

引用格式: Sun Zhongqiu, Gao Xianlian, Du Shanshan, *et al.* Research Progress and Prospective of Global Satellite-based Solar-induced Chlorophyll Fluorescence Products [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 1044-1056. [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.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.1044

全球日光诱导叶绿素荧光卫星遥感产品研究 进展与展望

孙忠秋¹, 高显连¹, 杜珊珊², 刘新杰²

(1. 国家林业和草原局调查规划设计院卫星处, 北京 100714;

2. 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室, 北京 100094)

摘要: 卫星反演的日光诱导叶绿素荧光(Solar-Induced chlorophyll Fluorescence, SIF)是全球植被生产力遥感监测的理想工具。现有的诸多大气成分探测卫星的高光谱载荷可以满足卫星平台SIF遥感探测的需求, 中国和欧洲也计划发射专门的SIF卫星探测器。国内外学者生产了一系列全球SIF卫星遥感产品, 并开展了SIF产品时空尺度扩展研究, 为SIF应用研究提供了丰富的数据源, 但现有的全球SIF产品仍然存在诸多局限性。系统梳理了现有和计划发射的SIF卫星载荷、目前公开发布的SIF卫星遥感产品、以及SIF时空尺度扩展产品, 并从应用需求的角度出发, 总结了现有全球SIF产品存在的问题和后续SIF卫星探测计划的发展方向, 为现有SIF卫星产品的应用以及未来SIF探测卫星载荷方案的设计提供参考。

关键词: 日光诱导叶绿素荧光; 卫星产品; 尺度扩展; 研究进展

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)05-1044-13

1 引言

日光诱导叶绿素荧光(Solar-Induced chlorophyll Fluorescence, SIF)遥感是近十年来植被遥感领域最亮点的研究前沿之一。叶绿素荧光是植物光合作用过程中吸收光能后, 以较长波长重新释放能量的一种形式, 可以直接反映光合作用光反应过程中的电子传递速率, 而电子传递速率又受光合作用碳反应过程速率的调制^[1], 因此, 叶绿素荧光与整个光合作用密切相关, 是光合作用的理想探针^[2-3]。

近年来越来越多的理论和实验研究结果表明, 卫星反演的SIF能够为全球尺度的植被初级生产力估算提供一种全新的测量方式, 估算精度显著优于

传统反射率植被指数方法和碳循环模型模拟方法^[4-6]。因此, 卫星遥感平台探测的SIF信号可以作为全球植被光合作用监测以及全球碳源汇估算等研究的有效数据源, 具有重要的科学意义和应用价值。鉴于此, 欧空局率先提出的荧光探测计划FLEX经过长达12 a的论证和竞争, 成功入选地球观测计划Earth Explorer 8的任务^[7]; 美国在第二/三代嗅探卫星OCO-2/OCO-3的设计过程中充分考虑了SIF探测的需求^[8]; 我国计划于2021年发射的陆地生态系统碳监测卫星也即将搭载专门为SIF探测设计的高光谱载荷, 有望成为全球第一个入轨的SIF专用探测载荷^[9]。

收稿日期: 2020-07-28; 修订日期: 2021-08-27

基金项目: 国家重点研发计划项目“粮食作物生长监测诊断与精确栽培技术”(2016YFD0300601), 国家林草局自主研发计划项目“陆地碳卫星超光谱成像仪端对端仿真平台研制”(LC-1-11), 国家自然科学基金项目“反射率与叶绿素荧光遥感协同的冬小麦条锈病早期诊断研究”(41871239)。

作者简介: 孙忠秋(1987—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 高级工程师, 主要从事林业信息技术及林业遥感应用研究。

E-mail: qiuqiu8708@163.com

通讯作者: 刘新杰(1989—), 男, 山东聊城人, 博士, 副研究员, 主要从事植被定量遥感研究。E-mail: liuxj@radi.ac.cn

与植被的反射辐亮度信号相比,SIF信号十分微弱,仅有入射辐射的1%量级。为了将微弱的SIF信号分离出来,需要利用太阳或大气吸收波段,因此对传感器的光谱分辨率和信噪比要求极高^[10]。目前尚无专门的SIF遥感卫星,但国内外若干大气成分探测卫星搭载的高光谱载荷具有SIF探测的潜力。基于该类卫星遥感数据,国内外学者开展了一系列研究,生产并发布了诸多全球SIF卫星遥感产品,并在植被生态遥感研究中得到了广泛应用^[8-9,11-15]。但是,由于SIF遥感反演对数据的光谱分辨率要求极高,现有能够满足SIF反演需求的卫星载荷均为大气探测载荷,由于技术条件的限制以及大气探测需求的特点,该类卫星数据空间分辨率都较为粗糙。针对这一问题,国内外学者开展了相关SIF产品的时空尺度扩展研究,生产和发布了一系列基于多源卫星数据和机器学习、光能利用率模型等方法的SIF时空尺度扩展产品,在一定程度上提升了SIF卫星遥感产品的应用潜力^[16-23]。

