

基于日光诱导叶绿素荧光的陆地生态系统 GPP 估算研究

董 恒 郭 宏 袁艳斌
(武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘要: 为了更加精确全面地掌握全球陆地生态系统固碳情况, 基于 GUANTER 提出的简单线性模型, 利用 FLUXNET2015 通量数据、GOME-2 叶绿素荧光数据、MODIS 植被指数产品以及土地覆盖数据, 将温度胁迫因子和饱和水汽压胁迫因子加入模型中, 估算结果与传统简单线性模型的估算结果相比, 13 个通量站点中有 10 个通量站点的估算精度得到了提升。此外, 本研究还在考虑环境影响因素模型的基础上, 利用植被指数来模拟叶绿素荧光的冠层逃逸率 f_{esc} , 进一步提升模型的估算精度。结果显示, 与传统简单线性模型和只加入环境影响因子的模型估算结果相比, 13 个通量站点的估算精度都有所提升。

关键词: 总初级生产力; 日光诱导叶绿素荧光; 光合作用; GOME-2; 植被指数

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0205-07

Estimation of Terrestrial Ecosystem GPP Based on Sun-induced Chlorophyll Fluorescence

DONG Heng GUO Hong YUAN Yanbin
(School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The gross primary productivity (GPP) of terrestrial ecosystems is an important component of the carbon cycle of terrestrial ecosystems. Accurate calculation of GPP helps to understand the response of terrestrial ecosystems to climate change and human activity. In order to more accurately and comprehensively grasp the carbon sequestration of global terrestrial ecosystems, the simple linear model proposed by GUANTER was improved. Using FLUXNET2015 flux data, GOME-2 chlorophyll fluorescence data, MODIS vegetation index products and land cover data, temperature stress factors and saturated water vapor stress factors were added to the model. The estimated results of the simulation were improved compared with the estimates of traditional simple linear model. Among the 13 flux sites, the estimation accuracy of 10 flux sites was improved. In addition, in order to further improve the estimation accuracy of the model, canopy escape rate of chlorophyll fluorescence was also simulated based on the model incorporating environmental impact factors. The results showed that the estimation accuracy of all 13 flux sites was improved compared with the estimates of traditional simple linear models and models incorporating environmental impact factors. In conclusion, the addition of environmental impact factors and vegetation indices to traditional linear models improved the estimation accuracy of the model.

Key words: gross primary productivity; sun-induced chlorophyll fluorescence; photosynthesis; GOME-2; vegetation index

0 引言

陆地生态系统总初级生产力 (Gross primary productivity, GPP) 是指单位时间和单位面积上, 绿色植物通过光合作用所固定的有机碳总量, 又称总第一性生产力^[1]。作为地球生物圈中的主要生产

收稿日期: 2018-08-31 修回日期: 2018-09-27
基金项目: 长江科学院开放研究基金项目(CKWV2018498/KY)、国家自然科学基金项目(41701483, 41571514)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(20181VB060)
作者简介: 董恒(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事生态环境遥感研究, E-mail: simondong@whut.edu.cn
通信作者: 袁艳斌(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间信息技术在环境方面应用研究, E-mail: yybjm@126.com

者,绿色植被所固定的化学能为地球上其他所有生物提供能量。因此,精确估算世界各地总初级生产力是目前急需解决的问题。

植被生产力的模拟研究经历了从最初的简单统计模型、遥感数据驱动的过程模型到动态全球植被模型等多个发展阶段。遥感数据因其能够提供时空连续的植被变化特征,在区域评估和预测研究中扮演了不可替代的角色^[2]。现阶段,利用遥感数据来进行 GPP 估算的模型主要包括经典的光能利用率(Light use efficiency, LUE)模型以及近年来发展迅速的基于日光诱导叶绿素荧光(Sun-induced chlorophyll fluorescence, SIF)的 GPP 估算模型。光能利用率模型的核心思想是植被在吸收了光合有效辐射(Absorbed photosynthetically active radiation, APAR)后会按照一定的比例将太阳能固定为有机化学能,这一转化比例就是光能利用率^[3]。比较著名的光能利用率模型包括 GLO-PEM 模型^[4]、MOD17 模型^[5]、VPM 模型^[6-8]、TURC 模型^[9]。这类模型具有诸如遥感数据获取便捷、可进行大范围估算、模型简单等优点,是目前国内外学者广泛采用的 GPP 估算模型。

