

文章编号: 1674-7054(2023)04-0412-12



海南岛橡胶林区域不同 SIF 产品的差异性分析 及其对 GPP 估算的影响

安映荷¹, 张润卿¹, 刘文杰^{1,2}, 王 鹏¹, 章 杰¹, 乌 兰¹, 孙仲益¹

(1. 海南大学生态与环境学院, 海口 570100; 2. 海南省农林环境过程与生态调控重点实验室, 海口 570100)

摘要: 为了探讨不同 SIF 遥感产品对海南岛橡胶林 GPP 估算中的可能带来的影响, 以海南岛橡胶林生态系统为研究对象, 利用基于涡度相关通量观测数据本地化的 LUE (Light use efficiency) 模型, 获得海南岛橡胶林总初级生产力 (Gross Primary Production, GPP), 并以此为参考, 利用时空一致性分析方法对比 5 种卫星遥感反演日光诱导叶绿素荧光 (Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence, SIF) 产品 (CSIF、GOSIF、SIF_{OCO2-1696}、SIF₀₀₅、SIF_{LUE}) 的差异性, 并评估各产品对海南岛橡胶林生态系统 GPP 估算的影响。结果显示: CSIF 与 GOSIF 在时空变化的分析中具有更好的适用性, 但 CSIF 不适用于长期趋势分析, 同时二者与海南岛橡胶林 GPP 估算值的时空一致性较高; SIF₀₀₅ 的表现仅次于前两者; 而 SIF_{OCO2-1696} 在海南岛近 20 a 内的数据缺失较为严重, SIF_{LUE} 则是缺失部分海南岛南部区域的数据, 两者缺乏代表性。以上结果表明: CSIF 和 GOSIF 2 款产品的表现最优, 其次为 SIF₀₀₅, 而 SIF_{OCO2-1696} 和 SIF_{LUE} 的表现相对而言并不适于海南岛橡胶林生态系统 GPP 的估算。

关键词: 日光诱导叶绿素荧光; 遥感产品; 时空一致性; 橡胶林生态系统; 海南岛

中图分类号: Q 149; P 414.4 **文献标志码:** A **审图号:** 琼 S(2023)077 号

引用格式: 安映荷, 张润卿, 刘文杰, 等. 海南岛橡胶林区域不同 SIF 产品的差异性分析及其对 GPP 估算的影响 [J]. 热带生物学报, 2023, 14(4): 412-423. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.2023.04.009

日光诱导叶绿素荧光 (Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence, SIF) 是受太阳辐射而激发的叶绿素重新发射光子回到基态时产生的 1 种光信号, 光谱范围在 650 ~ 800 nm, 可在红光和近红外光谱区被监测到^[1]。植被光合作用分为光反应和暗反应, 而 SIF 是 1 种受光能驱动的信号, 发生在光反应过程中, 因此与光合作用联系紧密^[2], 并且与其他卫星遥感植被指数相比, SIF 信号更接近植被实际的光合作用, 能更有效地反映植被生长状况^[3]。目前, 关于 SIF 的验证和应用研究主要依托于模型建立^[4] 或高光谱传感器测量^[5-6] 等工具, 并已取得显著进展。其中, 基于地面实验及高空的卫星遥感反演方式主要证实了 SIF 与植被光合作用的关

系^[7-8]。现有的大部分 SIF 遥感产品通过卫星传感器反演得到, 这些遥感产品被广泛应用在陆地总初级生产力 (Gross Primary Production, GPP) 估算^[9-11]、干旱监测^[12-14]、植被物候反演^[15-16] 及碳平衡观测^[17] 等方面。随着卫星遥感技术的不断发展, 欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 首个专门为 SIF 探测设计的卫星“荧光探测器” (Fluorescence Explorer, FLEX) 于 2022 年发射, 该卫星可以提供 300 m 精细空间分辨率和全波段的全球植被 SIF 产品^[18], 但可用的时间序列有限。SIF 作为光合作用有力的探测工具, 为 GPP 提供了 1 种新的估算方法^[19]。因此, 近年来很多学者通过日本温室气体观测卫星 (Greenhouse Gases Ob-

收稿日期: 2022-08-22

修回日期: 2023-02-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD220040403); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (42101101); 国家自然科学基金地区科学基金项目 (32160320)

第一作者: 安映荷 (1998-), 女, 海南大学生态与环境学院 2021 级硕士研究生. E-mail: 1486117204@qq.com

通信作者: 孙仲益 (1989-), 男, 副教授, 博导. 研究方向: 陆地生态系统碳循环. E-mail: gis.rs@hainanu.edu.cn

serving Satellite, GOSAT)^[20]、欧洲 METOP 第二代臭氧业务监测传感器(Global Ozone Monitoring Experiment-2, GOME-2)^[21]、扫描成像吸收光谱仪(SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartograph Y, SCIAMACHY)^[22]、轨道碳观测卫星 2 号(Orbiting Carbon Observatory-2, OCO-2)^[23]及中国首颗二氧化碳探测卫星 TanSat^[24]进行 SIF 的反演,并构建了一系列全球 SIF 卫星遥感产品,为 SIF 遥感产品在估算 GPP 等方面提供有效数据来源。其中以 CSIF(Continuous Solar Induced Fluorescence)^[25]、GOSIF(Global OCO-2 of SIF)^[26]、SIF_{OCO2-1696}(High Resolution Global Contiguous SIF of OCO-2)^[27]、SIF₀₀₅(Harmonized long-term SIF)^[28]、SIF_{LUE}(Light Use Efficiency SIF)^[29] 5 种产品最具有代表性。

现有的 SIF 遥感产品在全球尺度上应用与验证效果虽好,但是在区域的普适性上还有待证明^[20, 30-31]。中国位于亚洲东部和太平洋西岸,生态系统类型多样,大部分地区处于温带大陆,少部分地处热带,杨凤珠等^[32]以中国生态系统光谱观测网络的 4 个农田站 SIF 观测数据为参考,对不同 SIF 遥感产品进行验证,发现各产品在空间格局上保持高度一致性,在年均值变化趋势上面,CSIF 和 GOSIF 的表现最好;但对于中国热带地区 SIF 遥感产品适用情况的表述并不明确。目前,在中国乃至全世界范围内,鲜有针对常年高云覆盖、蒸发量强及植被群落结构复杂的热带地区的 SIF 遥感产品进行适用性分析。热带地区是重要的碳汇增长点,热带森林作为覆盖率最高、群落结构最复杂、碳汇能力最强的生态系统,对生物地球循环和大气功能都有着重大影响^[33],但也正因如此,对热带森林开展研究相对也存在更多的困难。橡胶树(*Hevea brasiliensis*)是全球热带地区重要的经济林木和人工种植生态系统之一^[34],其物种多样性在一定尺度上低于热带雨林^[35-36],生态系统的结构和功能与热带雨林相比较也较简单^[37],是研究热带森林的理想突破口。橡胶林具有水土保持、固定 CO₂ 和维持土壤肥料等生态功能^[38],同时,作为热带地区的经济林木,又具有一定的实际生产意义^[39]。此外,海南岛橡胶林种植区域占全岛森林总面积的 1/4,是我国第二大天然橡胶种植区。综上所述,研究在海南岛橡胶林 GPP 估算中