但是,上述SIF卫星遥感产品和时空扩展产品在反演算法、反演波段、时空分辨率、时间覆盖范围等方面存在诸多差异,特别是SIF时空扩展产品,由于各产品所采用的算法和解释变量等存在差异,其最终结果所代表的物理和生理意义也存在差异。这些问题对SIF产品的应用带来了一定的困扰。此外,受卫星传感器硬件指标、SIF反演算法、SIF时空扩展算法等因素的制约,现有的SIF产品性能与应用需求之间还存在较大的鸿沟。

针对上述问题,首先简要介绍了目前主流的SIF卫星遥感反演算法,然后系统梳理了现有和计划发射的SIF卫星载荷、目前公开发布的SIF卫星遥感产品以及SIF时空尺度扩展产品,分析了各产品的特点。在此基础上,从应用需求角度出发,总结了现有全球SIF产品存在的问题和后续SIF卫星探测计划的发展方向。该研究可为现有SIF卫星产品的应用以及未来SIF探测卫星载荷方案的设计提供参考。

2 SIF卫星遥感反演原理与算法

2.1 SIF遥感反演的基本原理

遥感观测的植被冠层上行辐亮度信号中,既包括植被反射辐射信号,也包括叶绿素荧光发射信号。自然条件下的日光诱导叶绿素荧光信号十分微弱,所以难以直接探测,需要利用太阳光谱中的

吸收波段(入射和反射辐亮度较小,荧光贡献相对较大)和一定的数学方法实现叶绿素荧光信号的提取^[2,10]。

在到达地表的太阳辐射光谱中,存在许多由于太阳或地球大气吸收带来的“暗线”。由太阳大气对特定波长辐射的吸收产生的暗线称为“夫琅禾费暗线”,吸收宽度通常在0.1 nm以下;而地球大气(氧气、水汽等)的吸收波段一般相对较宽,约为1~10 nm量级,常用于荧光反演的地球大气吸收波段主要包括687 nm附近的O₂-B波段和760 nm附近的O₂-A波段。由于叶绿素荧光是植物主动发射的辐射信号,会将冠层上行辐亮度光谱中太阳夫琅禾费暗线或地球大气吸收波段的吸收“井”产生一定的填充作用(图1),通过比较太阳入射光谱和植被反射光谱中某个吸收波段吸收深度的差异,即可实现对叶绿素荧光强度的估算。这一原理被称为“夫琅禾费暗线填充原理”,是目前主流叶绿素荧光遥感反演算法的基本原理^[24]。值得注意的是,只有太阳大气吸收产生的暗线才称为“夫琅禾费暗线”,但在叶绿素荧光遥感反演研究中所说的“夫琅禾费暗线填充原理”一般也包含利用地球大气吸收波段进行荧光反演的方法。

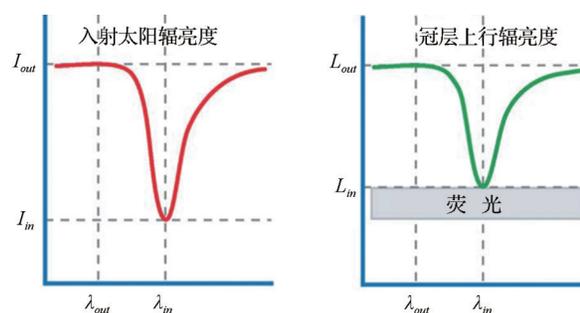


图1 叶绿素荧光反演的夫琅和费暗线填充原理示意图^[10]

Fig.1 Diagram of Fraunhofer dark line filling for SIF inversion^[10]

2.2 全物理方法的SIF卫星遥感反演

全物理方法的SIF卫星遥感反演基于大气辐射传输方程,可分为传统的物理模型算法和简化的物理模型算法。传统的物理模型算法主要基于大气吸收线位置(如O₂-A和O₂-B吸收线),利用现有的大气辐射传输模型和辅助的气象资料构建大气参数查找表,定量化模拟大气辐射传输参数,将大气层顶传感器接收到的辐亮度信号转化为植被冠层接收到的辐亮度信号,从而将卫星平台的SIF反演转化为地表植被冠层的SIF反演问题,最后利用地