基于日光诱导叶绿素荧光的 GPP 估算模型是近年来逐渐兴起的一种新型的 GPP 估算模型。利用传统的诸如植被指数、叶片叶绿素浓度、生物量、冠层结构等植被参数估算 GPP 需要众多的辅助数据以及繁杂的模拟步骤,且模型具有一定的滞后性。而叶绿素荧光作为植被光合作用过程中的副产品可

以更加快速准确地反映植被内部的生理状态变化,因此相较于光能利用率模型而言,叶绿素荧光模型有着更加坚固的理论基础^[10]。各国学者也已经开展了许多利用叶绿素荧光估算 GPP 的研究,利用叶绿素荧光来估算农田^[11-12]、草地^[13]、森林^[14]等生态系统的 GPP,并取得了较好的效果。然而,这些研究中所使用的叶绿素荧光估算模型仅包含叶绿素荧光这一单一要素,未将冠层自身结构以及外界环境对植被的影响考虑在内,这也在一定程度上限制了模型估算精度的提升。

针对此问题,本研究结合不同植被类型的 13 个通量站点作观测数据,在传统线性模型的基础上融入温度胁迫因子和饱和水气压胁迫因子,并利用植被指数的不同数学形式对叶绿素荧光的冠层逃逸率进行模拟,构建新的叶绿素荧光 GPP 估算方法,以期利用日光诱导叶绿素荧光估算大区域的 GPP 提供新的途径。

1 数据和方法

1.1 研究区域

由于通量塔探测足迹往往小于 1 km², GOME-2 遥感图像像元的空间尺度为 0.5°×0.5°,因此需要通过计算相应指标来评估通量站点对其所在像元的代表性。参照文献[15],若一个站点所观测的植被类型占该站点对应像元面积的 60% 以上,且该像元内的 EVI 标准差小于 0.1,则该站点被选作研究站点。筛选出的通量站点具体信息如表 1 所示。

表 1 通量站点信息
Tab. 1 Information of flux sites

站点名称	植被类型	时间	纬度/(°)	经度/(°)	所在大洲
AU-Stp	草地	2011—2014 年	-17.150 7	133.350 2	大洋洲
US-AR1	草地	2011—2012 年	36.426 7	-99.420 0	北美洲
DE-Geb	耕地	2011—2013 年	51.100 1	10.914 3	欧洲
DE-Kli	耕地	2010—2014 年	50.950 0	13.512 6	欧洲
DE-RuS	耕地	2011—2014 年	50.865 9	6.447 2	欧洲
AU-DaS	热带稀树草原	2010—2014 年	-14.159 3	131.388 1	大洋洲
ZA-Kru	热带稀树草原	2009—2010 年	-25.019 7	31.496 9	非洲
FR-Pue	常绿阔叶林	2010—2012 年	43.741 4	3.595 8	欧洲
US-ME2	常绿针叶林	2010—2014 年	44.452 3	-121.557 4	北美洲
US-ME6	常绿针叶林	2011—2014 年	44.323 3	-121.607 8	北美洲
US-MMS	落叶阔叶林	2013—2014 年	39.323 2	-86.413 1	北美洲
US-Whs	稀疏灌木林	2010—2012 年	31.743 8	-110.052 2	北美洲
US-SRC	稀疏灌木林	2011—2013 年	31.908 3	-110.839 5	北美洲

1.2 数据

1.2.1 叶绿素荧光数据

本次研究所采用的叶绿素荧光数据是由搭载在 MetOp-A 卫星上的 GOME-2 传感器测量得到的

SIF740 产品。GOME-2 叶绿素荧光数据集包括 V26 和 V27 两个版本,V27 在 V26 的基础上添加了新字段并改进了误差矫正方法。GOME-2 叶绿素荧光数据分为 level 2 和 level 3 两个级别,level 2 是

日尺度叶绿素荧光产品,level 3 是在 level 2 数据基础上经过一系列处理得到的空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的月尺度叶绿素荧光产品。本研究选用的数据是 V27 版本的 level 3 数据,该数据可从网站 (http://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/MetOp/GOME_F/) 免费下载。