的不同 SIF 遥感产品的适用性对比,对于重要农产品保护、实际生产和生态环境保护都有重要实践意义。同时,为 SIF 遥感产品在热带地区 GPP 估算中提供理论参考和借鉴意义。本研究选择海南岛橡胶林为研究对象,以 2001—2019 年海南岛橡胶林生态系统 GPP 数据为参考,从不同的时间、空间角度通过相对系数和绝对系数等指标,对比了 CSIF、GOSIF、SIF_{OCO2-1696}、SIF₀₀₅、SIF_{LUE} 5 种产品的差异性及其与海南岛橡胶林生态系统 GPP 的时空一致性,旨在分析 5 种 SIF 遥感产品在海南岛橡胶林的时空格局差异,并通过空间分布一致性、季节变化一致性和与 GPP 的相关性等相关指标的计算,探讨不同 SIF 遥感产品对海南岛橡胶林 GPP 估算中的可能带来的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概括 海南岛位于(108°03′—111°03′)E 和(18°10′—20°10′)N 之间,西临北部湾,东濒南海,是我国第二大岛,全岛面积约为 3.54 万 km²。海南岛属于热带季风气候,年均温 25℃,年降水量在 1 600 mm 以上,降水量充沛,日照充足,受冷空气影响小。海南岛的森林覆盖率为 53.51%,主要分布有热带湿润雨林、常绿季雨林、山地雨林、落叶季雨林和热带稀树草原,其余为人工种植的经济林木,如橡胶林^[40]。岛内的橡胶林种植面积仅次于云南省,是我国第二大橡胶种植区。

1.2 数据来源

1.2.1 SIF 卫星遥感产品 使用的 5 款 SIF 遥感产品见表 1。(1) CSIF。该产品利用中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)的地表反射率和 OCO-2 传感器的 SIF 数据,生成了 2 款全球空间连续 SIF 产品,分别用于晴空瞬时条件与全天条件。其中,全天条件的 SIF 数据集具有较强的空间、季节和年际动态变化^[25]。为便于与其他产品进行对比,本研究选择晴空瞬时条件(CSIF_{clear-inst})的数据产品作为研究对象。(2) GOSIF。该产品是 Li 等^[26]基于数据驱动的方法开发的 1 种新的全球 SIF 数据集。GOSIF 的预测模型基于 OCO-2 探测器、MODIS 遥感数据和气象再分析数据,具有更精细的空间分辨率。本研究选择了时间分辨率为逐月的、有效时间范围为 2000—2020 年的数据产品作为研

究对象。(3) SIF_{OCO2-1696}。该产品是利用机器学习方法在充分考虑到植物在空间和时间上的不同生理特征基础上,对生物群落和时间进行分层训练,得到的全球空间连续 SIF 产品。该产品准确地保存了 OCO-2 轨道的时空变化,并与独立机载 SIF 测量结果相比较,具有很强的 consistency [27]。(4) SIF₀₀₅。该产品为德国地球科学研究中心 (GFZ) 开发,综合 SCIAMACHY 与 GOME-2 的 SIF 产品,基于时间和空间分层训练神经网络的机器学习算法,解释不同的生物生理和物理因素与

SIF 在时空变化上的关系,将原始数据空间分辨率细化至 0.05°,并利用累积分布函数匹配技术进行校正,得到最终的 SIF₀₀₅ 产品。(5) SIF_{LUE}。该产品基于 2 版 GOME-2 卫星传感器的遥感数据(分别用 JJ 和 PK 表示)[22],利用构建光能利用效率(LUE)模型的方法获取到的 SIF 数据集[29]。该数据集根据建立在 SIF 与高空间分辨率遥感解释变量间的半经验关系,利用来自 OCO-2 的 SIF 观测数据进行独立验证,选择了最优解释变量集,完成 SIF 产品生产。

表 1 SIF 卫星遥感数据集信息

数据集名称	时间分辨率	空间分辨率/°	有效时间/年	传感器	参考文献
CSIF	4 d	0.05	2001—2020	OCO-2	[25]
GOSIF	月	0.05	2000—2020	OCO-2	[26]
SIF _{OCO2-1696}	16 d	0.05	2015—2018	OCO-2	[27]
SIF ₀₀₅	月	0.05	2002—2018	SCIAMACHY/GOME-2	[28]
SIF _{LUE}	8 d	0.05	2007—2018	GOME-2	[29]

1.2.2 海南岛橡胶林 GPP 数据 以农业农村部儋州热带作物科学观测实验站(又称儋州橡胶林通量站;该站点位于橡胶林区域内,装有开路涡度相关系数(OPEC)和植物冠层垂直微气候剖面系统,已连续观测 10 余年[41])观测数据为基础,本地化的改进 EC-LUE(eddy covariance light use efficiency)模型并作为估算工具[42],获得 2001—2020 年逐月海南岛橡胶林生态系统 GPP 数据,其空间分辨率

为 1 000 m。原始 EC-LUE 模型[43]参数包括归一化差值植被指数(NDVI)、光合作用辐射(PAR)、气温以及显热通量与潜热通量的比率,本研究使用的 EC-LUE 模型综合了饱和水汽压差(VPD)对 GPP 的限制影响[44]。