面平台常用的SIF反演方法进行SIF的解算工作,如FLD系列算法^[25-26]、SFM算法^[27]等。SFM算法被选为ESA的FLEX卫星计划的标准SIF反演算法^[28]。相对于FLD类算法,SFM算法对噪声的敏感性更低,但对大气辐射传输过程的要求较高,因此需要更加严密的大气校正过程。

简化的物理模型算法对于卫星遥感数据的光谱分辨率要求极高,通常需要小于0.1 nm,利用不受地球大气吸收影响的一条或几条太阳夫琅禾费暗线的拟合窗口,在拟合窗口范围内忽略大气吸收的影响,并将大气散射和地表反射视为连续且平滑的光谱贡献,利用多项式函数将其表征为波长的函数,最后直接采用最小二乘算法解算SIF信号^[11,29]。该类算法的优势在于无需考虑大气吸收的影响,计算简单;但需要同步的太阳辐射光谱且只适用于超高光谱分辨率的卫星遥感数据,同时对于噪声比较敏感,反演结果具有很大的不确定性^[30]。

2.3 数据驱动的SIF卫星遥感反演

数据驱动的SIF卫星反演算法的优势在于可以避免严密的大气辐射传输建模的过程,由光谱数据本身的特性出发,利用简单的数学统计方法表征光谱的结构信息。根据卫星观测数据光谱分辨率的不同,数据驱动算法的SIF反演所采用的反演拟合窗口和方法有所不同,反演过程中的参数设置也需要根据选取的拟合窗口大小而改变。针对具有超高光谱分辨率(FWHM~0.01 nm数量级)的卫星遥感数据而言,如GOSAT、OCO-2、OCO-3和TanSat卫星等,可以利用包含一条或几条太阳夫琅禾费暗线的反演拟合窗口(常用的SIF反演波段为Fe和KI太阳夫琅禾费暗线)进行SIF的反演^[31,34]。针对这类卫星遥感数据,由于选取的拟合窗口较窄,通常只有几纳米且只包含不受地球大气吸收影响的太阳夫琅禾费暗线,如图2(a)所示。在选定的较窄的拟合窗口范围内,假定地表反射的贡献为平滑光谱,且忽略大气吸收对SIF的影响,基于非荧光地表相似的光谱结构特征将大气辐射传输特征表示为基向量的线性组合,则可得到简化后的前向模型:

$$L_{TOA}(\omega_i, F_s) = \sum_{i=1}^{n_v} \omega_i v_i + F_s \cdot I \quad (1)$$

其中: L_{TOA} 为大气层顶接收的辐亮度光谱, n_v 为选取的基向量的个数, v_i 为选取参与运算的基向量, ω_i 为基向量的系数, F_s 为待求波段的SIF信号, I 为单位向量。

针对光谱分辨率在0.1 nm数量级的传感器来

说,如GOME、GOME-2、SCIAMACHY和TROPOMI等,只能探测到有限的太阳夫琅禾费暗线,且吸收线的深度较浅,较窄的拟合窗口无法精确地将SIF信号与地表反射信号分离,需要增大拟合窗口的宽度。针对这类卫星遥感数据,如图2(b)所示,处于红边位置的窗口波段包含多条太阳夫琅禾费暗线和地球大气和水汽吸收线(常用的SIF反演波段为740 nm附近的峰值波段),成为了这类卫星传感器首选的反演拟合窗口^[13-15,32,35]。在拟合窗口范围内,将传感器接收到的辐亮度信号表征为光谱平滑项(植被叶绿素荧光和地表反射的贡献)和光谱非平滑项(大气吸收的贡献)的组合^[31],其中,利用波长的低阶多项式函数表示平滑的低频变化信息;利用数学统计方法得到的基向量重构高频变化的光谱形状信息^[13,32]。同时,假定在一定的拟合窗口范围内,SIF光谱形状服从高斯分布,并利用上行透过率与双向透过率的角度相关性,得到估算的双向透过率,则可以得到线性化的前向模型:

$$L_{TOA}(\alpha, \beta, F_s) = I_{sol} \cdot \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \sum_{i=0}^{n_p} (\alpha_i \cdot \lambda^i) \cdot \sum_{j=1}^{n_{pc}} (\beta_j \cdot PC_j) + F_s \cdot h_f \cdot T_{\uparrow}^c \quad (2)$$