1.2.2 通量站点数据

通量站点数据来源于 FLUXNET 团队制作的 FLUXNET2015 数据集 (<http://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/>)。FLUXNET 2015 数据集涵盖不同区域通量站点网中 212 个通量站点的多年观测数据。这 212 个通量站点均匀分布于全球各地,各个站点观测的植被类型也不尽相同,为开展全球碳循环规律等方面的研究提供了很好的数据支撑。

1.2.3 植被指数数据

本研究所使用的 MOD13C2 植被指数产品由搭载在 Terra 卫星上的 MODIS 传感器测量获得。该产品是月尺度植被指数产品,空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$,包含了归一化植被指数 NDVI、增强植被指数 EVI、植被指数数据质量标识、红光波段反射率、近红外波段反射率、蓝光波段反射率、中红外波段反射率、平均太阳高度角等数据,该数据可从网站 (https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool) 下载。

1.2.4 土地覆盖数据

土地覆盖数据是由马里兰大学基于 MCD12Q1 产品经过空间聚合后生产的土地分类数据 (<http://www.landcover.org/data/lc/>)。数据的时间尺度为年尺度,空间分辨率为 $5' \times 5'$ 。数据所遵循的土地分类标准是 IGBP 土地分类标准,包含 17 种不同的土地类型,其中有 12 种是植被类型,分别是常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混合林、郁闭灌木林、稀疏灌木林、灌木草原、稀树草原、草地、耕地、耕地与自然植被。

1.3 研究方法

植被发射的叶绿素荧光与光合作用之间有着密不可分的关系,但仅用叶绿素荧光并不能完全解释植被的光合作用状态,需要将环境等因素考虑在内。参考 GUANTER 等^[11] 提出的叶绿素荧光 GPP 估算模型^[16] 为

$$G_{pp} = \frac{S_{IF} L_{UE}}{L_{UEf} f_{esc}} \quad (1)$$

式中 G_{pp} ——总初级生产力, $gC/(m^2 \cdot d)$
 S_{IF} ——叶绿素荧光, $mW/(m^2 \cdot nm \cdot sr)$
 L_{UE} ——光能利用率, %
 L_{UEf} ——荧光量子产量, %

f_{esc} ——叶绿素荧光的冠层逃逸率

由于远红外波段受冠层影响较小,因此一般默认 f_{esc} 为 1。

对于 L_{UEf} 而言,除非遇到比较极端的天气状况(高温、干旱、霜冻等),否则 L_{UEf} 的变化不会很大^[17-18]。同时考虑到本次研究所使用的荧光数据分辨率较低,难以反映出 L_{UEf} 的变化,故将 L_{UEf} 设定为定值进行研究。

L_{UE} 是 GPP 光能利用率模型中的核心参数,已经有许多科学家开展相关研究来寻找计算 L_{UE} 的方法。本研究选用 MOD17 产品使用的 L_{UE} 计算方法,其计算公式为

$$L_{UE} = L_{UEmax} T_{MINscalar} V_{PDscalar} \quad (2)$$

其中

$$T_{MINscalar} = \begin{cases} 0 & (T_{MIN} < T_{MINmin}) \\ \frac{T_{MIN} - T_{MINmin}}{T_{MINmax} - T_{MINmin}} & (T_{MINmin} \leq T_{MIN} < T_{MINmax}) \\ 1 & (T_{MIN} \geq T_{MINmax}) \end{cases} \quad (3)$$
$$V_{PDscalar} = \begin{cases} 1 & (V_{PD} < V_{PDmin}) \\ \frac{V_{PDmax} - V_{PD}}{V_{PDmax} - V_{PDmin}} & (V_{PDmin} \leq V_{PD} < V_{PDmax}) \\ 0 & (V_{PD} \geq V_{PDmax}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 L_{UEmax} ——最大光能利用率, %
 $T_{MINscalar}$ ——最低温调节系数
 $V_{PDscalar}$ ——饱和和水汽压差调节系数
 T_{MIN} ——全天最低温度, $^{\circ}C$
 T_{MINmin} ——植被光能利用率为 0 时的最低温度, $^{\circ}C$
 T_{MINmax} ——植被光能利用率达到最大值时的最低温度, $^{\circ}C$
 V_{PD} ——日间平均饱和水汽压差, Pa
 V_{PDmin} ——植被光能利用率为 0 时的日间平均饱和水汽压差, Pa
 V_{PDmax} ——植被光能利用率达到最大值时的日间平均饱和水汽压差, Pa

