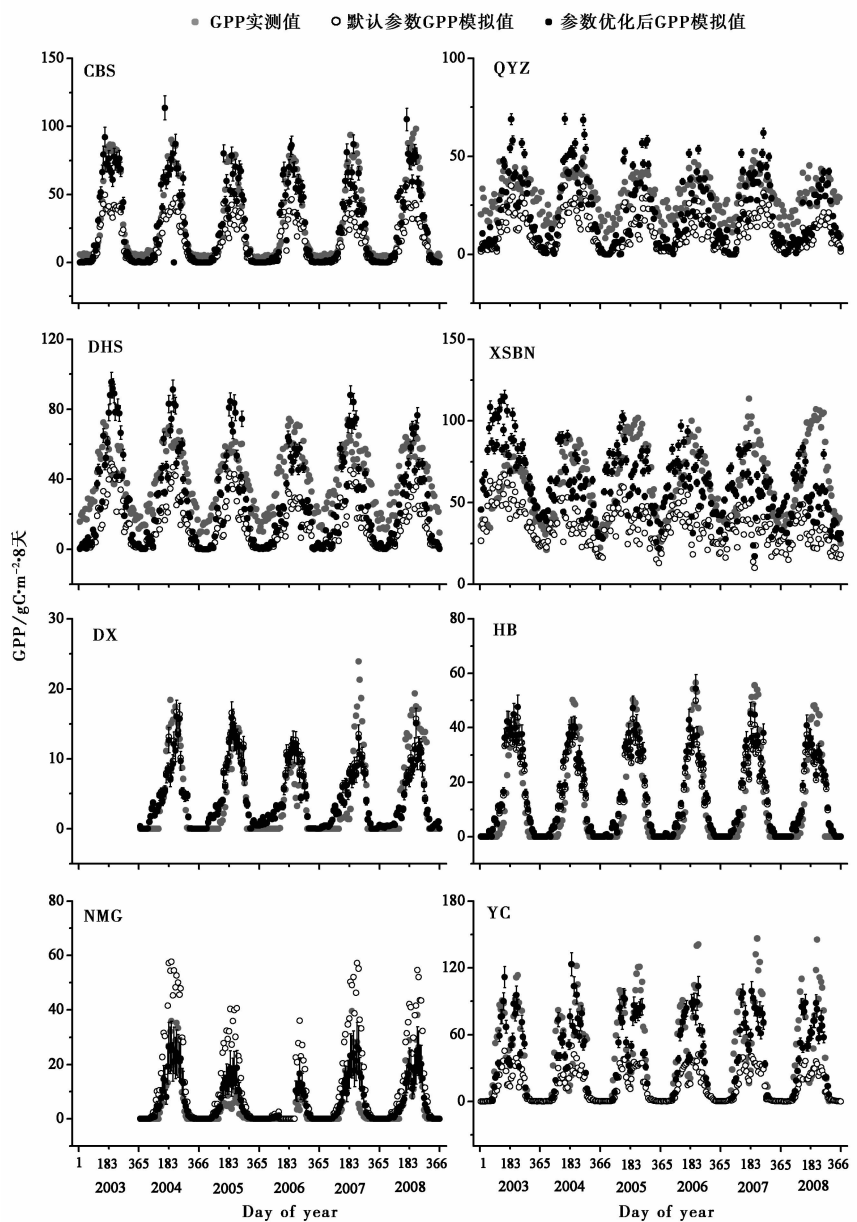


图 2 参数优化前后 GPP 模拟结果与实测值的比较 (2003~2008 年 8 天尺度 GPP)

横坐标的数字为时间序列, 表示一年中的每一天

Fig. 2 Comparison of modeled GPP with default and optimized  $\varepsilon_{\max}$  and observed GPP (8-day GPP in 2003~2008)