其中: I_{sol} 为大气层顶的太阳入射辐照度, μ_0 为太阳天顶角的余弦值, PC_j 为基向量, α_i 和 β_j 分别为多项式和基向量的系数, n_p 和 n_{pc} 分别为多项式的阶数和基向量的个数, h_f 为特定的SIF光谱形状函数, T_{\uparrow}^c 为估算的上行透过率。

数据驱动的SIF反演算法避免了严密的大气校正过程从而简化了算法,但训练样本给SIF的反演精度带来很大的不确定性,且SIF反演算法严重依赖于SIF反演中的不同参数设置和选取。

3 具备SIF探测能力的卫星遥感数据来源与产品

3.1 现有的SIF卫星遥感数据源与全球产品

根据前文所述,SIF反演需要极高的光谱分辨率,目前还没有专门为SIF观测设计的星载传感器在轨运行。但是,很多大气成分探测卫星覆盖了SIF发射波段,而且光谱分辨率能够满足SIF反演的需求。本实验将现有的具备SIF探测潜力的卫星传感器总结如表1所示。

现有SIF卫星遥感数据源覆盖的时间范围如图3所示。可以看出,现有具备SIF探测能力的卫星数据源覆盖了1995年至今的时间范围。近十年

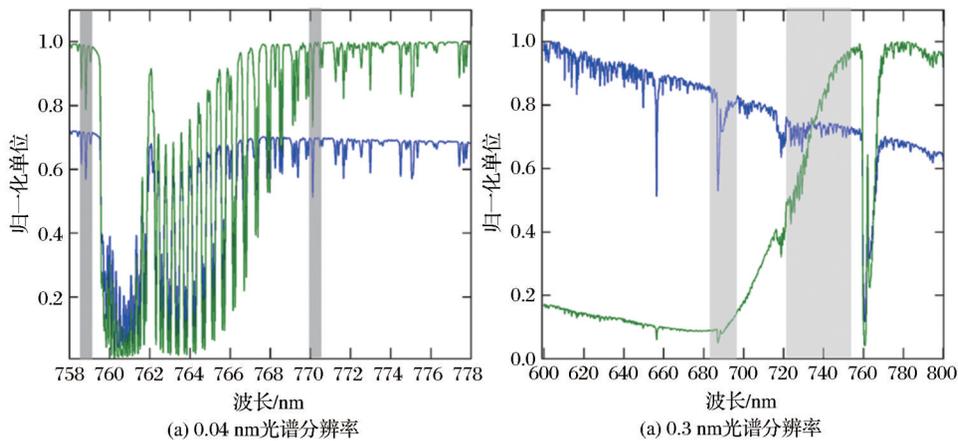


图 2 0.04 nm 和 0.3 nm 光谱分辨率条件下常用的卫星 SIF 遥感反演窗口

Fig.2 Commonly used inversion window of satellite SIF remote sensing under spectral resolution 0.04 nm and 0.3 nm

表 1 目前具备荧光探测潜力的主要星载传感器

Table 1 The basic circumstances of 9 weather stations of Qilian Mountain area

卫星/传感器	光谱分辨率 /nm	可用波段范围 /nm	空间采样 方式	过赤道 时间	空间分辨率 /km	信噪比	发射时间	参考 文献
ERS-2 GOME	0.33	595~793	连续	10:30	40×320		1995.4	[36]
ENVISAT SCIAMACHY	0.48	650~790	连续	10:00	30×240	2 800	2002.3	[37]
MetOp-A/B/C GOME-2	0.5	650~790	连续	9:30	40×80 40×40	2 000	2007.1/2012.9/ 2018.11	[38]
GOSAT./GOSAT2 TANSO-FTS	0.025	755~775	离散点	13:00	10.5/9.7	300	2009.1/2018.10	[39]
OCO-2/ OCO-3	0.042	757~775	窄条带	13:30	1.3×2.25	500	2014.7/2019.5	[8]
TanSat	0.044	758~778	窄条带	13:30	2	360	2016.12	[34]
Sentinel-5P TROPOMI	0.38	675~775	连续	13:30	3.5×7	2 660	2017.10	[15]