1.3 研究方法

1.3.1 技术路线 技术路线如图 1 所示。(1)对来源不同的 5 种 SIF 产品进行统一时间分辨率的

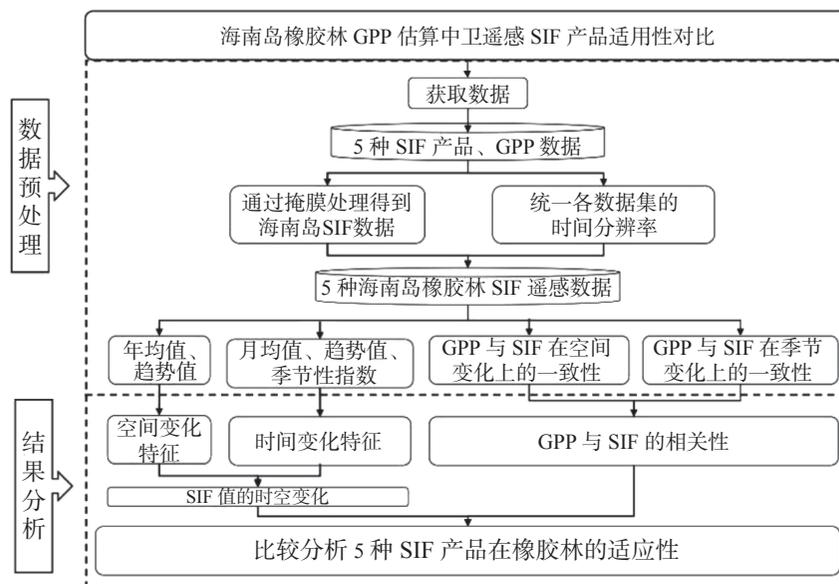


图 1 技术路线图

预处理,为消除随机误差的影响,将 CSIF 和 SIF_{LUE} 2 款产品分别按每 4 d 和 8 d 的最大值统一为逐月的数据集,其余数据集按每月均值统一为相同时间分辨率的数据集;(2)对 5 种 SIF 产品和海南岛橡胶林 GPP 原始数据进行掩膜提取,保留包含 65% 以上面积为橡胶林的像元,确定产品选择的范围;(3)计算 5 种 SIF 产品有效时间范围内的多年均值、月均值和趋势值;各产品的月均值进行归一化处理,以消除传感器不同波段的影响,继而计算季节性强度指数和分析季节性变化;(4)逐像元分别计算 5 种 SIF 产品与海南岛橡胶林 GPP 的解释系数,确定空间相关关系;(5)评估 5 种 SIF 产品的时空格局差异性以及与海南岛橡胶林 GPP 的一致性,最终完成不同 SIF 产品对 GPP 估算影响分析。具体评估方法与指标见表 2。

表 2 SIF 遥感数据集差异性评估指标

评估内容	评估指标
空间一致性	多年年均值空间分布特征
	趋势值分布特征
	GPP与5种SIF产品决定系数(R ²)的空间分布特征
时间一致性	多年每月均值季节变化特征
	季节性强度指数
	趋势值季节变化特征
	GPP与5种SIF产品相关系数(R)的季节变化特征

1.3.2 空间一致性检验方法 以各产品在有效时间段内的年均值进行空间分布特征对比分析;同时,计算各产品逐像元的变化趋势,分析各产品空间上是否具有 consistency。

趋势计算公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times \text{SIF}_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n \text{SIF}_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}, \quad (1)$$

式中, Slope 为 SIF 年均值变化趋势线的斜率,即 SIF 的变化趋势; n 代表每种数据集的有效时间段; i 代表年份($i=1, 2, 3, \dots, n$); SIF_i 表示第 i 年的年均值。当 Slope 大于 0 时,则呈现上升趋势,反之则呈下降趋势。

最后,通过计算各产品与海南岛橡胶林 GPP 之间的决定系数,对比分析 5 种 SIF 产品在

空间上与 GPP 之间的拟合程度,以此来判断各产品在 GPP 估算中的适用性。

1.3.3 时间一致性检验方法 很多研究理论与实践证明,GPP 与 SIF 之间在时间尺度上呈强线性相关^[45]。本研究旨在探讨 SIF 产品在海南岛橡胶林 GPP 估算适用性差异,为能更好地反映 SIF 值与橡胶树生长的季节变化一致性情况,因此只选择分析 SIF 数据集时间序列的季节性变化。利用标准化处理后的月均值,从趋势值、多年每月均值、与 GPP 的相关系数及季节性指数 4 个方面评估不同 SIF 数据集时间序列在季节上的变化特征,以此作为时间一致性的分析方法。

其中,季节性指数法是以时间序列含有季节性周期变动的特征,计算描述该变动的季节变动指数,计算公式如下^[46]:

$$S_i = 12 \times \frac{\sum_{j=1}^n \text{SIF}_{(i,j)}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{12} \text{SIF}_{(i,j)}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中, S_i 为第 i 月的季节性指数; n 为总的年数; $\text{SIF}_{(i,j)}$ 为第 j 年第 i 月的 SIF 值;12 表示 1 年当中的 12 个月。每个月 SIF 均值的平均季节性指数为 100%,当某个月的 S_i 超过 100% 时,表示该月的 SIF 均值在季节尺度上达到高峰期, S_i 最大则说明对应月份的 SIF 均值为峰值,反之,则为最低值。

2 结果与分析

2.1 SIF 产品的差异性分析

2.1.1 多年均值空间分布特征 五种 SIF 遥感数据集的多年均值空间分布图如图 2 所示。5 种 SIF 产品表现出相似的空间分布格局,北部多为低值,而南部多为高值,这与海南岛橡胶林植被覆盖率由北向南逐渐升高的分布相一致。其中,CISF(图 2-a)、GOSIF(图 2-b)和 SIF₀₀₅(图 2-c) 3 款产品从数据分布上看,具有较高的完整性;SIF_{LUE}(图 2-e)产品在东南部表现出数据缺失,但高低值的分布特征与前三者相同。

2.1.2 趋势分布特征 5 款 SIF 遥感数据集多年均值的趋势空间分布特征如图 3 所示。仅有 CSIF(图 3-a)和 SIF_{LUE}(图 3-e)2 款产品在岛南及西南部的零星橡胶林区域表现出降低趋势,其余 3 款产品均呈现出全岛范围的增加趋势。在趋势的高低分布特征上,5 款产品表现一致,高值普遍