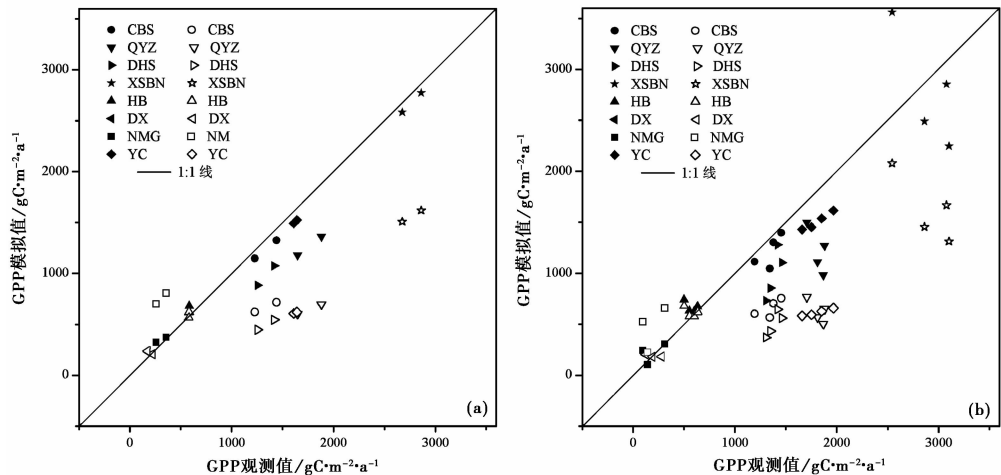


图3 各站点 GPP 实测值与模拟值比较

(a) 反演年份 GPP 模拟结果; (b) 非反演年份 GPP 模拟结果。图中空心图例代表采用默认参数 GPP 模拟值, 实心图例代表采用反演后的参数模拟 GPP 值

Fig. 3 Observed vs. modeled gross primary productivity (GPP) using optimized parameters for each site. (a) Modeled GPP with inversion years; (b) Modeled GPP with non-inversion years. The hollow points are modeled GPP using default parameter while the solid ones are modeled GPP using inversed parameters

份 GPP 数据的独立检验。回代检验结果表明,  $\varepsilon_{\max}$  优化后 GPP 年总量的相对误差为 3%~28%, 比基于  $\varepsilon_{\max}$  默认值的结果有不同程度的降低, 当雄高寒草地生态系统和海北高寒灌丛草甸生态系统相对误差分别降低 1% 和 7%, 4 个森林生态系统及禹城农田生态系统相对误差降低 35%~55%, 内蒙草地生态系统相对误差降低 134%。独立检验结果表明,  $\varepsilon_{\max}$  优化后 GPP 年总量的相对误差为 9%~63%, 当雄高寒草地生态系统和海北高寒灌丛草甸生态系统相对误差降低 1% 和 7%, 4 个森林生态系统及禹城农田生态系统则降低 21%~50%, 内蒙草地生态系统相对误差降低 149%。总体来看, 优化  $\varepsilon_{\max}$  后有效改善了原模型对内蒙草地生态系统 GPP 年总量的高估和除当雄草地生态系统外其他 6 个生态系统 GPP 年总量的低估。

优化  $\varepsilon_{\max}$  后对西双版纳常绿阔叶林 GPP 的模拟效果仍较差, 特别是明显高估了 2003 年该生态系统的 GPP。该年西双版纳常绿阔叶林光合有效辐射平均值比多年平均偏高 28%, 降水量较常年偏低 30%, 导致该年实际 GPP 较多年平均偏高 10%, 而 GPP 模拟值却比多年平均偏高 29%。此外, CASA 模型也高估了干旱年份内蒙草地生态系统的 GPP。内蒙草地生态系统 2005~2006 年为干旱年, 这两年的降水量比平年 (2004 年) 分别低 70% 和 45%<sup>[28]</sup>, 实际 GPP 年总量分别比多年平均值低 60% 和 39%, 而 GPP 模拟值仅低于平均值 10% 和