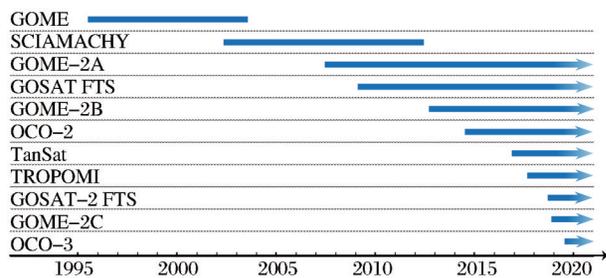


图 3 现有 SIF 卫星遥感数据源覆盖的时间范围

Fig.3 Time range of existing SIF satellite remote sensing data sources

来,具备 SIF 探测能力的卫星传感器数量增长迅速,为 SIF 卫星遥感与应用提供了丰富的数据源,极大地促进了 SIF 遥感研究的发展。但是,由于不同传感器空间分辨率、光谱特性等方面的差异,多源 SIF 卫星遥感产品的协同应用、长时序应用等还存在诸多困难。

利用上述卫星数据,国内外学者开展了大量的 SIF 卫星遥感反演与全球产品生产研究工作,本研究将现有公开发布的全球 SIF 遥感产品汇总如表 2 所示。

GOSAT 搭载的近红外傅立叶光谱仪(TANSO-FTS)在 755~775 nm 区域,信噪比 SNR 设置为 300,具有很高的光谱分辨率(约 0.025 nm),利用 757 nm 和 770 nm 这两个窄光谱窗口区的太阳夫琅禾费暗线可以提取荧光信号。但是 GOSAT 实施点观测,不能提供空间连续的地表覆盖数据,空间分辨率 10.5 km。Joiner 等^[11]利用 GOSAT 数据 770 nm 附近 KI 吸收线生产了首幅全球 SIF 遥感产品;Frankenberg 等^[29]和 Guanter 等^[31]也分别独立地利用光谱拟合以及奇异值分解的方法反演得到太阳夫琅禾费暗线 757 nm 和 770 nm 处的全球 GOSAT 荧光产品。

搭载在欧洲 ERS-2 卫星的全球臭氧监测传感器(GOME)具有 4 个探测通道,光谱范围在 240~790 nm,其中第四通道可以覆盖红到近红外波段(650~790 nm),光谱分辨率为 0.33 nm,能够满足 SIF 反演的需求。与 GOSAT 不同,GOME 可实现全球连续覆盖,但空间分辨率较低(40 km×320 km)。搭载在 MetOp-A/B 卫星的第二代 GOME 传感器

表2 目前具备荧光探测潜力的主要星载传感器现有公开发布的全球SIF卫星遥感产品

Table 2 The basic circumstances of 9 weather stations of Qilian Mountain area

产品名称	时空属性	反演算法、反演窗口和波段	SIF产品波长位置	产品下载地址	参考文献
NASA GOME-F	GOME: 1995~2003; GOME-2: 2007~2019; 2级:原始轨道日值 3级:0.5°格网月均值	主成分分析 712~747 nm	740 nm	https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/MetOp/GOME_F/	[13,32,40]
NASA SCIAMACHY_F	2003~2012 2级:原始轨道日值 3级:1°格网月均值	主成分分析 712~747 nm	734 nm	https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Envisat/SCIAMACHY_F/	[13,32,40]
GFZ GOME-2	2007.1~2016.1 非网格化:原始轨道日值 网格化:0.5°格网日值	主成分分析 735~758 nm	740 nm	ftp://DOIdata.gfz-potsdam.de/open/GlobFluo/GOME-2	[14]
GFZ SCIAMACHY	2002.8~2012.3 非网格化:原始轨道日值 网格化:1.5°格网日值	主成分分析 735~758 nm	740 nm	ftp://DOIdata.gfz-potsdam.de/open/GlobFluo/SCIAMACHY	[14]
KNMI GOME-2 SIFTER	2007~2018 非网格化:原始轨道日值; 网格化:0.5°格网月均值	主成分分析 712~783 nm	737 nm	http://www.temis.nl/surface/sif.html	[41]
OCO-2	2014.9至今 原始轨道日值	光谱拟合 758~759 nm 769.8~770.4 nm	757 nm、771 nm	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OCO2_L2_Lite_SIF_8r/summary	[8]
OCO-3	2019.8至今 原始轨道日值	光谱拟合 758.1~759.2 nm 769.6~770.3 nm	757 nm、771 nm	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OCO3_L2_Lite_FP_EarlyR/summary	[42]
TanSat	2017.3至今 原始轨道日值	奇异值分解 757.4~759.3 nm 769.5~770.3 nm	757 nm、771 nm	http://www.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=3695497&.docId=4248	[34]
Caltech TROPOMI	2018至今 非网格化:原始轨道日值 网格化:0.2°格网日值	主成分分析 743~758 nm 663~685.3 nm	683 nm 740 nm	ftp://fluo.gps.caltech.edu/data/tropomi/	[15,43]
TROPOSIF	2018至今 非网格化:原始轨道日值	主成分分析 743~758 nm 735~758 nm	740 nm	https://s5p-troposif.noveltis.fr/data-access/	[44]