L_{UEmax} 、 T_{MINmin} 、 T_{MINmax} 、 V_{PDmin} 和 V_{PDmax} 可在 MOD17 产品说明中查阅得到,具体参数如表 2 所示。至此,本研究的叶绿素荧光 GPP 估算方法构建完成,公式为

$$G_{pp} = S_{IF} T_{MINscalar} V_{PDscalar} a + b \quad (5)$$

式中 a 、 b ——模型拟合获得的常数

虽然在一般情况下, f_{esc} 设置成 1,但有研究表明,通过改进 f_{esc} 也可以提升模型的估算精度。植被指数是冠层叶绿素含量和叶面积指数 LAI 很好的指

示器^[19-20],本文利用 NDVI 和 EVI 的不同数学形式来模拟 f_{esc} 。总初级生产力的估算方法为

$$G_{\text{PP}} = S_{\text{IF}} T_{\text{MINscalar}} V_{\text{PDscalar}} f(V_I) a + b \quad (6)$$

式中 $f(V_I)$ ——植被指数的相关函数

表 2 MOD17 参数
Tab.2 Parameters of MOD17

参数	常绿针叶林	常绿阔叶林	落叶阔叶林	稀疏灌木林	热带稀树草原	草地	耕地
$L_{\text{UEmax}}/\%$	$9.620\,0 \times 10^{-2}$	$1.268\,0 \times 10^{-2}$	$1.165\,0 \times 10^{-2}$	$8.410\,0 \times 10^{-2}$	$1.206\,0 \times 10^{-2}$	$8.600\,0 \times 10^{-2}$	$1.044\,0 \times 10^{-2}$
$T_{\text{MINmin}}/^{\circ}\text{C}$	-8.000 0	-8.000 0	-6.000 0	-8.000 0	-8.000 0	-8.000 0	-8.000 0
$T_{\text{MINmax}}/^{\circ}\text{C}$	8.310 0	9.090 0	9.940 0	8.800 0	11.390 0	12.020 0	12.020 0
$V_{\text{PDmin}}/\text{Pa}$	$6.500\,0 \times 10^2$	$8.000\,0 \times 10^2$	$6.500\,0 \times 10^2$	$6.500\,0 \times 10^2$	$6.500\,0 \times 10^2$	$6.500\,0 \times 10^2$	$6.500\,0 \times 10^2$
$V_{\text{PDmax}}/\text{Pa}$	$4.600\,0 \times 10^3$	$3.100\,0 \times 10^3$	$1.650\,0 \times 10^3$	$4.800\,0 \times 10^3$	$3.100\,0 \times 10^3$	$5.300\,0 \times 10^3$	$4.300\,0 \times 10^3$

2 结果分析

2.1 评价指标

本文采用模型估算 GPP 和通量塔观测 GPP 之间的决定系数 R^2 、校正决定系数 R^2_{adjusted} 、均方根误差 RMSE 这 3 个指标来评价回归模型的精度。这 3 个指标的计算式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (G_{\text{PPactual}} - G_{\text{PPpredict}})^2}{\sum (G_{\text{PPactual}} - G_{\text{PPmean}})^2} \quad (7)$$

$$R^2_{\text{adjusted}} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - p - 1} \quad (8)$$

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum (G_{\text{PPactual}} - G_{\text{PPpredict}})^2}{n}} \quad (9)$$

式中 G_{PPactual} ——通量站点测量的实际 GPP, $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
 $G_{\text{PPpredict}}$ ——本研究模型估算得到的 GPP, $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
 G_{PPmean} ——实测 GPP 的平均值, $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
 n ——样本数量
 p ——特征数量

