

文章编号: 1674-7054(2021)03-0279-10



基于过程模型的泰国热带森林碳通量动态模拟解析

廖立国, 谭正洪, 蒋龙, 符妙, 金艳, 刘应帅, 章杰

(海南大学生态与环境学院, 海口 570228)

摘要: 本研究收集整理泰国 SKR 站 2001—2003 年热带季节性常绿林 CO₂ 垂直梯度浓度和气温、降水等气象数据集, 耦合并改进 NCEAS 模型, 在月尺度上模拟季节气候变率下热带森林碳源-汇的收支过程。结果表明: (1) 泰国 SKR 监测站热带森林表现为较明显的雨热同期现象, 雨季(4—10 月)降水量占全年的 90% 以上, 温度在 4—5 月达到峰值。干季与雨季的 CO₂ 浓度存在明显的差异, 呈现雨季低、干季高; 垂直方向上, CO₂ 浓度随高度的增加而降低。(2) 降水量影响是 SKR 监测站热带森林的生产力变化的主要因素, 改进后的 NCEAS 模型能够较准确地模拟月尺度森林的 NPP; 6—7 月是改进后的 NCEAS 模型模拟热带森林的月 NPP 的最佳时间尺度。(3) 构建的模型具有较高的拟合精度: $r=0.69$, $RMSE=14.93 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}$ 。似然函数值 $RMSE$ 对活化能 E_a 及凋落物质量 M_0 不敏感, 在参数分布区间内都有低似然值取值; 扩散系数 k 敏感, 在参数取值 0.4 时存在极值, 表示 k 是影响热带森林 CO₂ 通量变化的主要影响因子。综上所述, 在基于生态系统过程的碳通量模拟研究中, 森林内部向大气边界层的 CO₂ 扩散过程是森林生态系统碳通量变化的主要影响因子。

关键词: NCEAS 模型; Fick 第一定律; CO₂ 通量; 热带森林

中图分类号: S 718.5 **文献标志码:** A

引用格式: 廖立国, 谭正洪, 蒋龙, 等. 基于过程模型的泰国热带森林碳通量动态模拟解析 [J]. 热带生物学报, 2021, 12(3): 279—288. DOI: [10.15886/j.cnki.rds wxb.2021.03.002](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rds wxb.2021.03.002)

森林生态系统作为陆地生态系统主体, 在维持全球碳平衡、对抗气候突变等方面发挥着重要作用^[1]。森林的生物量占陆地生态系统的 80%, 其碳储量约占全球陆地碳储量的一半, 是大气碳储量的 3 倍^[2-4], 在调节大气 CO₂ 浓度方面起到了重要的碳汇作用^[5]。森林生态系统碳循环、碳固持、碳交换等研究已成为生态学研究热点问题, 因此, 对森林生态系统进行的碳通量动态研究具有十分重要的科学意义。

大气 CO₂ 浓度的变化是导致全球变暖的重要因子, 对大气 CO₂ 浓度长期监测可为人类制定碳排放及碳贸易政策提供理论基础^[6]; 通过大气 CO₂ 浓度的监测数据反演区域及全球的碳源-汇分布^[7-8]; 利用自由大气增浓实验(FACE)研究生态系统对 CO₂ 施肥效应的响应机制^[9]。森林的生长代谢与大气 CO₂ 浓度变化密切相关。森林植被的光合作用与呼吸作用会影响 CO₂ 浓度^[10], 而林冠层的 CO₂ 浓度的时空变化又对森林生态系统的生产力产生重要影响^[11]。目前, 与森林内部碳循环过程密切相关且作为碳通量观测重要补充的森林生态系统 CO₂ 浓度的研究尚不多见^[12]。陈步峰等^[13]在海南尖峰岭热带雨林观测到林内 CO₂ 浓度最高, 谭正洪等^[12]得到近地层 CO₂ 浓度日尺度变化曲线为“双峰”的观测结果; 焦振等^[14]在帽儿山温带阔叶林观测到 CO₂ 浓度在日尺度上呈现“单峰”, 且垂直方向上 CO₂ 浓度随高度增加而降低; 陈晓峰等^[15]利用 CO₂ 廓线系统在安吉毛竹林生长季的监测结果显示, CO₂ 浓度在 7 月达到最低值, 林冠层与林冠上层垂直梯度变化趋势相似。NPP 模型对生态系统净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)模拟可以反应生产力的变化趋势。GROSSO 等^[16]利用超过 5 600 个站点的全球生态观测网数据集

收稿日期: 2021-01-16

修回日期: 2021-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771099, 41861023, 41901043); 海南大学科研启动项目(kyqd1626)

第一作者: 廖立国(1996-), 男, 海南大学生态与环境学院 2018 级硕士研究生. E-mail: 18071300210006@hainanu.edu.cn

通信作者: 章杰(1986-), 男, 副教授. 研究方向: 气候变化对植被影响研究. E-mail: zhangjie@igs nrr.ac.cn

合(包括年均 NPP、土地覆盖等级、降水和温度等),部分修正了 Miami 模型湿润区 NPP 高估的问题,提出了 NCEAS(National Center for Ecological Analysis and Synthesis)模型。近年来,NCEAS 模型已在全球/区域生态定量评估中验证了该模型的可靠性和准确性^[17-18]。董丹等^[19]利用改进 CASA 模型估算中国西南喀斯特地区 1999—2003 年的 NPP 总体呈现增长的趋势。李传华等^[20]基于 Biome-BGC 模型,利用参数本地化对五道梁地区草地生态系统 1961—2015 年净初级生产力的情景模拟表明研究区的 NPP 呈显著上升的趋势。年尺度上的 NPP 模拟研究已取得较明确的结果,但由于植物生长对降水存在的滞后效应^[21-22]使得模型对月尺度上的净初级生产力模拟具有不确定性,模拟结果与当月的降水及温度相关性低^[23]。