(GOME-2)与GOME光谱特性相似,光谱分辨率约为0.5 nm,40 km×80 km,从2013年7月起MetOp-A的空间分辨率升为40 km×40 km。GOME/GOME-2数据覆盖了1995年至今的时间段,是目前可用于SIF反演时序积累最长的卫星数据来源。Joiner等^[13,32,40]利用GOME/GOME-2数据生产了1995年以来的全球近红外波段SIF产品,是目前时间序列最长的SIF遥感产品,但Parazoo等^[36]也指出,由于两代传感器的差异以及传感器随时间的衰减,该SIF产品不能直接用于时序分析。Köhler等^[14]也生产了基于GOME-2数据的近红外波段SIF产品。此外,Wolanin等^[43]、Joiner等^[13]还利用GOME-2数据生产了红光波段全球SIF产品,

但产品目前未公开共享。

ENVISAT/SCIAMACHY的载荷设置与GOME-2相似,光谱范围在650~790 nm,光谱分辨率为0.48 nm,空间分辨率更低(30 km×240 km),但是具有较高的信噪比SNR(2 800)。但由于ENVISAT卫星于2012年失联,SCIAMACHY数据也随之终止。Joiner等^[13,32,40]、Köhler等^[14]、Wolanin等^[45]均利用SCIAMACHY数据生产了近红外和(或)红光波段的SIF产品。此外,由于SCIAMACHY具有较高的信噪比,Joiner等^[12]还成功反演了866 nm附近Ca II吸收线处的SIF弱信号。

上述卫星传感器仅能够提供数十公里至上百公里量级空间分辨率的数据,难以满足生态系统尺

度的SIF探测需求。2014年以来,NASA OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2)、NASA OCO-3 (Orbiting Carbon Observatory-3)、中国碳卫星 (TanSat)和哨兵5号先导卫星 (Sentinel-5 Precursor, S5P) TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument)为SIF应用提供了新机遇。

OCO-2发射于2014年7月2日,正式加入轨道列车(A-Train),与其他5颗国际地球观测卫星组成编队。OCO-2传感器光谱测量装置与GOSAT很相似,在757~775 nm光谱区域具有很高的光谱分辨率,半高宽(FWHM)为0.042 nm。但是OCO-2的数据密度比GOSAT提高了100倍(比GOME-2增加8倍),具有更高的空间分辨率,足迹大小为1.3 km×2.25 km。同样地,OCO-2的高空间和光谱分辨率,使其不得不以牺牲空间连续性为代价,OCO-2的8个独立足迹覆盖了10.3 km的全幅宽。Frankenberg等^[8]利用IMAP-DOAS算法生产了该卫星在757 nm和771 nm处的全球SIF产品。2019年5月,OCO-2的备份载荷OCO-3成功发射并被安装在国际空间站上。OCO-3与OCO-2光谱特性相同,但其对地采样方式有所差异,借助指向镜的旋转,OCO-3可以实现特定区域的精细观测;而且由于国际空间站的轨道特点,OCO-3可以实现在中纬度地区更高的采样密度。

我国于2016年12月22日发射了首颗二氧化碳观测科学实验卫星“TanSat卫星”(TanSat),使得中国成为继日本GOSAT、美国OCO-2卫星之后全球第3个可提供温室气体卫星遥感数据的国家。TanSat与OCO-2卫星指标设计类似,也具备SIF探测潜力。Du等^[34]利用数据驱动算法,生产了758 nm和771 nm处的全球SIF产品,这也是首个基于国产卫星数据的全球陆表遥感产品。

哨兵5号先导卫星(Sentinel-5P)是欧盟“哥白尼对地观测计划”的一颗大气监测卫星,TROPOMI是搭载在Sentinel-5P上的唯一传感器,空间分辨率为3.5 km×7 km,每天可覆盖全球一次;在675~775 nm的波谱范围内,光谱分辨率为0.38 nm。Köhler等^[15,43]利用数据驱动算法生产了TROPOMI数据近红外波段和红光波段全球SIF产品,尽管时序积累较短,但是目前时空分辨率综合指标最优的全球SIF遥感产品。