3%。这说明 CASA 模型中对植物光合作用和植物生长对水分胁迫响应的模拟还存在不足。

### 3 讨论

#### 3.1 $\varepsilon_{\max}$ 反演结果与其他研究的比较

表 3 汇集了本研究与其他研究对植被最大光能利用率的估计结果, 包括计算 GPP 的最大光能利用率 ( $\varepsilon_{\max, g}$ ) 和计算 NPP 的最大光能利用率 ( $\varepsilon_{\max, n}$ )。由于不同研究所研究的对象、采用的模型, 以及用于优化  $\varepsilon_{\max}$  的数据各不相同, 导致不同研究对各类植被  $\varepsilon_{\max}$  的估计结果有很大差异。计算 GPP 的  $\varepsilon_{\max, g}$  在 0.604~3.266 g C/MJ·PAR 之间, 计算 NPP 的  $\varepsilon_{\max, n}$  在 0.203~1.66 g C/MJ·PAR 之间, 前者近似为后者的 2 倍。Dorman 和 Sellers<sup>[29]</sup> 的研究中,  $\varepsilon_{\max}$  估计值普遍低于其他学者及本研究的结果。与 Zhu 等<sup>[17]</sup> 研究结果相比, 常绿阔叶林和混交林  $\varepsilon_{\max}$  略低; 常绿针叶林  $\varepsilon_{\max}$  (0.699 g C/MJ·PAR) 高于其结果 (0.389 g C/MJ·PAR), 可能是由于本研究所选的常绿针叶林为林龄在 20 年左右的人工针叶林, 其光合能力较高所致。此外, 灌丛  $\varepsilon_{\max}$  较 Zhu 等<sup>[17]</sup> 的结果略高。农田生态系统  $\varepsilon_{\max}$  明显高于 Zhu 等<sup>[17]</sup> 的结果, 但与 Chen 等<sup>[18]</sup> 对北美和欧洲 12 个农田生态系统  $\varepsilon_{\max}$  的研究与 Lobell 等<sup>[30]</sup> 对美国农作物  $\varepsilon_{\max}$  研究结果十分接近。

表 3 本研究估计的最大光能利用率与其他研究结果的对比\* (g C/MJ·PAR)  
Table 3 Comparison of  $\varepsilon_{\max}$  in this research and others(g C/MJ·PAR)

| $\varepsilon_{\max}$    | DNF   | ENF              | DBF   | EBF              | MF                           | SB               | GL                           | CL                                                                                | 文献                |
|-------------------------|-------|------------------|-------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| $\varepsilon_{\max, g}$ | —     | 0.856            | 1.242 | 0.795            | 1.032                        | —                | 1.490(C3)<br>1.352(C4)       | 1.490(C3)<br>1.352(C4)                                                            | [12] <sup>a</sup> |
| $\varepsilon_{\max, g}$ | —     | 2.438            | 2.576 | —                | 3.036                        | —                | —                            | —                                                                                 | [13] <sup>b</sup> |
| $\varepsilon_{\max, g}$ | 1.103 | 1.008            | 1.044 | 1.259            | 1.116                        | 0.768            | 0.604                        | 0.604                                                                             | [16]              |
| $\varepsilon_{\max, g}$ | 2.668 | 1.932            | 3.266 | —                | 2.944                        | 1.242            | 1.518                        | 2.76                                                                              | [19] <sup>a</sup> |
| $\varepsilon_{\max, g}$ | 1.086 | 0.962            | 1.165 | 1.268            | 1.051                        | 1.061            | 0.860                        | 1.044                                                                             | [31] <sup>c</sup> |
| $\varepsilon_{\max, n}$ | 0.485 | 0.389            | 0.692 | 0.985            | 0.768                        | 0.429            | 0.542                        | 0.542                                                                             | [17]              |
| $\varepsilon_{\max, n}$ | —     | —                | —     | —                | —                            | —                | —                            | 0.85 <sup>d</sup><br>1.66 <sup>e</sup><br>0.775 <sup>f</sup><br>1.15 <sup>g</sup> | [18]              |
| $\varepsilon_{\max, n}$ | 0.28  | 0.284            | 0.255 | 0.354            | 0.283                        | —                | —                            | 0.242                                                                             | [29]              |
| $\varepsilon_{\max, n}$ |       |                  |       |                  |                              |                  |                              | 0.87~1.91 <sup>d</sup><br>0.54~1.50 <sup>d</sup>                                  | [30]              |
| $\varepsilon_{\max, n}$ | —     | 0.841<br>(0.049) | —     | 0.737<br>(0.026) | 0.796~0.850<br>(0.035~0.062) | 0.469<br>(0.043) | 0.199~0.413<br>(0.059~0.068) | 1.056<br>(0.090)                                                                  | 本研究 <sup>h</sup>  |

\* DNF——落叶针叶林, ENF——常绿针叶林, DBF——落叶阔叶林, EBF——常绿阔叶林, MF——混交林, SB——灌丛, GL——草地, CL——耕作植被; a: 对文献中研究结果进行了单位转换, 1 MJ PAR=4.6mol PAR; b: 对文献中研究结果进行了单位转换, 1mol CO<sub>2</sub>/mol·PAR=55.2g C/MJ·PAR; c: 对文献中研究结果进行了单位转换, 1kg C/MJ·PAR=1000g C/MJ·PAR; d: 冬小麦; e: 玉米; f: 大豆; g: 水稻; h: 本研究  $\varepsilon_{\max}$  反演结果及其标准差