基于生态系统过程模型的模拟研究已成为描述森林生态系统碳动态的重要研究手段。王媛等^[24]基于 EPPML 模型千烟洲马尾松人工林的碳循环过程进行的模拟分析得到的结果与实测值十分吻合;韩其飞等^[25]基于 Biome-BGC 模型对天山北坡的针叶林长达 50 年的模拟结果显示气温的升高促进了生态系统的 NPP; PAULICK 等^[26]利用 FORMIND 模型模拟了两种地形不同的热带森林净生态系统交换量(Net Ecosystem Exchange, NEE),发现在演替早期的 NEE 最大,在演替后期的 NEE 接近零。然而对于可以深入了解森林碳循环过程的 CO₂ 通量动态模拟研究目前鲜有报道。热带森林通常指的是南北纬回归线之间具有典型天然热带植被的森林^[27],作为地球系统碳循环的组成部分,在缓解全球气候变化中扮演着重要角色,近年来,众多专家学者从热带森林土壤呼吸、天然林再生过程中的碳积累速率、森林恢复对地面碳密度复原等方面开展了研究^[28-30],但对于热带森林的 CO₂ 通量在森林碳循环过程的动态变化关注较少。鉴于此,笔者基于泰国 SKR 环境研究中心站点 2001—2003 年热带森林数据集,结合以往的研究结果^[16-18],选择 NCEAS 模型进行改进,对月尺度 NPP 进行预测,耦合 Fick 第一定律表征森林的 CO₂ 扩散过程,同时考虑温度变化对凋落物分解速率的影响,构建热带森林碳通量动态模型,旨在模拟热带雨林 CO₂ 通量月动态循环变化,并对模型中参数进行敏感性分析,确定各参数对森林碳通量影响程度,为进一步完善热带森林碳循环模拟研究提供技术及理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 泰国位于亚洲中南半岛的中南部,地形以山地与高原为主,地势北高南低,根据地理特征分为 4 个自然区域。北部丛林密布,东北部属于湄公河流域,为高原地带,干季少雨,雨季泥泞。中部为湄南河冲积平原,南部是狭长的丘陵地带。全国森林总面积为 1 440 万 hm²,森林覆盖率达 25%。

研究区位于泰国呵叻高原西北部 Sakaerat 环境研究中心(地理坐标 14°29'32.5"N, 101°54'58.7"E),Sakaerat 研究区(以下简称为 SKR)占地面积约为 78 km²,地形较平缓,坡度不超过 4°,属于热带草原气候,年平均降水量在 1 200 ~ 1 300 mm,年均温 24 °C 左右,干湿季分明。干季为 11 月至翌年 3 月,炎热干燥,月降水少于 40 mm;雨季为 4—10 月,降雨充沛^[31]。研究区主要包含 29.5 km² 的干旱常绿林区域和 12.2 km² 的干旱龙脑香科森林区域。植被类型是热带季节性常绿林,森林冠层高度为 35 ~ 40 m。海拔高度约 543 m,主要土壤类型是由砂岩母质演化而来的浅石质盐土。

1.2 数据与方法

1.2.1 数据来源与处理 收集、整理 SKR 环境研究中心站点通量塔 2001-03-01—2003-12-31 综合气象要素和 CO₂ 浓度数据集(时间分辨率为 30 min)。气象观测系统依 4 个不同垂向梯度(距离地面: 5、20、35、45 m)架设,同步测定温度和 CO₂ 浓度(图 1)。翻斗式雨量计被固定安置于通量塔顶(47 m,

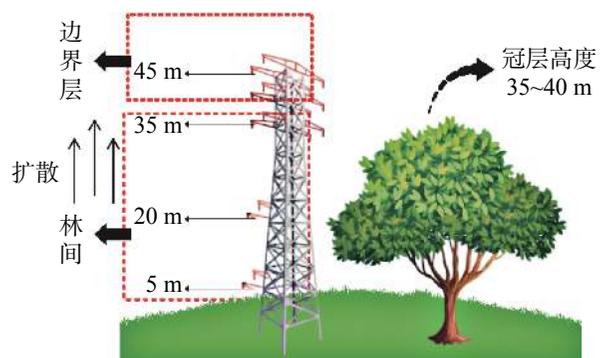


图 1 涡度通量塔监测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of eddy flux tower for monitoring

远高于冠层高度),以消除冠层截留的影响。数据处理选取线性内插法对少量的缺测数据(缺测数据占比小于总体样本的 5%)进行插补,以确保原始数据的完整性。最终,将逐半小时序列数据融合为逐月数据集,用于构建森林碳通量动态模型。

1.2.2 GLUE 算法 1992 年, BEVEN 等^[32] 提出普适似然函数不确定性评估方法,即 GLUE(Generalized Likelihood Uncertainty Estimation)算法,对模型的参数进行识别和率定。在预先设置好的模型参数范围内运用蒙特卡洛方法随机获取参数组合,代入模型中进行模拟,计算出模拟值与实测值的似然函数值,再计算函数值权重,得到参数组的似然值;根据预先设置好的似然值阈值,筛选出参数组似然值并重新归一化,分析参数不确定性^[33]。

1.2.3 模型构建与评价 本研究将森林生态系统作为一个整体进行模拟研究,关注影响林中 CO₂ 通量的各个组分,包括森林向大气边界层的扩散过程、植被的光合及呼吸作用、凋落物分解,并对各组分进行分析,将其在模型中重现,模拟月尺度下森林内部 CO₂ 通量的动态变化。

通过数据处理,将 CO₂ 浓度整理为通量数据,以林冠以下的 3 层 CO₂ 通量均值作为森林内部的 CO₂ 通量,以林冠上层梯度作为大气边界层 CO₂ 通量,运用 Fick 第一定律,模拟林内向大气的 CO₂ 扩散通量。净初级生产力是由植被以 CO₂ 为底物进行光合作用所产生的有机质总量中扣除植被自养呼吸后的剩余部分,因此可以表征光合与呼吸作用对 CO₂ 通量的影响。应用此种关系,改进后的 NCEAS 模型可利用 SKR 监测站的降水数据对月尺度森林 NPP 进行模拟。利用 NCEAS 模型模拟的月净初级生产力对凋落物质量进行约束,同时考虑温度变化对凋落物分解速率的影响,对森林凋落物的分解进行模拟。

根据图 2 对模型形式化,森林 CO₂ 通量变化量 (dCO_2) 计算公式为:

$$dCO_{2_sim} = F_d - NPP_{month} - F_c \quad (1)$$

式中, F_d 是凋落物分解 CO₂ 通量, NPP_{month} 为月净初级生产力, F_c 森林内部与边界层之间的 CO₂ 扩散通量。

模型的循环迭代步骤为: 1) 设置迭代元素 i , i 值为 6~36。2) 判断 i 是否等于 6, 若 $i=6$, 则第一个月的 CO₂ 通量也就是 6 月的 CO₂ 通量数据等于 5 月的实测值加上 6 月 CO₂ 通量变化量 dCO_2 。3) 若 $i \neq 6$, 则当月 CO₂ 通量数据等于上一个月的通量模拟值加上当月的通量变化量 dCO_2 。直到 $i=36$, 模型的迭代结束, 否则, $i=i+1$, 继续进行迭代计算。