R_{MSE} ——均方根误差, $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

校正决定系数在决定系数的基础上引入了样本数量和特征数量,消除了样本数量和特征数量的影响。

2.2 融入环境影响因子后的模型估算精度分析

各个站点的估算精度如表 3 所示。从表中可以看出,本文模型的估算精度比较理想。除 US-Whs、US-SRC、FR-Pue 这 3 个站点的 R^2 较低外,其他站点的 R^2 基本处于 0.5~0.7 范围内,说明本文模型的自变量可以在很大程度上解释 GPP 的变化。去除样本数量和特征数量的影响,通过 R^2_{adjusted} 指标来看,各站点的模拟精度也较高,说明本文模型的改进是比较成功的,可以较好地模拟出除稀疏灌木林外其他植被类型的 GPP。在众多站点中,模拟效果最好的是 ZA-Kru 站点,其 R^2 达到了 0.733 5,说明本文模型很大程度上反映了该站点周围植被的碳交换情况。模拟效果最差的是 US-SRC 站点, R^2 仅有 0.166 2,说明本文模型不适用于该站点,考虑到同为稀疏灌木林类型的 US-Whs 站点的 R^2 也仅有 0.277 5,说明本文模型应用于稀疏灌木林的效果不够理想。

表 3 各站点估算精度
Tab.3 Estimated accuracy for each site

站点名称	植被类型	本文模型 R^2	本文模型 R^2_{adjusted}	本文模型 $R_{\text{MSE}}/(\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	传统模型 R^2
AU-Stp	草地	0.603 4	0.594 8	0.950 3	0.483 1
US-AR1	草地	0.631 6	0.614 8	0.728 1	0.601 8
DE-Geb	耕地	0.557 1	0.544 1	2.195 0	0.549 3
DE-Kli	耕地	0.689 1	0.683 7	1.213 0	0.651 4
DE-RuS	耕地	0.579 0	0.569 9	3.299 0	0.445 7
AU-DaS	热带稀树草原	0.571 6	0.564 2	1.115 0	0.567 7
ZA-Kru	热带稀树草原	0.733 5	0.720 8	1.757 0	0.724 8
FR-Pue	常绿阔叶林	0.402 9	0.385 4	1.268 0	0.578 8
US-ME2	常绿针叶林	0.691 1	0.685 8	1.811 0	0.453 6
US-ME6	常绿针叶林	0.618 7	0.610 4	1.075 0	0.424 2
US-MMS	落叶阔叶林	0.633 6	0.616 9	2.048 0	0.381 7
US-Whs	稀疏灌木林	0.277 5	0.256 2	2.757 0	0.322 3
US-SRC	稀疏灌木林	0.166 2	0.141 7	3.077 0	0.290 7

与传统线性模型相比,从表 3 中可以看出,除 FR-Pue、US-Whs、US-SRC 这 3 站点外,剩余 10 个站点估算精度都有所提升,提升最大的是 US-MMS 站点,其 R^2 提升了 0.251 9。从植被类型上看,传统模型的模拟精度在稀疏灌木林类型的两个站点均优于本文提出的估算模型,但是其模型效果也不理想,决定系数都低于 0.330 0,说明无论是传统线性模型还是本文提出的估算模型都不能很好地解释稀疏灌木林的植被光合作用状况。总体来说,在传统线性模型中加入环境影响因子在一定程度上提升了模拟精度。

2.3 融入植被指数后的模型估算精度分析

本文不仅在传统线性模型的基础上进行了改进,还在加入环境影响因子的基础上利用植被指数模拟了叶绿素荧光的冠层逃逸率,试图进一步提高模型的模拟精度。本文选用了 NDVI 和 EVI 两个常用的植被指数来改进模型。由于尚未理清植被指数和 f_{esc} 之间的关系,因此,本文分别用植被指数的线性模型、幂函数模型、指数模型、对数模型这 4 种模型来模拟 f_{esc} 。具体结果如表 4 所示。

表 4 植被指数改进结果
Tab.4 Vegetation index improvement results

站点名称	植被类型	NDVI 改进模型 R^2	EVI 改进模型 R^2	环境因子模型 R^2	传统模型 R^2
AU-Stp	草地	0.663 5	0.674 6	0.603 4	0.483 1
US-AR1	草地	0.646 6	0.639 1	0.631 6	0.601 8
DE-Geb	耕地	0.650 6	0.670 0	0.557 1	0.549 3
DE-Kli	耕地	0.721 2	0.726 1	0.689 1	0.651 4
DE-RuS	耕地	0.640 5	0.611 8	0.579 0	0.445 7
AU-DaS	热带稀树草原	0.572 1	0.574 5	0.571 6	0.567 7
ZA-Kru	热带稀树草原	0.818 8	0.862 8	0.733 5	0.724 8
FR-Pue	常绿阔叶林	0.617 0	0.596 9	0.402 9	0.578 8
US-ME2	常绿针叶林	0.691 5	0.698 0	0.691 1	0.453 6
US-ME6	常绿针叶林	0.619 7	0.619 4	0.618 7	0.424 2
US-MMS	落叶阔叶林	0.810 9	0.838 6	0.633 6	0.381 7
US-Whs	稀疏灌木林	0.308 9	0.296 7	0.277 5	0.322 3
US-SRC	稀疏灌木林	0.166 4	0.171 0	0.166 2	0.290 7