3.2  $\varepsilon_{\max}$  反演结果的不确定性

本研究基于贝叶斯理论和 MCMC 方法分析了  $\varepsilon_{\max}$  参数后验估计结果的不确定性, 为量化由于参数不确定性引起的模拟结果不确定性大小提供了依据, 但该方法也具有一定的局限性。CASA 模型结果本身的误差不可避免地会影响  $\varepsilon_{\max}$  的反演结果。尽管  $\varepsilon_{\max}$  是 CASA 模型为代表的光能利用率遥感模型的关键参数, 但只优化  $\varepsilon_{\max}$  这一个参数仍不能准确模拟生态系统的NPP/GPP, 还需保证计算  $fAPAR$  过程中其他参数的设定值合理或最优。

遥感 NDVI 数据的不准确也会导致  $\varepsilon_{\max}$  估计值产生偏差。本研究在使用 NDVI 数据时已对数据进行过平滑处理, 剔除异常值。其中, 千烟洲站剔除数据最多, 被剔除的数据多集中在春夏季; 其余 7 站 NDVI 异常值则多出现在夏季。NDVI 出现异常的可能原因是所选站点夏季多雨或雾日较多, 导致遥感获取的信息不能真实反映该地植被生长情况<sup>[32,33]</sup>。此外, 遥感 NDVI 数据与基于涡度相关系统估算的 GPP 数据在空间尺度上也存在一定差异, 影响  $\varepsilon_{\max}$  估计结果的空间代表性。

基于涡度相关技术估算的 GPP 数据误差也是  $\varepsilon_{\max}$  估计误差的来源之一, 包括涡度相关测定系统的观测误差、GPP 推算过程中的误差以及缺失数据插补过程中的误差。

4 结论

本研究采用马尔科夫链蒙特卡罗方法, 利用 ChinaFLUX8 站点 GPP 实测值对 CASA 模型中的关键参数—— $\varepsilon_{\max}$  进行反演, 定量评估了  $\varepsilon_{\max}$  估计结果的不确定性及其对 GPP 模拟结果的影响, 旨在获取适合于我国不同植被类型  $\varepsilon_{\max}$  参数估计值, 使 GPP 模拟结果更加准确。通过研究得出以下结论:

(1) 利用 MCMC 方法,  $\varepsilon_{\max}$  在 ChinaFLUX 的 8 站点均可被 GPP 实测数据较好的约束, 各生态系统  $\varepsilon_{\max}$  后验估计均呈近似正态分布, 森林、农田、草地生态系统  $\varepsilon_{\max}$  分别为 0.737±0.026~0.850±0.035g C/MJ·PAR, 1.056±0.090g C/MJ·PAR 及 0.199±0.068~0.469±0.043g C/MJ·PAR。

(2) 利用优化后  $\varepsilon_{\max}$  模拟 2003~2008 年各生态系统 GPP, 除当雄草地生态系统 GPP 年总量没有明显变化外, 其余 7 个生态系统模拟结果与基于 CASA 模型默认值的结果相比更接近实测值, 有效改善了原模型对内蒙草地生态系统 GPP 年总量的高估和对其他 6 个生态系统 GPP 年总量的低估。优化  $\varepsilon_{\max}$  后, CASA 模型对于旱年份西双版纳常绿阔叶林和内蒙草地生态系统 GPP 的模拟仍存在系统性高估。

(3) 由于  $\varepsilon_{\max}$  估计的不确定性将导致内蒙、当雄和海北草地生态系统 GPP 年总量的模拟值产生

9. 17%~14. 20% 的误差, 长白山、鼎湖山、千烟洲和西双版纳 4 个森林生态系统 GPP 年总量的误差为 3. 52%~7. 79%, 禹城农田生态系统 GPP 年总量的误差为 8. 52%。该结果受到光能利用率模型中其他参数、遥感 NDVI 数据, 以及用于反演  $\varepsilon_{\max}$  的涡度相关通量数据误差的影响, 这些误差的量级及贡献大小是今后研究中需要进一步探讨的问题。

**致谢** 感谢中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 长白山、千烟洲、鼎湖山、西双版纳、禹城、内蒙、海北、当雄及中国生态系统研究网络 (CERN) 综合研究中心为本研究提供涡度相关通量数据及气象数据。感谢骆亦其教授和周旭辉教授为本研究提供参数优化算法的相关程序。感谢 George Merchant 博士提供 CASA 模型 (2003 年 4 月版) 程序及说明。