运用 GLUE 算法, 设置 3 个参数, 在预先确定的参数范围内随机选取参数组的模拟(随机模拟次数为 100 000 次), 似然函数选取均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE), 进行参数敏感性分析, 确定模型的最优参数组合, 将最优参数组合的 CO₂ 通量模拟值与实测值比较, 对模型优度评价。

1.2.4 模型各组分计算 (1) 引入植被对降水滞后响应的月尺度 NPP 模型优化。

NCEAS 模型的 NPP 的计算公式为:

$$ANPP = 4\,000 \times [1 - \exp(-4.77 \times 10^{-5} \times MAP)] \quad (2)$$

公式(2)为裸地计算公式, 式中, $ANPP$ 单位为 $gC \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$ 。

$$ANPP = \min[F(MAP), F(MAT)] \quad (3)$$

公式(3)为非裸地计算公式, 式中, $ANPP$ 单位为 $gC \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$ 。

$$F(MAP) = \frac{0.1665 \times MAP^{1.185}}{\exp(0.000414 \times MAP)} \quad (4)$$

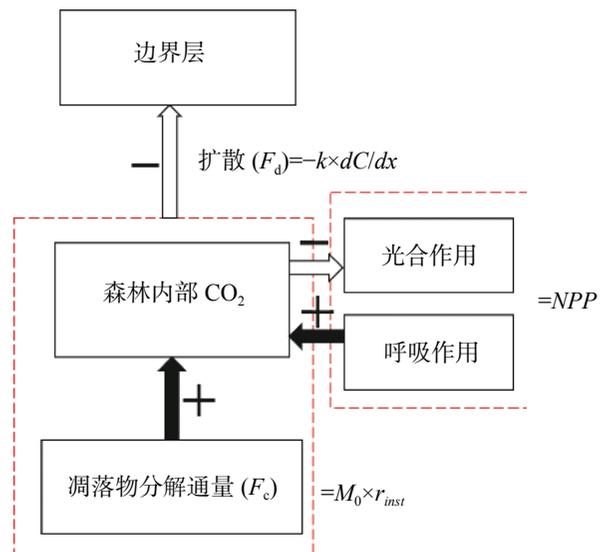


图 2 热带森林碳通量模型基本构成

Fig. 2 Basic structure of carbon flux model of tropical forest

式中, $F(MAP)$ 单位为 mm。

$$F(MAT) = \frac{3139}{1 + \exp(2.2 - 0.0307 \times MAP)} \quad (5)$$

式中, $F(MAT)$ 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

$ANPP$ 为地上 NPP, MAP 是年降水量, MAT 是年均温度, 比较 MAP 及 MAT 模拟结果, 取最低值为 NPP。根据图 3 所示, $F(MAP)$ 显著低于 $F(MAT)$, 因此, 选取 MAP 对 NPP 进行模拟。模型可模拟年尺度的 NPP, 而本研究使用月尺度的 NPP 对森林的碳通量动态变化进行模拟, 因此根据研究内容, 结合研究区域气象状况, 提出 1 种新方法, 对 NCEAS 模型改进, 从而模拟月尺度的 NPP。

由于植被生长对降水存在明显的滞后响应^[34-35]。

结合 NCEAS 模型的运算过程, 将前期不同时间跨

度月降水量(考虑前 1-12 月)均值作为当月降水量, 并假设全年的月降水量都相同, 则每个月的净初级生产力也应当一致, 将当月降水量乘以 12, 获得年降水量, 代入到 NCEAS 模型中, 获得在全年的月降水量都相同的假设情景下年 NPP, 再除以 12, 得到月 NPP。以此类推, 在假设全年每个月降水量都相同的情景下, 利用 NCEAS 模型, 模拟当月的 NPP, 计算公式为:

$$NPP_{month} = \frac{F(PPT \times 12)}{12} \quad (6)$$

式中, NPP_{month} 为月净初级生产力, 单位为 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}$, PPT 为不同时间跨度月降水量均值, 单位为 mm, 统计 1-12 月不同尺度的 NPP_{month} , 得到各月尺度模拟下的全年净初级生产力 NPP_m , 与 NCEAS 模型利用年降水量计算的 NPP 对比, 确定最优月尺度。

(2) CO_2 扩散通量 F_c 。模型假定森林内部与边界层之间的物质交换为平衡状态, 主要受浓度扩散控制^[36], 因此其 CO_2 扩散通量 F_c 可以通过 Fick 第一定律进行估算, 计算公式为:

$$F_c = -k \times \frac{dC}{dx} \quad (7)$$

式中, F_c 是森林内部与边界层之间的 CO_2 扩散通量, 单位为 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}$; k 为森林内部与边界层之间的扩散系数, 单位为 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}$, 用于表征扩散速度; dC/dx 是边界层(45 m)与森林内部(5、20、35 m 均值)的 CO_2 浓度梯度。

(3) 凋落物分解 CO_2 通量 F_d 。模型使用一种简单, 容易参数化的方程表达凋落物每月分解产生的 CO_2 通量, 计算公式为:

$$F_d = M_0 \times r_{inst} \times \text{Days} \quad (8)$$

式中, F_d 是每月凋落物分解产生的 CO_2 通量, 单位为 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}$; M_0 是每月的凋落物质量, 单位为 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}$; r_{inst} 是由 TOMCZYK^[37] 提出的考虑到温度变化对估计温度敏感性潜在影响的每日分解速率 d^{-1} ; Days 表示各月包含的天数。

$$r_{inst} = r_{ref} \times e^{\frac{-Ea}{k_B} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (9)$$

式中, r_{ref} 是在当温度参考值 T_{ref} 在 288 K 的分解速率 0.0204 d^{-1} ^[38]。 k_B 是玻尔兹曼常数($8.617 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$)。 Ea 为活化能(eV)。