由于GOSAT数据信噪比较低,且空间采样稀疏,其SIF产品质量较差,目前已很少被使用,而且

目前没有公开发布的GOSAT卫星SIF产品,因此未列入表2中。而对于具有相似光谱分辨率水平的OCO-2、OCO-3和TanSat卫星遥感SIF产品,高空间分辨率条件使得该类SIF产品具有较大的应用价值,可用于生态系统尺度的植被光合生产力估算和农作物胁迫监测等应用研究。然而,该类SIF卫星遥感产品受限于空间采样稀疏和全球空间覆盖能力,难以实现大尺度范围的应用需求。SCIAMACHY、GOME和GOME-2卫星遥感SIF产品的高时序空间覆盖能力使得SIF产品在全球尺度范围的光合生产力估算和环境胁迫监测成为了可能,但是其较粗的空间分辨率条件同样限制了这类SIF产品在精细尺度的应用。在此背景下,由于TROPOMI卫星SIF遥感产品同时具备高空间分辨率和高空间覆盖条件成为了目前最具有应用潜力的SIF卫星遥感产品,可同时实现在全球尺度和生态系统的小尺度范围的植被光合生产力估算和环境胁迫等研究。

3.2 未来具备SIF探测潜力的卫星计划

目前,虽然还没有专门为SIF观测设计的卫星载荷在轨运行,但未来几年也即将发射专门用于SIF探测设计的卫星传感器,如表3所示。欧空局的FLEX计划是全球首个专门为SIF卫星观测设计的地球观测计划。2015年9月,经过长达12年的预研和评选,FLEX在32个竞争性项目中胜出,正式入选欧空局地球观测计划Earth Explorer 8任务。FLEX搭载的FLORIS (FLuorescence Imaging Spectrometer)传感器具备300 m×300 m的空间分辨率,重访周期为27 d,覆盖500~780 nm的波段范围,可以支持红光波段、近红外波段的SIF反演,以及叶绿素、光化学植被指数(PRI)等配套植被参数的反演^[7,46]。FLEX卫星计划于2022年发射,将与Sentinel-3卫星伴飞,从而实现大气参数等辅助信息的同步获取。

鉴于SIF的重要科学意义,我国正在研发的陆地生态系统碳卫星(简称陆碳卫星,TECIS-1)也将搭载一个叶绿素荧光成像光谱仪(SIFIS)。SIFIS覆盖670~780 nm的光谱范围,光谱分辨率0.3 nm,空间分辨率2 km,可以满足红光波段和近红外波段的SIF反演需求^[9,47]。陆碳卫星计划于2021年发射,有望成为第一颗搭载专门荧光观测载荷的在轨卫星。

此外,近期计划发射的大气成分探测卫星也可为SIF卫星遥感与应用研究提供新的数据源。特别是美国和欧洲计划发射的若干地球静止轨道卫星,

将可大大提高区域尺度 SIF 卫星观测的时间频率,为 SIF 研究提供新的契机。

美国俄克拉荷马大学和 NASA 合作的地球同步轨道碳循环监测卫星 GeoCarb 计划于 2022 年发射,其搭载的传感器与 OCO-2 相似,并针对地球同步轨道特点对二氧化碳、一氧化碳、甲烷和 SIF 观测进行了优化,空间分辨率约 3 km,通过凝视扫描的方式,可对美洲大部分地区提供高时间分辨率的观测资料^[48]。

美国史密森天体物理观测台(Smithsonian Astrophysical Observatory, SAO)和 NASA 合作的大气污染卫星监测任务计划于 2022 年发射地球同步卫

星 TEMPO^[49]。TEMPO 卫星传感器覆盖 290~490 nm 和 540~740 nm 波段范围,光谱分辨率为 0.6 nm,北美地区空间分辨率约为 2.1 km×4.5 km (36.5°N, 100°W 处),可以实现北美地区每小时的高频率观测,将成为日尺度 SIF 动态观测的理想数据源。

欧空局计划于 2021 年前后发射的地球静止轨道卫星 Sentinel-4,将覆盖紫外—可见光—近红外波段,其中 750~770 nm 的近红外波段光谱分辨率为 0.12 nm,空间分辨率约 8 km,将可在提供欧洲地区每日频率的观测数据^[50]。此外,欧空局 Sentinel-5 卫星将搭载与 TROPOMI 相似的传感器,计划于 2021 年前后发射。