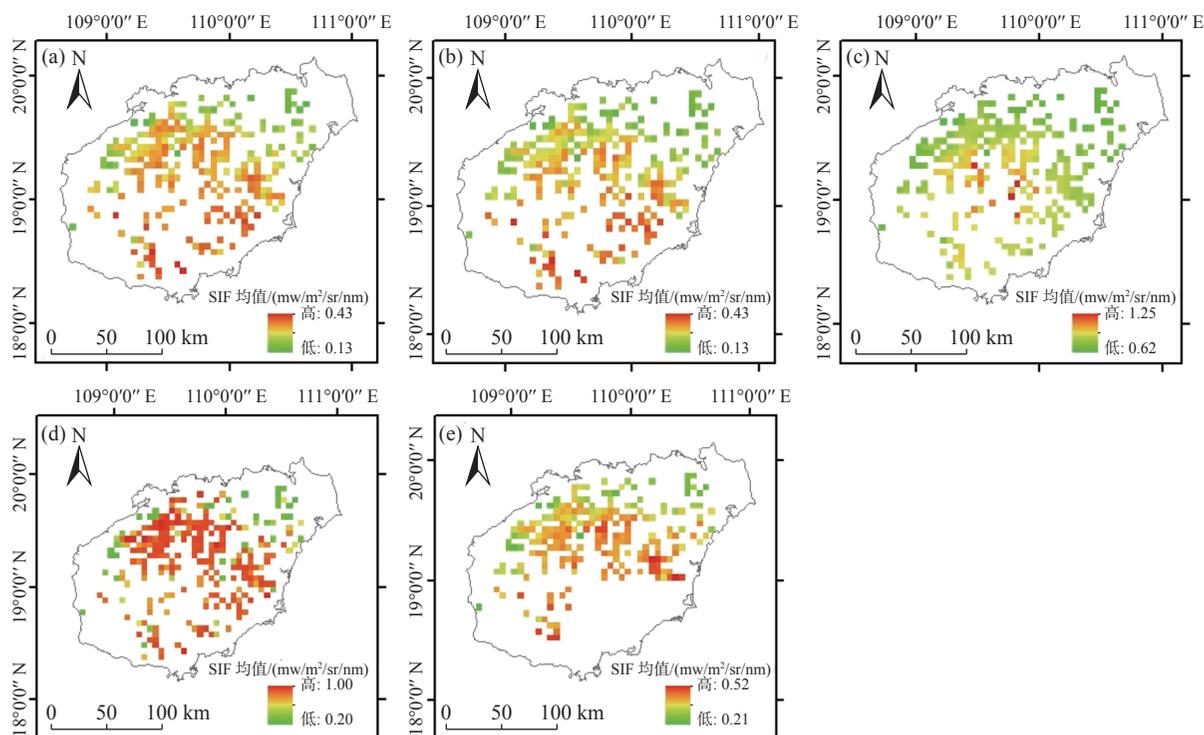


图2 海南岛橡胶林5种SIF产品多年均值空间分布图

(a)为CSIF; (b)为GOSIF; (c)为SIF₀₀₅; (d)为SIF_{OC02-1696}; (e)为SIF_{LUE}。

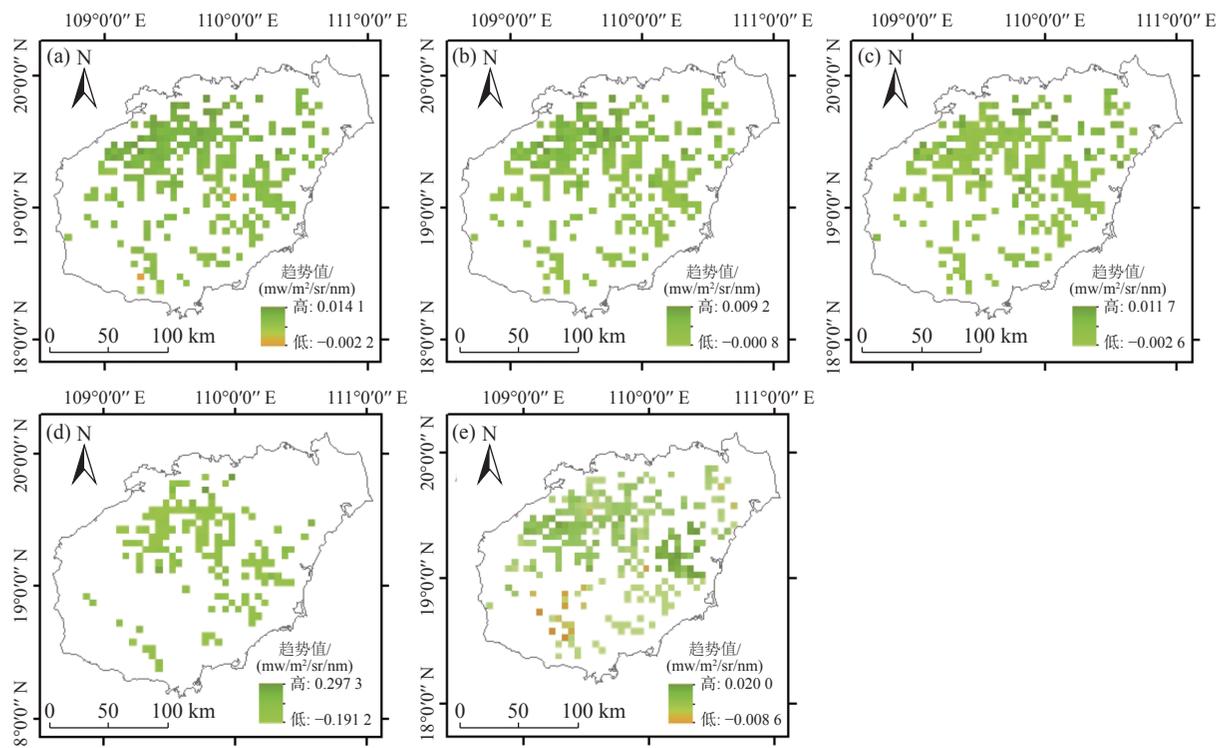


图3 海南岛橡胶林5种SIF产品多年均值趋势值空间分布图

(a)为CSIF; (b)为GOSIF; (c)为SIF₀₀₅; (d)为SIF_{OC02-1696}; (e)为SIF_{LUE}。

分布在海南岛北部,其中SIF_{LUE}(图3-e)数据集在岛中部也有高值分布。经统计发现,SIF_{OC02-1696}(图3-d)数据集趋势值均值最高;GOSIF(图3-b)

的趋势值均值最低。

2.1.3 季节性特征 5款SIF遥感数据集年内月均值季节性变化如图4所示,所有数据均经各自

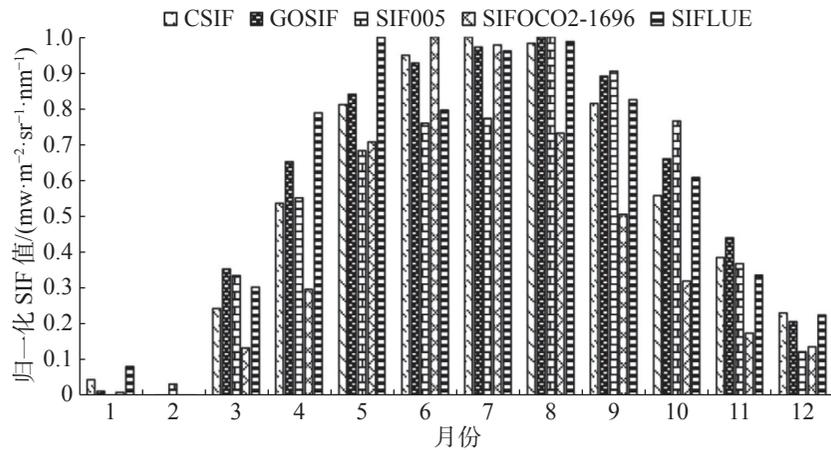


图4 海南岛橡胶林5种SIF产品每年月均值季节性变化图

标准化处理后。其中,5种产品的月均值均表现出先升高再降低的变化趋势,说明产品在季节性变化特征上相一致,峰值出现在5—8月,低值出现在1月和2月,这与海南岛橡胶林的生长状况一致。此外,如表3所示,各产品在4—10月期间的季节性指数普遍大于100%,表示在这期间的SIF值处于高峰期。5款产品分别在6月、8月、8月、6月和5月的季节性指数最高,说明各产品在5—8月中达到峰值。

2.1.4 季节性趋势特征 5款SIF遥感数据集的各月趋势变化如图5所示。CSIF、GOSIF和SIF₀₀₅3款产品各季节均呈现增加的趋势(图5右侧坐标轴),而SIF_{OCO2-1696}与SIF_{LUE}则表现出不规则的降低趋势(图5左侧坐标轴)。SIF_{OCO2-1696}数据集在12月的负值最大,说明该数据集在12月的SIF值明显降低;SIF₀₀₅数据集在3月有明显的增加趋势,此时的趋势值为0.026;CSIF、