1.2.5 模型的参数取值范围

碳通量模型需要率定的参数共有 3 个, 见表 1。

根据参数的物理特性, 确定了 k 、 Ea 、 M_0 3 个参数的初始取值范围, M_0 的取值范围通过最大月 NPP 进行约束。

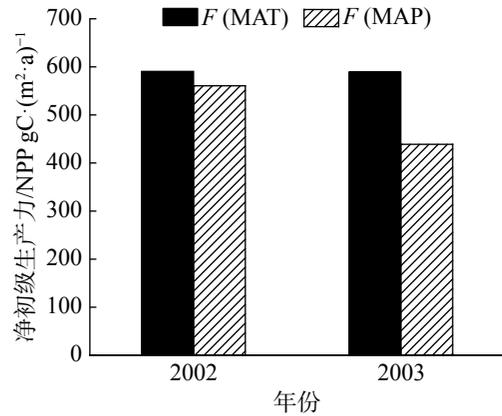


图 3 2002 和 2003 年 SKR 站热带森林 NPP 的 2 种模拟结果

Fig. 3 Simulation results of Tropical Forest NPP at SKR station in 2002 and 2003 NCEAS

1.2.6 模型优度评价 选用皮尔森相关系数(Pearson Correlation Coefficient, r)与均方根误差(RMSE)对模型结果与实际测量值进行检验, r 表示两个变量之间线性相关关系, 在模型模拟精度分析中, 用 r 表示测量值与模拟值的相关关系。RMSE 是用于衡量观测值同模拟值之间的偏差, 其值越低表明模型的预估结果越接近于实际测量值, 即模型的拟合能力越高。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CO_{2_sim} - CO_{2_ob})^2} \quad (10)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (CO_{2_sim} - \overline{CO_{2_sim}})(CO_{2_ob} - \overline{CO_{2_ob}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (CO_{2_sim} - \overline{CO_{2_sim}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (CO_{2_ob} - \overline{CO_{2_ob}})^2}} \quad (11)$$

式中, CO_{2_sim} 是模型模拟值, CO_{2_ob} 是实际观测值, $\overline{CO_{2_sim}}$ 是模拟值的平均值, $\overline{CO_{2_ob}}$ 是观测值的平均值, 模拟值与观测值之间的协方差与标准差的商为样本皮尔森相关系数 r 。

2 结果与分析

2.1 生态系统气象观测值 由图4可见, 研究区降水量的季节分布差异明显, 降水主要集中在4-10月, 11月至翌年3月为干季。2002年4-10月的降水量为1720.76 mm, 占全年降水量的98.9%, 降水量最多的月份为5月, 高达887.36 mm; 2003年4-10月的降水量为1109.31 mm, 占全年降水量的96.2%, 降水量最多的月份为5月, 为355.66 mm。全年降水量与温度变化趋势呈现明显的“单峰”, 雨热同期较为明显, 是典型的热带草原气候, 温度在4-5月达到高峰期, 2002年年均温度为23.38℃, 4月平均温度最高(5.65℃), 1月平均温度最低(20.31); 2003年年均温度为22.88℃, 4月平均温度最高(25.85℃), 12月平均温度最低(18.54℃)。2002与2003年的降水与温度季节变化趋势基本一致。

2.2 CO₂浓度变化特征 2002—2003年4个梯度的CO₂浓度连续监测结果(图5)表明, SKR研究区的常绿林的CO₂浓度特征呈现1个近U型的曲线, 夏秋季低, 冬春季高, 2002年5 m层CO₂浓度最低值为6月的378.71 μmol·mol⁻¹, 最高值为12月的390.93 μmol·mol⁻¹, 2003年最底层5 m高CO₂浓度最低值为8月的387.21 μmol·mol⁻¹, 最高值为12月的398.52 μmol·mol⁻¹。垂直方向上, 从最底层5 m的CO₂浓度值到最高层45 m的CO₂浓度值依次降低。

2.3 最优月尺度计算 假设全年月降水量都相同, 考虑降雨的滞后效应, 分析前期不同时间跨度的月尺度降水所模拟的年净初级生产力模拟结果(NPP_m)与以全年降水量的年净初级生产力模拟结果(NPP)。

由图6-a可见, 在2002年, 1-8月尺度的降水

表1 各参数内涵及取值范围

参数 Parameter	基本内涵 Basic connotation	取值范围 Value range
k	CO ₂ 扩散系数	0 ~ 1
Ea	活化能	0 ~ 1
M_0	凋落物质量	0 ~ 52.94

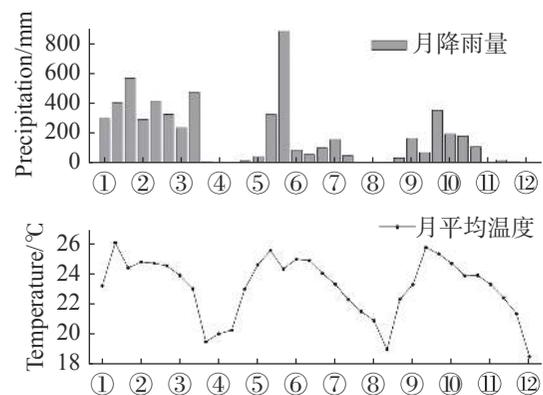


图4 2001年3月至2003年12月的降水量及温度变化趋势
① 2001年3月; ② 2001年6月; ③ 2001年9月; ④ 2001年12月; ⑤ 2002年3月; ⑥ 2002年6月; ⑦ 2002年9月; ⑧ 2002年12月; ⑨ 2003年3月; ⑩ 2003年6月; ⑪ 2003年9月; ⑫ 2003年12月。

Fig. 4 The variation trend of precipitation and temperature in the SKR monitoring station from March 2001 to December 2003

量均值的 NPP_m 存在较大差异, 呈现线性增加的趋势, 表明降水量对年净初级生产力具有显著影响。8–12 月尺度的降水量均值的 NPP_m 差异较小。比较 2 种年净初级生产力, 接近 $NPP\ 562.33\ gC\cdot(m^2\cdot a)^{-1}$ 的是前 6 个月降水量均值的 NPP_m , 为 $531.82\ gC\cdot(m^2\cdot a)^{-1}$, 前 7 个月降水量均值的 NPP_m , 为 $531.82\ gC\cdot(m^2\cdot a)^{-1}$ 。2003 年降水量相对 2002 年较低(图 4), 以不同时间跨度月尺度(1–12 月)降水量均值作为当月降水量的 NPP_m 呈现线性增加的趋势(图 6-b), 植被的生产力受到水分的限制。对比 2 种年净初级生产力模拟结果, 接近 $NPP\ 438.82\ gC\cdot(m^2\cdot a)^{-1}$ 的是前 6 个月降水量均值的 NPP_m , 为 $416.75\ gC\cdot(m^2\cdot a)^{-1}$, 以上结果表明, 每个月的净初级生产力除了与当月降水量相关, 还与前期的降水量相关。