2.4 不同 GPP 估算模型结果的年际特征比较分析

图 1 展示了不同站点不同 GPP 估算模型估算结果的年际变化特征。总体上来看,这 4 个 GPP 估算模型估算结果的季节性变化规律和年际特征相似,不同之处在于不同估算模型估算结果随时间的变化幅度不同。其中, GPP_{EC} 表示通量站点测量的 GPP; GPP_{SIF} 表示传统线性模型估算得到的 GPP; GPP_{ENV} 表示在传统线性模型的基础上融入环境因素后估算得到的 GPP; GPP_{NCT} 表示 NGEE-Tropics 项目的 GPP 估算模型估算结果。

可以看出,位于北半球的 US-AR1、DE-Geb 等站点的 4 个 GPP 估算模型估算结果都在北半球

从表 4 中可以看出,NDVI 改进后,每个站点的估算精度与环境因子模型相比都有了一定的提升。其中,提升较大的包括 FR-Pue、US-MMS 这 2 个站点,其 R^2 均提升 0.1 以上。提升最大的是 FR-Pue 站点,其 R^2 从 0.402 9 提升至 0.617 0。虽然在传统线性模型的基础上加入环境影响因子后,FR-Pue 站点的 R^2 低于传统线性模型的 R^2 ,但是在经过 NDVI 改进之后,其 R^2 超过了传统线性模型。说明在考虑了冠层对于叶绿素荧光逃逸的影响后,模型的估算精度优于传统线性模型的估算精度。

在 13 个站点中,有 8 个站点经过 EVI 改进后模型的 R^2 高于经过 NDVI 改进后模型的 R^2 ,说明 EVI 对模型的改进能力优于 NDVI。

而植被指数的不同形式对于模型的改进程度也不一样,线性形式、幂函数形式、指数形式、对数形式均可对模型进行不同程度的改进,但是不同的站点所最适合的形式也不一样。因此,亦不能确定以何种数学形式将植被指数融入到叶绿素荧光模型之中。更好地模拟 f_{esc} 这一参数还需要通过更多的研究才能实现。

的夏季时期(6—8 月)达到峰值,在北半球的冬季时期(12 月、1 月、2 月)达到最低值。而位于南半球的 ZA-Kru、AU-DaS 等站点的 4 个 GPP 估算模型估算结果则都在南半球的夏季时期(12 月、1 月、2 月)达到峰值,在南半球的冬季时期(6—8 月)达到最低值。说明无论是在北半球还是南半球,各类型植被的生理状态都在夏季时期最为活跃,冬季最为平淡。

从图 1 中可以看出, GPP_{SIF} 和 GPP_{ENV} 的变化幅度较为接近,原因是估算 GPP_{ENV} 的模型是在估算 GPP_{SIF} 的模型基础上加入环境影响因子而得到的。因此,这两个模型在估算 GPP 时随时间的变化规律