参考文献 (References)

1 Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystem. *Journal of Application Ecology*, 1972, **9**(3): 747~766

2 Potter C S, Randerson J T, Field Christopher B *et al.* Terrestrial ecosystem production——A process model-based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(4): 811~841

3 Prince S D, Goward S N. Global primary production: A remote sensing approach. *Biogeography*, 1995, **22**(4~5): 815~835

4 Veroustraete F, Sabbe H, Eerens H. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and EuroFlux data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**(3): 376~399

5 Xiao X M, Zhang Q Y, Braswell B *et al.* Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **91**(2): 256~270

6 Yuan W P, Liu S G, Zhou G S *et al.* Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, **143**(3~4): 189~207

7 Field C B, Randeison J T, Malmstrom C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **51**(1): 74~88

8 He H L, Liu M, Xiao X M *et al.* Large-scale estimation and uncertainty analysis of gross primary production in Tibetan alpine grasslands. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, **119**(3): 466~486

9 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. *植物生态学报*, 2001, **25**(5): 603~608

Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua, Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, **25**(5): 603~608

10 Gower S T, Kucharik C J, Norman J M. Direct and indirect estimation of leaf area index, *fAPAR*, and net primary production of

terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **70**(1): 29~51

11 Ruimy A, Kergoat L, Bondeau A *et al.* Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. *Global Change Biology*, 1999, **5**(S1): 56~64

12 Kergoat Laurent, Lafont Sebastien, Arneth Almut *et al.* Nitrogen controls plant canopy light-use efficiency in temperate and boreal ecosystems. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(G4): doi: 10.1029/2007JG000676

13 Peltoniemi M, Pulkkinen M, Kolari P *et al.* Does canopy mean nitrogen concentration explain variation in canopy light use efficiency across 14 contrasting forest sites? *Tree Physiology*, 2012, **32**(2): 200~218

14 彭志麟, 郭志华, 王伯荪. 利用 GIS 和 RS 估算广东植被光利用率. *生态学报*, 2000, **20**(6): 903~909

Peng Shaolin, Guo Zhihua, Wang Bosun. Use of GIS and RS to estimate the light utilization efficiency of the vegetation in Guangdong, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(6): 903~909

15 Ichii K, Suzuki T, Kato T *et al.* Multi-model analysis of terrestrial carbon cycles in Japan: Limitations and implications of model calibration using eddy flux observations. *Biogeosciences*, 2010, **7**(7): 2061~2080

16 Running S W, Thornton P E, Nemani R *et al.* Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. In: Sala O E, Jackson R B, Mooney H A *et al.* eds. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer-Verlag, 2000. 44~57

17 Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, He Hao *et al.* Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(4): 457~463

18 Chen T X, van der Werf G R, Dolman A J *et al.* Evaluation of cropland maximum light use efficiency using eddy flux measurements in North America and Europe. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(14): doi: 10.1029/2011GL047533

19 Wang H S, Jia G S, Fu C B *et al.* Deriving maximal light use efficiency from coordinated flux measurements and satellite data for regional gross primary production modeling. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(10): 2248~2258

20 Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(8): 1824~1832

21 Zhang L M, Yu G R, Sun X M *et al.* Seasonal variations of ecosystem apparent quantum yield and maximum photosynthesis rate of different forest ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **137**(3~4): 176~187

22 Zhou T, Luo Y Q. Spatial patterns of ecosystem carbon residence time and NPP-driven carbon uptake in the conterminous United States. *Global Biogeochemical Cycle*, 2008, **22**(3): doi: 10.1029/2007GB002939

23 Zhang Y J, Yu G R, Yang J *et al.* Climate-driven global changes in carbon use efficiency. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, **23**(2): 144~155

24 Hastings W K. Monte Carlo sampling methods using Markov Chain and their applications. *Biometrika*, 1970, **57**(1): 97~109

25 Zhang L, Yu G R, Luo Y Q *et al.* Influences of error distributions of



net ecosystem exchange on parameter estimation of a process-based terrestrial model: A case of broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbaishan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (7): 3017~3026

26 Xu T, White L, Hui D *et al.* Probabilistic inversion of a terrestrial ecosystem model: Analysis of uncertainty in parameter estimation and model prediction. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(2): doi: 10.1029/2005GB002468