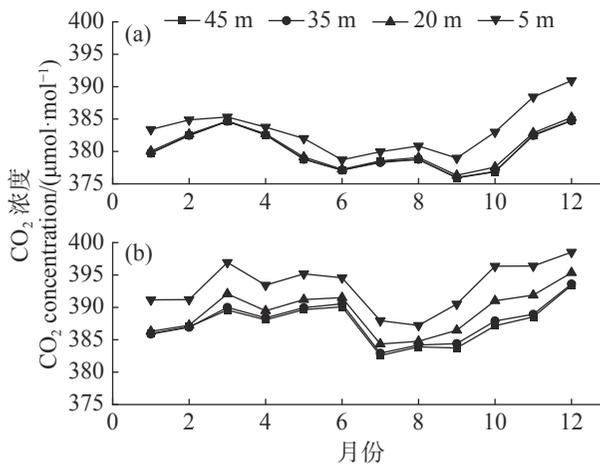


图 5 2002 年和 2003 年 CO_2 浓度月变化趋势

a. 2002 年不同高度 CO_2 浓度变化特征; b. 2003 年不同高度 CO_2 浓度变化特征。

Fig. 5 The monthly variation trend of CO_2 concentration in 2002 and 2003

Figure a shows the variation characteristics of CO_2 concentration at different altitudes in 2002; Figure b shows the variation characteristics of CO_2 concentration at different altitudes in 2003.

2.4 模型拟合结果与检验 经过 GLUE 算法的循环模拟后得到拟合效果最佳的 CO_2 通量模拟值与实测值比较, 结果见图 7, 模拟值与实测值的趋势具有较高的一致性, $r=0.69$, $RMSE=14.93\ gC\cdot m^{-2}\cdot 月$ 。

从全年尺度来看, 模型能准确模拟出森林在雨季与干季的 CO_2 通量变化特征, 雨季时的高温与丰富降水有利于植被的光合作用, 森林的 CO_2 通量降低。干季时的温度较低、辐射不足、降水稀少, 不利于植物的生长, 森林 CO_2 通量达到全年的最高值。2002 年, CO_2 通量模拟值与实测值的峰值均出现在 12 月, 实测值为 $510.11\ gC\cdot m^{-2}\cdot 月$, 模拟值为 $524.78\ gC\cdot m^{-2}\cdot 月$; 2003 年, CO_2 通量模拟值与实测值的峰值出现在 12 月, 实测值为 $526.08\ gC\cdot m^{-2}\cdot 月$, 模拟值为 $537.57\ gC\cdot m^{-2}\cdot 月$ 。根据模拟结果来看, 实测数据与模拟数据的相关性较强, 数值大小接

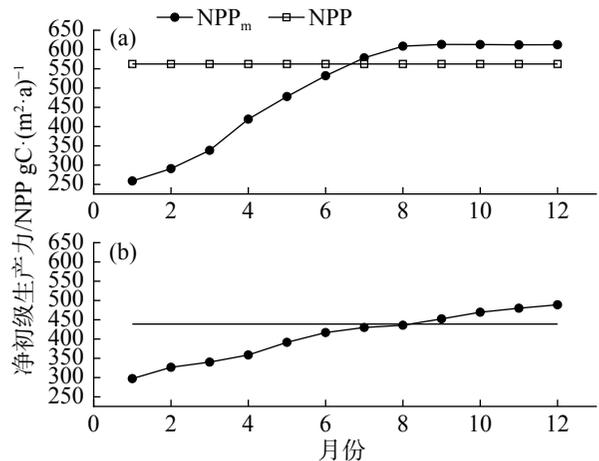


图 6 2002 年和 2003 年基于不同月尺度的 NPP 模拟结果

a. 2002 年 NPP_m 与 NCEAS 模型对年降水量模拟的 NPP; b. 2003 年 NPP_m 与 NCEAS 模型对年降水量模拟的 NPP。

Fig. 6 NPP simulation results based on different monthly scales in 2002 and 2003

Figure a shows the NPP_m and NPP simulation of annual precipitation by NCEAS model in 2002; Figure b shows the NPP_m and NPP simulation of annual precipitation by NCEAS model in 2003.

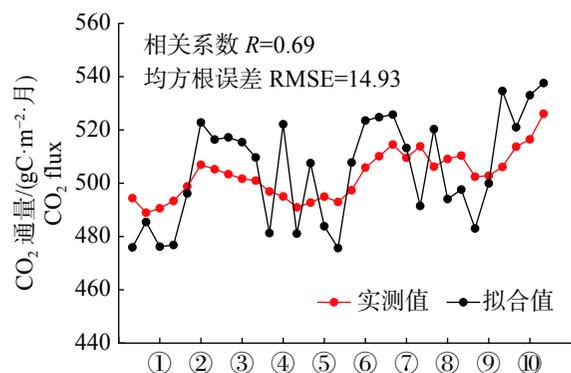


图 7 2001 年 6 月至 2003 年 12 月森林内部 CO_2 通量模拟值与实测值对比

① 2001 年 8 月; ② 2001 年 11 月; ③ 2000 年 2 月; ④ 2002 年 5 月; ⑤ 2002 年 8 月; ⑥ 2002 年 11 月; ⑦ 2003 年 2 月; ⑧ 2003 年 5 月; ⑨ 2003 年 8 月; ⑩ 2003 年 11 月

Fig. 7 Comparison of simulated and measured CO_2 concentration in the forest from June 2001 to December 2003

近, 总体而言, 模型能够较好地模拟泰国热带雨林的 CO_2 通量数值大小及变化趋势。

2.5 参数敏感性分析 选取 100 000 组参数进行不确定性分析, 比较不同参数在模型的敏感性大小 (图 8)。结果表明, 随着取值的不同, M_0 和 k 两个参数的拟合优度存在较为明显的差别, 表明参数在模型中较为敏感。其中参数 k 最为敏感, 在参数分布区间可看出较为明显的极值区间 (k 取值 0.4 时); M_0 在区间 0 ~ 13.9 呈现下降趋势, 但在 $M_0 > 13.9$ 的区间内都具有较低似然值取值; 而参数 Ea 在整个参数分布区都有低似然值取值, 表明 Ea 不敏感。