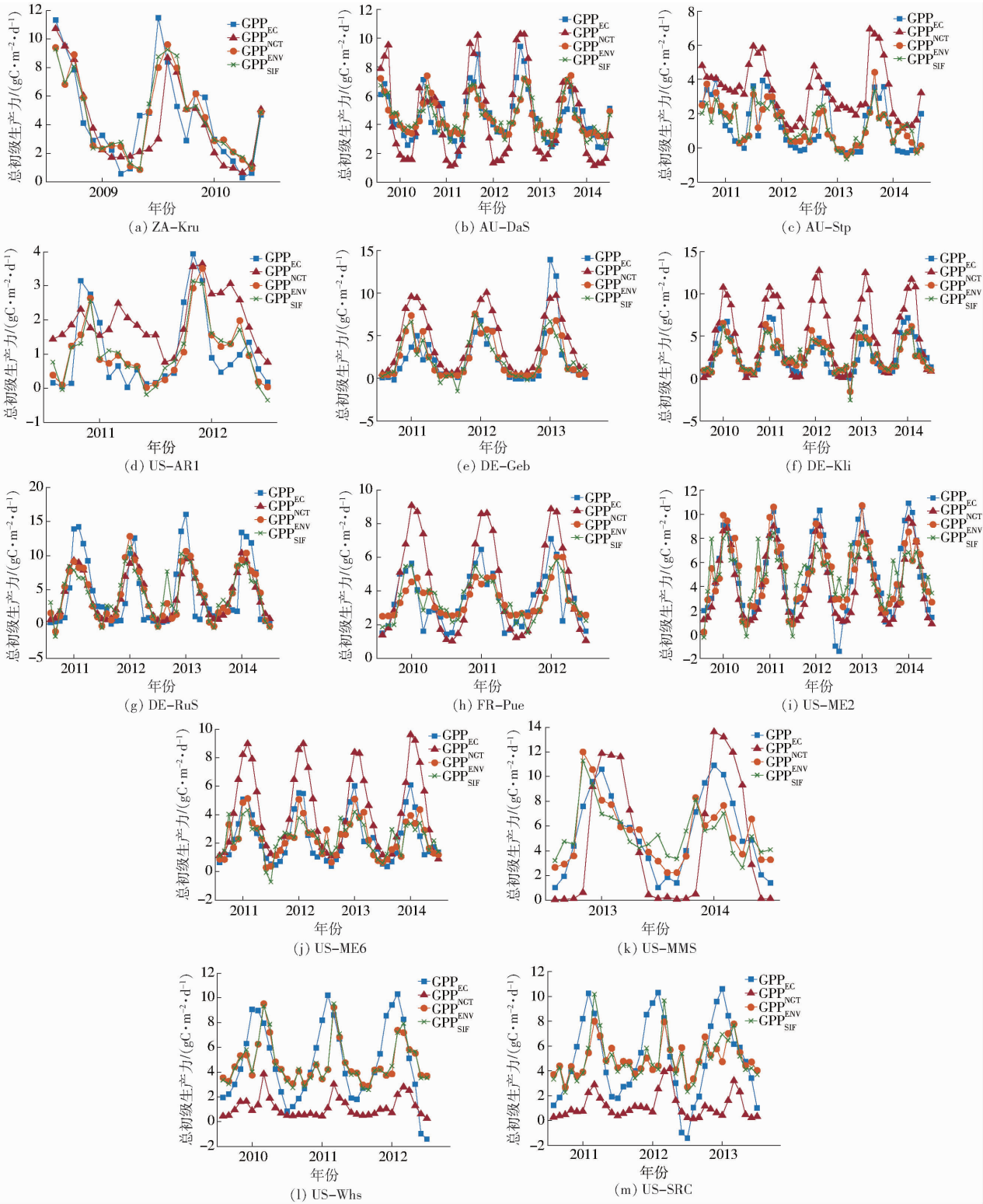


图1 各站点不同 GPP 估算模型估算结果季节性变化曲线

Fig.1 Seasonal changes in different GPP products at each site

和幅度较为相似。然而,这二者的估算结果又有一些区别。 GPP_{ENV} 相较于 GPP_{SIF} 来说与 GPP_{EC} 的变化规律更加接近,虽然 GPP_{ENV} 和 GPP_{SIF} 均会出现高值低估和低值高估的现象,但是 GPP_{SIF} 的误差更大。说明通过引入环境影响因子,叶绿素荧光模型更能反映实际的植被光合作用状况,而传统线性模型中仅包含叶绿素荧光这一个因素,在许多情况下还是

有不足。

对于 GPP_{NCT} 来说,在 AU - DaS、DE - Kli、US - ME6、FR - Pue、AU - Stp 这些站点出现了 GPP_{NCT} 过高的现象,在 US - SRC、US - Whs 站点出现了 GPP_{NCT} 过低的现象,而在其他的站点 GPP_{NCT} 与其他估算模型估算结果差别不大。US - SRC 和 US - Whs 站点都属于稀疏灌木林类型,说明不仅仅是环