27 张 黎. 陆地生态系统碳循环的模型数据融合研究. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2008. 31~32  
Zhang Li. Model Data Fusion for Terrestrial Ecosystem Carbon Cycle Modelling. Beijing: The Ph.D Thesis of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. 31~32

28 郝彦宾, 王艳芬, 崔骁勇. 干旱胁迫降低了内蒙古羊草草原的碳累积. 植物生态学报, 2010, 34(8): 898~906  
Hao Yanbin, Wang Yanfen, Cui Xiaoyong. Drought stress reduces the carbon accumulation of the *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 898~906

29 Dorman J L, Sellers P J. A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the Simple Biosphere Model (SiB). *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28(9): 833~855

30 Lobell D B, Hicke J A, Asner G P *et al.* Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982~1998. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 722~735

31 Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2009, 329(5994): 940~943

32 孙进瑜, 彭书时, 王旭辉等. 1982~2006 年全球植被生长时空变化. 第四纪研究, 2010, 30(3): 522~530  
Sun Jinyu, Peng Shushi, Wang Xuhui *et al.* NDVI based spatio-temporal change in global vegetation growth from 1982 to 2006. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 522~530

33 曹云锋, 王正兴, 柯灵红等. 2000~2008 年中国东北样带植被变化. 第四纪研究, 2010, 30(3): 530~539  
Cao Yunfeng, Wang Zhengxing, Ke Linghong *et al.* Vegetation dynamics in Northeast China transect during 2000 ~ 2008 using MODIS-NDVI. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 530~539

INVERSION OF THE MAXIMUM LIGHT USE EFFICIENCY USING  
EDDY COVARIANCE FLUX OBSERVATIONS

Zhang Qiang<sup>①</sup> Zhang Li<sup>①</sup> He Honglin<sup>①</sup> Han Shijie<sup>②</sup> Li Yingnian<sup>③</sup>  
Ouyang Zhu<sup>①</sup> Shi Peili<sup>①</sup> Wang Huimin<sup>①</sup> Hao Yanbin<sup>④</sup> Zhang Yiping<sup>⑤</sup> Yan Junhua<sup>⑥</sup>  
(<sup>①</sup>Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; <sup>②</sup>Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; <sup>③</sup>Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008; <sup>④</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; <sup>⑤</sup>Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223; <sup>⑥</sup>South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650)

Abstract

Accurate estimation and forecasting of terrestrial ecosystem dynamic carbon cycles and its spatial-temporal pattern are crucial for climate prediction in the context of global change. The maximum light use efficiency ( $\varepsilon_{\max}$ ) is one of key parameters of remote sensing models to estimate primary production in terrestrial ecosystems.

Based on the CASA model and eddy covariance flux observations at 8 ChinaFLUX sites (Changbaishan temperate mixed forest, Qianyanzhou subtropics evergreen needle leaf forest, Dinghushan subtropics evergreen broadleaf and needle leaf mixed forest, Xishuangbanna tropical evergreen broadleaf forest, Inner Mongolia typical temperate grassland, Haibei alpine meadow, Dangxiong alpine steppe-meadow and Yucheng warmer temperate dry farming cropland), we used the Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method to inverse  $\varepsilon_{\max}$  and calculated the optimum values and uncertainties from the posterior probability distributions. Using optimized values of  $\varepsilon_{\max}$ , we modeled the gross primary production (GPP) and uncertainties for each ecosystem in 2003~2008.

The results show that estimated posterior probability distributions of  $\varepsilon_{\max}$  at eight sites followed approximately normal distributions. Estimated values of  $\varepsilon_{\max}$  were  $0.737\pm0.026\sim0.850\pm0.035\text{g C/MJ PAR}$  at forest sites,  $1.056\pm0.090\text{g C/MJ PAR}$  at cropland site, and  $0.199\pm0.068\sim0.469\pm0.043\text{g C/MJ PAR}$  at grassland sites. The uncertainties of modeled annual GPP caused by the error of estimating  $\varepsilon_{\max}$  ranged from 9.17% to 14.20% at three grassland sites, 3.52% to 7.79% at four forest sites, and 8.52% at cropland site.

The relative error of annual GPP was reduced after using optimized  $\varepsilon_{\max}$  values. The optimization of  $\varepsilon_{\max}$  improved the original model that overestimated annual GPP in Inner Mongolia grassland ecosystem and underestimated in the other six ecosystems except Dangxiong grassland ecosystem.

**Key words** CASA model, Markov Chain Monte Carlo method, GPP, parameter estimation