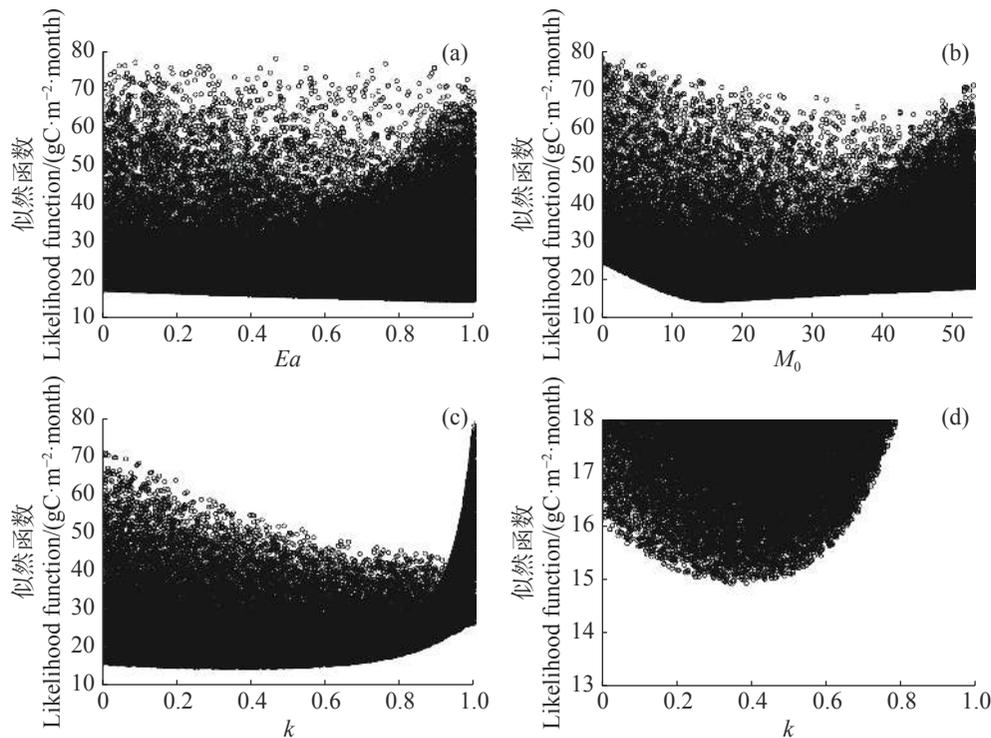


图 8 模型的 3 个参数与似然函数关系散点图

a. Ea 与似然函数关系; b. M_0 为似然函数关系; c. k 与似然函数关系; d. 在似然函数值 13 ~ 18 范围内, k 与似然函数关系。

Fig. 8 Scatter plot of the relationship between three parameters of the model and likelihood function

Figure a shows the relationship between Ea and likelihood function; Figure b shows the relationship between M_0 and likelihood function; Figure c shows the relationship between k and likelihood function; figure d shows the relationship between k and likelihood function in the range of the likelihood function value between 13 and 18.

3 讨论

本研究对 NCEAS 模型进行了改进, 并基于构建的热带森林碳通量动态模型, 应用泰国 SKR 监测站的降水量及温度数据, CO_2 涡度通量数据, 对森林内部的 CO_2 通量变化状况进行模拟, 并与监测站的实际观测结果比较, 得到的结果分析如下:

(1) 统计结果表明, 泰国 SKR 监测站热带森林干季与雨季的降水量差异较明显, 雨季降水量占全年的 90% 以上, 显著高于干季, 并且月均温度也高于干季; CO_2 浓度垂直梯度格局上受土壤呼吸与冠层碳代谢等因子影响, 在垂直方向上随高度的增加而降低, 造成该现象的原因是由于夏秋季节气温的上升促进了森林生态系统中木本植物的生长^[14], 增强了植物群落的光合作用, 导致 CO_2 浓度的下降。不同高度间 CO_2 浓度变化趋势无显著差异

(2) NCEAS 模型一般通过利用气候和土地覆盖的数据来估计全球年尺度上的 NPP, 本研究尝试改进 NCEAS 年尺度 NPP 模型, 对月尺度上的森林净初级生产力进行模拟, 并与原模型年尺度的模拟结果进行比较。结果表明, 模型在使用降水驱动时, NPP 值明显低于气温驱动下的 NPP 值, 说明降水是限制

该区域植被生长最重要因子,符合利用 NCEAS 模型估算全球 NPP,得到低纬度地区 NPP 的变化主要受降水量驱动结论^[30]。基于植物滞后响应的特点,从植被对降水的滞后时间跨度着手,并且考虑了模型适用范围存在的差异。假设全年月降水量都相同,利用 NCEAS 模型采用降水量计算 NPP,通过与年降水量模拟结果对比确定了前 6 个月降水均值为影响当月生产力的最优时间尺度,提高了 NCEAS 模型在时间尺度上的通用性与准确性,表明了对植物的干旱状况评估时,应当考虑不同时间尺度下降水积累效应及水分的亏缺对植被的影响^[39],此结果也与崔林丽等^[40]分析中国东部植物 NDVI 对降水响应特征,得到植被对降水变化最大响应的滞后期随着纬度降低由北到南逐渐延长的结果相符。