表3 5种SIF遥感产品每月季节性指数

月份	CSIF	GOSIF	SIF ₀₀₅	SIF _{OCO2-1696}	SIF _{LUE}
1	0.57	0.63	0.67	0.47	0.50
2	0.53	0.62	0.69	0.46	0.42
3	0.74	0.85	0.88	0.63	0.72
4	0.99	1.05	1.02	0.85	1.22
5	1.23	1.17	1.10	1.38	1.43
6	1.35	1.23	1.15	1.76	1.22
7	1.39	1.26	1.16	1.73	1.39
8	1.37	1.27	1.30	1.41	1.42
9	1.23	1.20	1.24	1.12	1.25
10	1.01	1.05	1.15	0.87	1.03
11	0.86	0.91	0.90	0.69	0.76
12	0.73	0.76	0.75	0.64	0.64

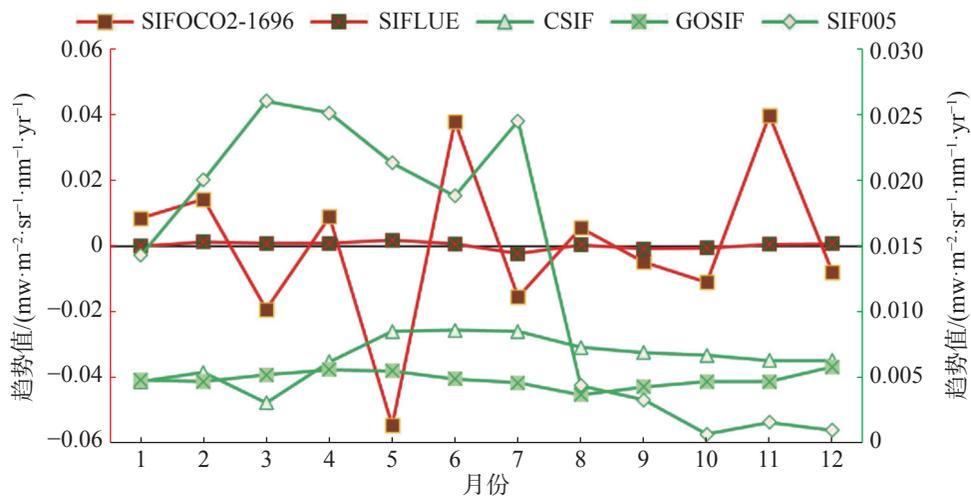


图5 海南岛橡胶林5种SIF产品逐月趋势变化

GOSIF 和 SIF_{LUE} 3 款数据集的趋势变化较为稳定, 而其余 2 款数据的趋势变化的突变性较明显。

2.2 SIF 对 GPP 估算的影响分析

2.2.1 空间影响分析 5 款 SIF 遥感产品数据集与海南岛橡胶林 GPP 的多年均值的决定系数空间分布特征如图 6 所示。通过分析 R² 的空间分布情况得知, CSIF(图 6-a)、GOSIF(图 6-b)和 SIF₀₀₅(图 6-c)3 款产品的分布特征表现出一致性, 均呈现出北高南低的分布特征, 能够较好地捕捉到海

南岛橡胶林生态系统 GPP 的空间分布格局, 可用于估算 GPP 空间分布特征。而在此结果中, SIF_{OCO2-1696} 因可用数据集太少, 无法计算与 GPP 的决定系数; SIF_{LUE}(图 6-d)数据集的计算结果分布特征的表现次于 CSIF 和 GOSIF。

2.2.2 时间影响分析 5 款 SIF 遥感数据集与海南岛橡胶林 GPP 的相关系数季节性变化特征如图 7 所示。通过分析可知, CSIF 和 GOSIF 2 款产品的多年月均值和 GPP 的多年月均值, 在季节变化上呈现高度一致性, 在 4 月 GPP 与 SIF 之间的

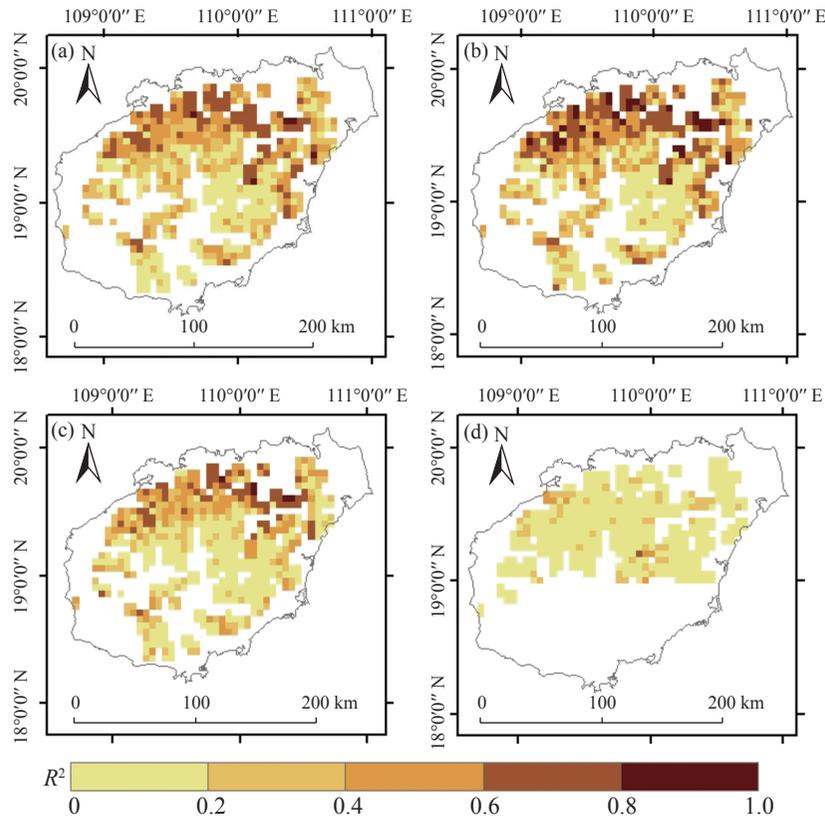


图 6 海南岛橡胶林 GPP 与 5 种 SIF 产品多年均值的决定系数空间分布图 (a)为 CSIF; (b)为 GOSIF; (c)为 SIF₀₀₅; (d)为 SIF_{LUE}。