境因子模型和传统线性模型在模拟稀疏灌木林的 GPP 时精度较低, GPP_{NGT} 与实测的 GPP 相差也较大;而在剩余的 11 个站点中,有 5 个站点的 GPP_{NGT} 明显大于其他 3 个估算模型结果的值,有 6 个站点的 GPP_{NGT} 与其他估算模型估算结果相差不大,说明 GPP_{NGT} 总体上还是偏高。

3 结论

(1)传统线性模型中融入环境影响因子后,13 个通量站点的估算结果中有 10 个站点的估算精度得到提升,有 3 个站点的估算精度有所下降。说明

在加入了环境影响因子后,模型总体估算精度的提升较为明显。

(2)通过分析比较不同 GPP 估算模型估算结果的年际特征,发现相较于 GPP_{SIF} 来说, GPP_{ENV} 的变化规律更接近实际测量的 GPP_{EC} 的变化规律。说明单因素的传统线性模型还不能完全反映植被的光合作用状况。

(3)利用植被指数对叶绿素荧光冠层逃逸率进行模拟,提升所有 13 个站点的估算精度。说明通过模拟冠层逃逸率来提升模型的估算精度十分有效。

参 考 文 献

- [1] 方精云,柯金虎,唐志尧,等.生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J].植物生态学报,2001,25(4):414-419.
- [2] 袁文平,蔡文文,刘丹,等.陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展[J].地球科学进展,2014,29(5):541-550.
YUAN Wenping, CAI Wenwen, LIU Dan, et al. Satellite-based vegetation production models of terrestrial ecosystem: an overview[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(5): 541-550. (in Chinese)
- [3] MONTEITH J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems[J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3):747-766.
- [4] PRINCE S D, GOWARD S N. Global primary production: a remote sensing approach[J]. Journal of Biogeography, 1995, 22(4-5):815-835.
- [5] HEINSCH F A, ZHAO M, RUNNING S W, et al. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(7):1908-1923.
- [6] XIAO Xianming, ZHANG Qingyuan, BRASWELL B, et al. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2):256-270.
- [7] XIAO Xiangming, HOLLINGER D, ABER J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle leaf forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4):519-534.
- [8] XIAO Xiangming, ZHANG Qingyuan, SALESKA S, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(1):105-122.
- [9] LAFONT S, KERGOAT L, DEDIEU G, et al. Spatial and temporal variability of land CO_2 fluxes estimated with remote sensing and analysis data over western Eurasia[J]. Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology, 2002, 54:820-833.
- [10] MERONI M, ROSSINI M, GUANTER L, et al. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: review of methods and applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10):2037-2051.
- [11] GUANTER L, ZHANG Y, JUNG M, et al. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(14):1327-1333.
- [12] LIU L, GUAN L, LIU X. Directly estimating diurnal changes in GPP for C3 and C4 crops using far-red sun-induced chlorophyll fluorescence[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2017, 232:1-9.
- [13] ZHANG Y, XIAO X, JIN C, et al. Consistency between sun-induced chlorophyll fluorescence and gross primary production of vegetation in North America[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 183:154-169.
- [14] YANG X, TANG J, MUSTARD J F, et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8):2977-2987.
- [15] ZHANG Y, GUANTER L, BERRY J A, et al. Estimation of vegetation photosynthetic capacity from space-based measurements of chlorophyll fluorescence for terrestrial biosphere models[J]. Global Change Biology, 2015, 20(12):3727-3742.
- [16] FRANKENBERG C, O'DELL C, BERRY J, et al. Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 147:1-12.
- [17] AC A, MALENOVSKÝ Z, OLEJNÍKOVÁ J, et al. Meta-analysis assessing potential of steady-state chlorophyll fluorescence for remote sensing detection of plant water, temperature and nitrogen stress[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 168:420-436.
- [18] HILKER T, COOPS N C, WULDER M A, et al. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: a review of current status and future requirements[J]. Science of the Total Environment, 2008, 404:411-423.
- [19] PENG Y, GITELSON A A, KEYDAN G, et al. Remote estimation of gross primary production in maize and support for a new paradigm based on total crop chlorophyll content[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115:978-989.
- [20] NGUY-ROBERTSON A L, PENG Y, GITELSON A A, et al. Estimating green LAI in four crops: potential of determining optimal spectral bands for a universal algorithm[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 192-193:140-148.