(3)构建的模型对 SKR 森林的 CO₂ 通量的模拟结果与实际测量值的对比说明新模型在拟合热带森林在碳通量方面具有较好的适用性、可靠性。参数敏感性分析结果表明 k 是影响热带森林 CO₂ 通量变化的主要因子,当通过生态系统过程模拟森林碳通量变化时,要着重考虑扩散过程,同时耦合其他生态系统功能。模型的模拟值与实测值之间相关性好,相关系数达 0.69。模拟的 CO₂ 通量数据与实测 CO₂ 通量数据的季节性差异基本一致,均呈现干季高、雨季低,与同在热带地区的海南尖峰岭通量观测结果一致^[13]。在研究区同一经度带(101°E)的西双版纳热带季雨林的研究中,张平等^[41]发现林冠-大气间的日均值呈现明显的季节性变化特征,干季的碳通量绝对值高于雨季,但在更高的纬度地区,赵仲辉等^[42]在亚热带杉木人工林生态系统的开展的研究结果与张元媛等^[43]在寒带峨眉冷杉成熟林生态系统的研究结果却呈现 CO₂ 通量冬季低、夏季高的现象,与本研究的结论相反,这可能是因为在热带地区生长旺季冠层的 CO₂ 浓度由于强烈的光合作用而变得很低^[12],导致在不同温度带的观测出现了不同的结果。通量数据质量是影响模型误差的重要因子,并且易受降水、大气湍流及传感器自身噪声影响^[44]。2002 年雨季的 CO₂ 通量模拟值出现了较大的波动,雨季的气象状况对模拟结果存在明显影响,没有很好体现雨季的 CO₂ 通量变化特征。此外,模型的误差与参数的选择有重要关系,碳通量动态模型根据生态系统过程输入了 3 个参数,以 RMSE 作为似然函数,对参数敏感性进行分析,发现模型对参数 E_a 和 M_0 不敏感,而当 k 取值 0.4 时,取得极值,意味扩散系数 k 影响热带森林 CO₂ 通量变化的主要因子,并说明若只受扩散作用影响,森林生态系统的 CO₂ 每个月将会有 40% 扩散到大气中,经过 2.5 个月扩散完成。表明了代谢旺盛的热带森林,向外界扩散的 CO₂ 是森林 CO₂ 通量变化的主要原因,这与基于 SVAT 模型在印度尼西亚苏拉威热带森林开展的冠层与大气的 CO₂ 交换研究结果相似^[45]。

尽管构建的模型模拟结果与实际观测值的趋势具有较高的一致性,但与通量观测结果相比较还存在一定的偏差,原因可能在于:1)模型所用数据只来自单一气象站点,结果缺少普适性,后续工作需要整合更多站点数据并进行模拟,以提高模型的适用范围;2)通量塔的最高层的 CO₂ 气体分析仪只有 45 m,作为边界层的高度有所不足,但更高区域的 CO₂ 通量数据难以获取;3)构建的碳通量模型中只设置了 3 个参数,并未使用遥感 NPP 数据对模型进行验证;4)森林生态系统 CO₂ 通量还受其他因素的影响,比如土壤呼吸。虽然存在以上问题,但模型总体上能够较好地模拟 SKR 监测站热带森林 CO₂ 通量的数值大小和变化趋势。因此,在未来的研究中,为进一步提高模型的精确性,减小误差,深入揭示森林碳通量的动态变化过程,还需选取不同似然函数对模型参数率定,增加土壤呼吸参数。研究结果可为典型热带森林生态系统碳通量动态模拟及森林碳循环研究提供科学依据与理论基础。

参考文献:

- [1] DIXON R K, SOLOMON A M, BROWN S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185 - 190.
- [2] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 733 - 740.
- [3] 王春林,于贵瑞,周国逸,等. 鼎湖山常绿阔叶混交林 CO₂ 通量估算[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2006, 36(S1): 119 - 129.
- [4] BONAN G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1444 - 1449.

- [5] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804 – 812.
- [6] Chevallier J. Carbon futures and macroeconomic risk factors: A view from the EU ETS [J]. *Energy economics*, 2009, 31(4): 614 – 25.
- [7] FAN S, GLOOR M, MAHLMAN J, et al. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models [J]. *Science*, 1998, 282(5388): 442 – 446.
- [8] SUNTHARALINGAM P, SPIVAKOVSKY C M, LOGAN J A, et al. Estimating the distribution of terrestrial CO₂ sources and sinks from atmospheric measurements: Sensitivity to configuration of the observation network [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D15): 1 – 42.
- [9] SHAW M R, ZAVALETA E S, CHIARIELLO N R, et al. Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO₂ [J]. *Science*, 2002, 298(5600): 1987 – 1990.
- [10] CANADELL J G, MOONEY H A, BALDOCCHI D D, et al. Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: A multitechnique approach for improved understanding [J]. *Ecosystems*, 2000, 3(2): 115 – 130.
- [11] OSBORNE C P, DRAKE B G, LAROCHE J, et al. Does long-term elevation of CO₂ concentration increase photosynthesis in forest floor vegetation? (Indiana Strawberry in a Maryland Forest). [J]. *Plant Physiology*, 1997, 114(1): 337 – 344.
- [12] 谭正洪, 张一平, 于贵瑞, 等. 热带季节雨林林冠上方和林内近地层 CO₂ 浓度的时空动态及其成因分析 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 555 – 567.
- [13] 陈步峰, 林明献, 李意德, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林近冠层 CO₂ 及通量特征研究 [J]. *生态学报*, 2001, 21(12): 2166 – 2172.
- [14] 焦振, 王传宽, 王兴昌. 温带落叶阔叶林冠层 CO₂ 浓度的时空变异 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(5): 512 – 522.
- [15] 陈晓峰, 江洪, 孙文文, 等. 安吉毛竹林生长季 CO₂ 浓度的时空特征 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1162 – 1169.
- [16] GROSSO S D, PARTON W, STOHLGREN T, et al. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature [J]. *Ecology*, 2008, 89(8): 2117 – 2126.
- [17] IRISARRI J G N, OESTERHELD M, PARUELO J M, et al. Patterns and controls of above - ground net primary production in meadows of Patagonia. A remote sensing approach [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(1): 114 – 126.
- [18] CLEVELAND C C, TAYLOR P, CHADWICK K D, et al. A comparison of plot - based satellite and Earth system model estimates of tropical forest net primary production [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(5): 1 – 19.
- [19] 董丹, 倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力 [J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 1855 – 1866.
- [20] 李传华, 韩海燕, 范也平, 等. 基于 Biome-BGC 模型的青藏高原五道梁地区 NPP 变化及情景模拟 [J]. *地理科学*, 2019, 39(8): 1330 – 1339.
- [21] 张清雨, 吴绍洪, 赵东升, 等. 内蒙古草地生长季植被变化对气候因子的响应 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(5): 754 – 764.
- [22] 季树新, 王理想, 白雪莲, 等. 不同林龄人工梭梭林对降雨的滞后响应 [J]. *干旱区研究*, 2020, 37(2): 349 – 356.
- [23] 刘春雨, 董晓峰, 刘英英. 不同尺度视角下大敦煌 NPP 分布格局研究 [J]. *资源科学*, 2014, 36(2): 406 – 412.
- [24] 王媛, 张娜, 于贵瑞. 千烟洲马尾松人工林生态系统的碳循环模拟及模型参数的敏感性分析 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1656 – 1666.
- [25] 韩其飞, 罗格平, 李超凡, 等. 基于 Biome-BGC 模型的天山北坡森林生态系统碳动态模拟 [J]. *干旱区研究*, 2014, 31(3): 375 – 382.
- [26] PAULICK S, DISLICH C, HOMEIER J, et al. The carbon fluxes in different successional stages: Modelling the dynamics of tropical montane forests in South Ecuador [J]. *Forest Ecosystems*, 2017, 4(2): 143 – 153.
- [27] 侯元兆. 中国热带森林的分布、类型和特点 [J]. *世界林业研究*, 2003, 16(03): 47 – 51.
- [28] 崔乙斌, 廖立国, 赵俊福, 等. 吊罗山低地森林不同地形土壤的呼吸变化 [J]. *热带生物学报*, 2020, 11(2): 231 – 237.
- [29] COOK-PATTON S C, LEAVITT S M, GIBBS D, et al. Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth [J]. *Nature*, 2020, 585(7826): 545 – 550.
- [30] PHILIPSON C D, CUTLER M E J, BRODRICK PG, et al. Active restoration accelerates the carbon recovery of human-modified tropical forests [J]. *Science*, 2020, 369(6505): 838 – 841.
- [31] MENGPIPING C, GUANZE W, SHUANGXI Z, et al. Studies on forest ecosystem physiology: Marginal water-use efficiency of a tropical, seasonal, evergreen forest in Thailand [J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(6): 187 – 197.
- [32] BEVEN K, BINLEY A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction [J]. *Hydrological Processes*, 1992, 6(3): 279 – 298.
- [33] 冯娇娇, 何斌, 王国利, 等. 基于 GLUE 方法的新安江模型参数不确定性研究 [J]. *水电能源科学*, 2019, 37(1): 26 – 28.
- [34] SHINODA M. Seasonal phase lag between rainfall and vegetation activity in tropical Africa as revealed by NOAA satellite data [J]. *International Journal of Climatology*, 1995, 15(6): 639 – 656.
- [35] 马雄伟, 赵庆志, 姚顽强. 黄土高原植被对气候变化的时滞响应及其时变特征 [J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(1):