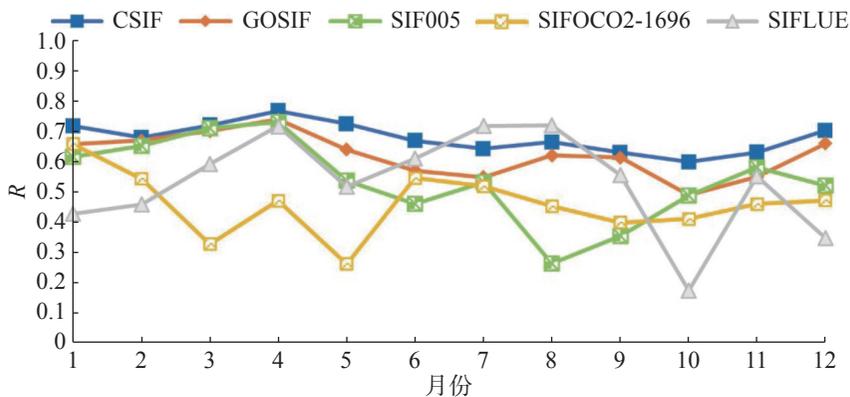


图 7 海南岛橡胶林 GPP 与 5 种 SIF 产品多年均值的相关性系数季节变化图

相关性最高($R=0.77(P<0.01)$ 和 $R=0.74(P<0.01)$); SIF₀₀₅ 和 SIF_{LUE} 在前 4 个月的变化与前两者一致, 5—12 月则呈现出不规则变化; SIF_{OCO2-1696} 数据集与 GPP 的季节相关性较差, 且季节变化不稳定。

2.3 SIF 产品的 GPP 估算适用性 5 款 SIF 产品在空间分析、长期趋势分析和对 GPP 估算的影响 3 个方面的总结结果如表 4 所示, 5 款产品中只有 GOSIF 无论在空间分析还是长期趋势分析中的结果都优于其他 4 款产品(图 2, 图 5), 其次是 CSIF 产品。在海南岛橡胶林区域适用情况最差的是 SIF_{LUE} 产品, 这是由于该产品在该地区的数据完整性较差。而针对海南岛橡胶林区域 GPP 估算的适用性可以看出, GOSIF 和 CCSIF 2 款产品与橡胶林 GPP 无论在空间还是长期趋势上都保持高度一致, 适用情况较好。

表 4 5 种 SIF 遥感产品适用情况

数据集名称	空间分析适用情况	长期趋势分析适用情况	GPP估算的适用情况
CSIF	较好	一般	较好
GOSIF	较好	较好	较好
SIF _{OCO2-1696}	一般	一般	一般
SIF ₀₀₅	较好	一般	一般
SIF _{LUE}	较差	一般	较差

3 讨论

3.1 不确定性分析 CSIF、GOSIF、SIF₀₀₅、SIF_{OCO2-1696} 和 SIF_{LUE} 5 款产品从空间和时间两个角度对相对系数、决定系数、均值、趋势值等指标进行评估, 不确定性主要来源于: (1) 5 款产品的时间序列长度不同。5 款产品来自不同的传感器, 估算方法不同, 每款数据的有效时间范围也不同, 其中, GOSIF 拥有最长的时间序列长度, 为 21 a; 而 SIF_{OCO2-1696} 的时间序列长度最短, 只有 4 a, 因此, 统一有效时间序列长度对本研究没有实际意义, 而这种不一致性会导致在季节性变化分析上的不确定性, 因为 SIF_{OCO2-1696} 可用年份较少, 使用均值计算与其他长时间序列的数据相比, 缺乏代表性。(2) 空间覆盖度的完整性。从空间覆盖度的角度来说, 5 款数据也缺少一致性, 其中, SIF_{LUE} 的数

据缺失最为严重, 空间覆盖率较低, 这是因为 SIF_{LUE} 的原数据集较为稀疏^[29], 并且缺少解释变量的数据, 由此产生的细化产品虽然空间分辨率提高了, 但仍存在数据稀疏的差距, 在岛屿或半岛上就会出现空白, 即邻近网格单元数量不足, 无法细化。因此, 会对 SIF_{LUE} 数据集在空间分布特征和季节变化特征上的分析带来不确定性。其次, SIF 产品有效栅格选取过程中以橡胶林占面积超过 65% 作为依据, 地物的混合效应也是引入不确定性的一个原因; 海南岛橡胶林的种植面积在近 30 a 内呈现出“北增南减”的空间趋势^[47], 北部橡胶林连片程度更高, SIF 数据能更好的反映 GPP 的变化情况。(3) SIF 数据在热带地区的局限性。IF 数据与其他光学遥感植被指数相比, 受到云、雪或冰覆盖的影响小^[48], 但热带地区的气候条件复杂, 云层较厚、海盐气溶胶浓度高, 虽没有研究证明 SIF 产品是否与其他植被指数一样, 在热带地区的适用性与普遍得出的理论存在偏差^[49], 但热带地区的复杂环境条件对卫星遥感产品反演带来的不确定性无法忽视。(4) 参考值的不确定性。本研究的 GPP 数据来源于改进型 EC-LUE 的 GPP 估算产品, 站点尺度的模拟结果与观测值相比 RMSE 达到 $2.00 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[44], 并且该数据集在空间尺度升级过程中驱动数据的不确定性会进一步增加全岛尺度的 GPP 准确性。

3.2 SIF 产品的差异性分析 本研究选择的 5 款 SIF 遥感数据集的差异性来源主要是卫星传感器和算法不同。OCO-2 卫星传感器发射于 2014 年 7 月 2 日, 可用波段为 757 ~ 775 nm^[23], 由此传感器反演出的 3 款数据 CSIF、GOSIF 和 SIF_{OCO2-1696} 的波长为 757 nm, CSIF 产品相对于原始数据, 缺乏生理和物理意义^[25], GOSIF 则充分考虑了植被、气候和土地覆盖条件 3 种类型的 SIF 数据解释变量^[26], SIF_{OCO2-1696} 与 CSIF 的传感器来源相同, 但存在是否包含生物和物理意义的差异, 前者因算法的不同, 所以具有合理的生理和物理意义, 因此具有比 CSIF 更强的季节性。SIF₀₀₅ 和 SIF_{LUE} 分别来自 SCIAMACHY/GOME-2 和 GOME-2。SCIAMACHY 和 GOME-2 两者的载荷设置类似, 光谱分辨率为 0.48 nm。SIF₀₀₅ 数据集是利用 SCIAMACHY 和 GOME-2 月值 SIF 产品通过降低空间分辨率得到的产品, 实现了 2 种传感器的融

合; SIF_{LUE} 是 GOME-2 在空间细化尺度的产品, 基于光能利用效率模型, 选择植被、水分和温度参数作为 SIF 的解释变量, 提高了该数据的降尺度产品的精度^[50]。

3.3 SIF 产品的 GPP 估算适用性 从年均值的时空角度分析, CSIF 和 GOSIF 在空间分布特征分析中比其余 3 种产品更适合应用于海南岛橡胶林 GPP 估算, 但是 CSIF 有效时间序列短, 不适合长期趋势分析。由图 5 可知, CSIF 在 3 月的趋势值最低, 增加趋势不明显, 且季节性变化没有 GOSIF 稳定; 这是因为本研究中选择的是晴空瞬时条件下的 CSIF 产品, 相比较另一款 CSIF 产品来说, 在季节变化上缺少与其他 SIF 产品的一致性^[51]。另外, 就 CSIF 产品而言, 该产品的反演过程中缺少植被生理和环境物理因素, 因此无法有效体现光合生理状态^[25], 从而季节性变化不明显, 而降水、温度、橡胶生长等因素具有明显的季节性变化, 因此, CSIF 较适合应用于 GPP 的空间分布格局的估算应用。

5 种产品分别与海南岛 GPP 进行影响分析, 结果表明, CSIF 和 GOSIF 比其余 3 种产品更能捕捉到 GPP 的变化, 它们的决定系数空间分布特征最完整且最能反映橡胶林的 GPP 状况。而 SIF_{OCO2-1696} 和 SIF_{LUE} 在海南岛的可用数据缺失严重, 在 GPP 估算中不如 CISF、GOSIF 和 SIF₀₀₅ 产品表现。

4 结 论

SIF 遥感数据作为光合作用的“探测工具”, 能有效估算生态系统 GPP, 因此, 一系列 SIF 遥感产品应运而生。这些产品来源不同, 估算方式不同, 个别产品在时空分辨率和有限时间范围等方面在特定区域上的应用尚不明确。本研究以海南岛橡胶林为切入点, 选取 CSIF、GOSIF、SIF_{OCO2-1696}、SIF₀₀₅、SIF_{LUE} 5 款产品, 利用海南岛橡胶林 GPP 为参考, 评估不同 SIF 数据产品间的时空差异, 及其对海南岛橡胶林 GPP 估算的影响, 结果表明: CSIF 与 GOSIF 在时空变化的分析中具有更好的适用性, 但 CSIF 不适用于长期趋势分析, 二者能够良好地对海南岛橡胶林生态系统 GPP 的时空分布特征进行指示; SIF₀₀₅ 与 GPP 一致性分析中的表现仅次于前两者; 而 SIF_{OCO2-1696} 在海南岛近 20

a 内的数据缺失较为严重, SIF_{LUE} 则是缺失部分海南岛南部区域的数据, 适用性较差。

致谢: 海南岛橡胶林 GPP 数据来源于 Wei Cui 等人的研究成果 (<https://doi.org/10.3390/fl3060893>); CSIF 数据 (<https://osf.io/8xqy6/>) 来源于 Zhang Y 等人研究成果; GOSIF 数据 (http://data.globalecology.unh.edu/data/GOSIF_v2/Monthly/) 来源于 Li 和 Xiao 研究成果; SIF₀₀₅ (<https://cornell.app.box.com/s/gkp4moy4grvqsus1q5oz7u5lc30i7o41/folder/128864739508>) 由 Wen J 提供; SIF_{OCO2-1696} (<https://daac.ornl.gov/>) 由 Yu 等人提供; SIF_{LUE} 数据 (<http://jeodpp.jrc.ec.europa.eu/ftp/jrc-opendata/ECOCLIM/Downscaled-GOME2-SIF/v2.0/>) 由 Gentine 等人提供。特此感谢!

参考文献:

- [1] MOHAMMED G H, COLOMBO R, MIDDLETON E M, et al. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress [J]. *Remote sensing of environment*, 2019, 231: 111177.
- [2] GU L, HAN J, WOOD J D, et al. Sun-induced Chl fluorescence and its importance for biophysical modeling of photosynthesis based on light reactions [J]. *New Phytologist*, 2019, 223(3): 1179 – 1191.
- [3] GUANTER L, ALONSO L, GÓMEZ-CHOVA L, et al. Estimation of solar-induced vegetation fluorescence from space measurements [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(8): L08401.
- [4] VERRELST J, RIVERA J P, VAN DER TOL C, et al. Global sensitivity analysis of the SCOPE model: What drives simulated canopy-leaving sun-induced fluorescence? [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166: 8 – 21.
- [5] 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.
- [6] 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 and Forest Meteorology*, 2017, 232: 1 – 9.
- [7] VAN DER TOL C, VERHOEF W, ROSEMA A. A model for chlorophyll fluorescence and photosynthesis at leaf scale [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1): 96 – 105.
- [8] ZHANG Y, GUANTER L, BERRY J A, et al. Model-based analysis of the relationship between sun-induced chlorophyll fluorescence and gross primary production for remote sensing applications [J]. *Remote Sensing of*

- Environment*, 2016, 187: 145 – 155.
- [9] DU S, LIU L, LIU X, et al. Response of canopy solar-induced chlorophyll fluorescence to the absorbed photosynthetically active radiation absorbed by chlorophyll [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 911.
- [10] YANG P, VAN DER TOL C, CAMPBELL P K E, et al. Unraveling the physical and physiological basis for the solar-induced chlorophyll fluorescence and photosynthesis relationship using continuous leaf and canopy measurements of a corn crop [J]. *Biogeosciences*, 2021, 18(2): 441 – 465.
- [11] CHENG Y-B, MIDDLETON E, ZHANG Q, et al. Integrating solar induced fluorescence and the photochemical reflectance index for estimating gross primary production in a cornfield [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(12): 6857 – 6879.
- [12] CASTRO A O, CHEN J, ZANG C S, et al. OCO-2 solar-induced chlorophyll fluorescence variability across ecoregions of the Amazon basin and the extreme drought effects of El Niño (2015–2016) [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1202.
- [13] JIAO W, CHANG Q, WANG L. The Sensitivity of satellite solar - induced chlorophyll fluorescence to meteorological drought [J]. *Earth's Future*, 2019, 7(5): 558 – 573.
- [14] PAGÁN B, MAES W, GENTINE P, et al. Exploring the potential of satellite solar-induced fluorescence to constrain global transpiration estimates [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 413.
- [15] SHEN Q, LIU L, ZHAO W, et al. Relationship of surface soil moisture with solar-induced chlorophyll fluorescence and normalized difference vegetation index in different phenological stages: a case study of Northeast China [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(2): 024039.
- [16] MERRICK, PAU, JORGE, et al. Spatiotemporal patterns and phenology of tropical vegetation solar-induced chlorophyll fluorescence across Brazilian biomes using satellite observations [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(15): 1746.
- [17] PARAZOO N C, BOWMAN K, FRANKENBERG C, et al. Interpreting seasonal changes in the carbon balance of southern Amazonia using measurements of XCO₂ and chlorophyll fluorescence from GOSAT [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(11): 2829 – 2833.
- [18] QUIROS-VARGAS J, SIEGMANN B, DAMM A, et al. Spatial dependency of Solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF)-emitting objects in the footprint of a FLuorescence EXplorer (FLEX) pixel: a SIF-downscaling perspective[C]. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2022: EGU22 – 12671.
- [19] JOINER J, YOSHIDA Y, VASILKOV A, et al. The seasonal cycle of satellite chlorophyll fluorescence observations and its relationship to vegetation phenology and ecosystem atmosphere carbon exchange [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 375 – 391.
- [20] FRANKENBERG C, FISHER J B, WORDEN J, et al. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(17): L17706.
- [21] JOINER J, GUANTER L, LINDSTROT R, et al. Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate-spectral-resolution near-infrared satellite measurements: methodology, simulations, and application to GOME-2 [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(10): 2803 – 2823.
- [22] KÖHLER P, GUANTER L, JOINER J. A linear method for the retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from GOME-2 and SCIAMACHY data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(6): 2589 – 2608.
- [23] 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.
- [24] DU S, LIU L, LIU X, et al. Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from TanSat satellite [J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(22): 1502 – 1512.
- [25] ZHANG Y, JOINER J, ALEMOHAMMAD S H, et al. A global spatially contiguous solar-induced fluorescence (CSIF) dataset using neural networks [J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(19): 5779 – 5800.
- [26] LI X, XIAO J. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 517.
- [27] YU L, WEN J, CHANG C Y, et al. High - Resolution global contiguous SIF of OCO - 2 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1449 – 1458.
- [28] WEN J, KÖHLER P, DUVEILLER G, et al. A framework for harmonizing multiple satellite instruments to generate a long-term global high spatial-resolution solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111644.
- [29] DUVEILLER G, FILIPPONI F, WALTHER S, et al. A spatially downscaled sun-induced fluorescence global product for enhanced monitoring of vegetation productivity [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(2): 1101 – 1116.
- [30] JOINER J, YOSHIDA Y, VASILKOV A P, et al. Filling-in of far-red and near-Infrared solar lines by terrestrial and atmospheric effects: simulations and space-based observations from SCIAMACHY and GOSAT [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussion*