157 – 166.

- [36] MUELLER B, WANG Y, DITTRICH M, et al. Influence of organic carbon decomposition on calcite dissolution in surficial sediments of a freshwater lake [J]. *Water Research*, 2003, 37(18): 4524 – 4532.
- [37] TOMCZYK N J, ROSEMOND A D, BUMPERS P M, et al. Ignoring temperature variation leads to underestimation of the temperature sensitivity of plant litter decomposition [J]. *Ecosphere*, 2020, 11(2): 1 – 14.
- [38] MANNING D W P, ROSEMOND A D, KOMINOSKI J S, et al. Detrital stoichiometry as a critical nexus for the effects of streamwater nutrients on leaf litter breakdown rates [J]. *Ecology*, 2015, 96(8): 2214 – 2224.
- [39] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(2): 423 – 431.
- [40] 崔林丽, 史军, 杨引明, 等. 中国东部植被 NDVI 对气温和降水的旬响应特征[J]. *地理学报*, 2009, 64 (7): 850 – 860.
- [41] 张一平, 沙丽清, 于贵瑞, 等. 热带季节雨林碳通量年变化特征及影响因子初探[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2006, 36(S1): 139 – 152.
- [42] 赵仲辉, 张利平, 康文星, 等. 湖南会同杉木人工林生态系统 CO₂ 通量特征[J]. *林业科学*, 2011, 47(11): 6 – 12.
- [43] 张元媛, 朱万泽, 孙向阳, 等. 川西贡嘎山峨眉冷杉成熟林生态系统 CO₂ 通量特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(17): 6125 – 6135.
- [44] 陈亮, 周国模, 杜华强, 等. 基于随机森林模型的毛竹林 CO₂ 通量模拟及其影响因子[J]. *林业科学*, 2018, 54(8): 1 – 12.
- [45] OLCHEV A, IBROM A, ROSS T, et al. A modelling approach for simulation of water and carbon dioxide exchange between multi-species tropical rain forest and the atmosphere [J]. *Ecological Modelling*, 2008, 212(1): 122 – 130.

Dynamic Analysis of Carbon Flux of Tropical Forest in Thailand Based on Process Model

LIAO Ligu, TAN Zhengong, JIANG Long, FU Miao, JIN Yan, LIU Yingshuai, ZHANG Jie
(College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: CO₂ vertical gradient concentrations, and meteorological data sets of temperature and precipitation in the tropical seasonal evergreen forest were collected from 2001—2003 at the SKR station in Thailand. and They were compiled, and the NCEAS model was coupled and improved to simulate tropical forest carbon source-sink income and expenditure processes under seasonal climate variability on a monthly scale. The results showed that the tropical forest in SKR monitoring station presented an obvious phenomenon of coincidence of rainfall with high temperature. The precipitation in the rainy season (April to October) accounted for more than 90% of the total annual precipitation, and the temperature came to the peak from April to May. CO₂ concentration was obviously different in the two seasons, high in the rainy season and low in the dry season, and it decreased with the increase of vertical height. Precipitation was the major factor of tropical forest NPP in the SKR monitoring station. The improved NCEAS model can simulate the monthly NPP of the tropical forest more accurately. June–July was the best temporal scale for the improved NCEAS model to simulate the monthly NPP of tropical forests. The constructed model has a high fitting accuracy: $r = 0.69$, RMSE = 14.93 gC·m⁻²·month. The likelihood function value RMSE is not sensitive to activation energy Ea and litter mass M_0 , and has low likelihood values in the parameter distribution interval. The diffusion coefficient k is sensitive, and there is an extreme value when the parameter is 0.4, indicating that k is the main influencing factor that affects the change in the CO₂ flux of the tropical forest. It is concluded that in the simulation of carbon flux based on ecosystem process the diffusion process of CO₂ from the interior forest to the atmospheric boundary layer is the main influencing factor of carbon flux change of forest ecosystem.

Keywords: NCEAS model; Fick's first law; CO₂ flux; tropical forest

(责任编辑: 罗启香 责任编辑: 钟云芳)