- sions, 2012, 5(1): 163 – 210.
- [31] WEI J, TANG X, GU Q, et al. Using solar-induced chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 to predict autumn crop production in China [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(14): 1715.
- [32] 杨凤珠, 王震山, 张乾, 等. 多源日光诱导叶绿素荧光产品在中国地区的一致性研究[J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(1): 125 – 136.
- [33] MALHI Y. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation [J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100(1): 65 – 75.
- [34] JATOI M T, LAN G, WU Z, et al. Comparison of soil microbial composition and diversity between mixed and monoculture rubber plantations in Hainan Province, China [J]. *Tropical Conservation Science*, 2019(12): 1 – 9.
- [35] LAN G, LI Y, JATOI M T, et al. Change in soil microbial community compositions and diversity following the conversion of tropical forest to rubber plantations in Xishuangbanna, Southwest China [J]. *Tropical Conservation Science*, 2017, 10: e33230.
- [36] LAN G, WU Z, CHEN B, et al. Species Diversity in a Naturally Managed Rubber Plantation in Hainan Island, South China [J]. *Tropical Conservation Science*, 2017, 10: e12427.
- [37] SODHI N S, KOH L P, BROOK B W, et al. Southeast Asian biodiversity: an impending disaster [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2004, 19(12): 654 – 660.
- [38] 祁栋灵, 兰国玉, 陈帮乾, 等. 橡胶林生态系统生态功能述评[J]. *生物学杂志*, 2021, 38(1): 102 – 105.
- [39] 吴梅花, 王利堂, 林之盼, 等. 儋州林场公益林生态系统服务功能价值评估[J]. *热带林业*, 2021, 49(4): 57 – 60.
- [40] 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(3): 47 – 51.
- [41] 耿思文, 吴志祥, 杨川. 海南儋州地区橡胶林生态系统水汽通量变化特征及其对环境因子的响应[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(1): 77 – 85.
- [42] LI X, LIANG S, YU G, et al. Estimation of gross primary production over the terrestrial ecosystems in China [J]. *Ecological Modelling*, 2013, 261-262: 80 – 92.
- [43] YUAN W, LIU S, ZHOU G, et al. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(3/4): 189 – 207.
- [44] CUI W, XIONG Q, ZHENG Y, et al. A study on the vulnerability of the gross primary production of rubber plantations to regional short-term flash drought over Hainan Island [J]. *Forests*, 2022, 13(6): 893.
- [45] WOOD J D, GRIFFIS T J, BAKER J M, et al. Multiscale analyses of solar-induced fluorescence and gross primary production [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 533 – 541.
- [46] 黎玉芳, 李志鸿. 桂林地区气温与降水量的时间序列预测模型[J]. *广西科学*, 2013, 20(2): 107 – 110.
- [47] 李广洋, 寇卫利, 吴志祥, 等. 近 30 年海南岛橡胶林时空变化分析[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2022, 47(1): 189 – 198.
- [48] GENTINE P, ALEMOHAMMAD S H. Reconstructed solar-induced fluorescence: A machine learning vegetation product based on MODIS surface reflectance to reproduce GOME-2 solar-induced fluorescence [J]. *Geophysical research letters*, 2018, 45(7): 3136 – 3146.
- [49] SAMANTA A, GANGULY S, HASHIMOTO H, et al. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(5): 1 – 5.
- [50] DUVEILLER G, CESCATTI A. Spatially downscaling sun-induced chlorophyll fluorescence leads to an improved temporal correlation with gross primary productivity [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 182: 72 – 89.
- [51] 孙忠秋, 高显连, 杜珊珊, 等. 全球日光诱导叶绿素荧光卫星遥感产品研究进展与展望[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(5): 1044 – 1056.

Analysis of different satellite-based SIF products of the rubber plantations in Hainan Island and their effects on GPP estimate

AN Yinghe¹, ZHANG Runqing¹, LIU Wenjie^{1,2}, WANG Peng¹, ZHANG Jie¹, WU Lan¹, SUN Zhongyi¹
(1. School of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou, Hainan 570100; 2. Hainan Key Laboratory of Agroforestry Environmental Process and Ecological Regulation, Hainan University, Haikou, Hainan 570100, China)

Abstract: An attempt was made to explore the effect of different solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) products on the estimate of the gross primary production (GPP) of rubber plantations in Hainan Island. The light use efficiency (LUE) model based on localized eddy covariance flux data was used to estimate the GPP of the rubber plantations in Hainan Island. The LUE was used as a reference, and the differences of SIF products retrieved from remote sensing data of 5 satellites (CSIF, GOSIF, SIF_{OCO2-1696}, SIF₀₀₅, SIF_{LUE}) were compared by using spatiotemporal consistency analysis. The effects of the 5 satellite-based SIF products on GPP estimates of rubber plantations in Hainan Island were evaluated. The results show that CSIF and GOSIF have better applicability in the analysis of spatiotemporal changes, but CSIF is not suitable for long-term trend analysis, and that both the CSIF and GOSIF have a high spatiotemporal consistency with GPP estimates of the rubber plantations in Hainan Island. The SIF₀₀₅ followed the CSIF and GOSIF, while the data of the SIF_{OCO2-1696} product in Hainan Island in the past 20 years were seriously lost and the data of the SIF_{LUE} product in the southern part of Hainan Island were also missed, indicated that the last two SIF products are not representative. All the results showed that the CSIF and GOSIF are better in GPP estimate of rubber plantations in Hainan Island, followed by the SIF₀₀₅, while the SIF_{OCO2-1696} and SIF_{LUE} are relatively unsuitable for GPP estimate.

Keywords: solar-induced chlorophyll fluorescence; remote sensing products; spatiotemporal consistency; rubber plantation ecosystem; Hainan Island

(责任编辑: 钟云芳)