表 3 未来具备荧光探测潜力的主要星载传感器

Table 3 The basic circumstances of 9 weather stations of Qilian Mountain area

卫星/传感器	光谱分辨率 /nm	可用波段范围 /nm	过赤道时间	空间分辨率 /km	信噪比	发射时间	参考文献
FLEX FLORIS	0.3~2.0	500~780	10:00	0.3×0.3	300~1 200	2022	[46]
TECIS-1 SIFIS	0.3	670~780	10:30	2×2	>300	2021	[47]
SESGS GeoCarb	0.05	758~772	静止轨道	10×10	>200	2022	[48]
TEMPO	0.6	540~740	静止轨道	2.5×5	-	2022	[49]
Sentinel-4 UVN	0.12	750~775	静止轨道	8×8	>500	2021	[50]

4 全球 SIF 时空尺度扩展产品研究进展

尽管目前已有多种全球 SIF 卫星遥感产品,但现有产品均来自大气成分探测卫星传感器,或空间分辨率较粗(例如 GOME-2、SCIAMACHY SIF 产品),或幅宽较窄、轨道间隔较大(例如 OCO-2、OCO-3、TanSat SIF 产品)。最新的 TROPOMI SIF 产品虽然兼具空间分辨率较高、全球连续覆盖、重访周期短的优势,但因发射较晚,缺乏长时序数据积累。因此,现有的全球 SIF 卫星遥感产品还难以满足陆地生态系统遥感监测应用中对长时序、高时空分辨率的需求。

为了填补现有 SIF 产品特点与生态系统遥感监测应用需求之间的鸿沟,国内外学者开展了一系列全球 SIF 卫星遥感产品的时空尺度扩展研究,通过融合 SIF、反射率以及气象参数等信息,将低空间分辨率、时空不连续的 SIF 遥感产品扩展为具有较高空间分辨率且时空连续的 SIF 产品。现有的全球尺度 0.05°空间分辨率的 SIF 扩展产品汇总如表 4。

4.1 OCO-2/TanSat SIF 时空扩展产品

尽管 OCO-2 和 TanSat 卫星具有 1~2 km 级的空间分辨率,但其扫描幅宽仅 10~20 km 左右,且条

带间空隙很大,短时间内难以实现全球连续覆盖,无法满足全球 SIF 应用需求。针对这一问题,诸多学者开展了相关研究,构建了 OCO-2 和 TanSat 的 SIF 时空扩展产品。

4.1.1 CSIF 产品

Zhang 等^[19]利用 OCO-2 SIF 产品和 MODIS 前 4 个波段(蓝、绿、红、近红外)反射率数据训练神经网络,生产了全球晴空和全天候两种条件下 0.05°、4 d 分辨率的 SIF 数据产品(CSIF)。由于 MODIS 和 OCO-2 数据幅宽差异较大,为了消除反射率和 SIF 方向性特征的影响,该研究选用了 MCD43C4 方向归一化的地表反射率(Nadir Bidirectional reflectance distribution Adjusted Reflectance, NBAR)数据。由于 SIF 与入射辐射有关,是瞬间变化量,为满足应用需求,需要将其归一化为日值数据。对于晴空条件,太阳入射辐射与太阳天顶角具有良好的线性关系,因此,利用卫星过境时的太阳天顶角余弦值与日平均太阳天顶角余弦值的比值,将瞬时 CSIF(CSIF_{clear-inst})归一化为晴空日值 CSIF(CSIF_{clear-daily});对于全天候条件利用卫星过境时的光合有效辐射(PAR)与 BESS 模型(Breathing Earth System Simulator)模拟的日平均 PAR 比值,将瞬时

表4 现有的0.05度空间分辨率SIF扩展产品

Table 4 The basic circumstances of 9 weather stations of Qilian Mountain area

产品名称	原始SIF数据源	解释变量	数据下载地址	参考文献
CSIF	OCO-2	MODIS 1-4 波段反射率	https://DOI.org/10.6084/m9.figshare.6387494	[19]
$\overline{SIF}_{OCO2_005}$	OCO-2	MODIS 1-7 波段反射率	https://cornell.app.box.com/s/cavtg50y80udb-dirg022gm5whugmth02	[20]
GOSIF	OCO-2	EVI, PAR, VPD, 气温	http://globalecology.unh.edu/	[21]
TanSat SIF 空间扩展产品	TanSat	MODIS 1-4 波段反射率、NDVI、太阳天顶角、气温	https://zenodo.org/record/3884309	[23]
RSIF	GOME-2	MODIS 1-4 波段反射率	https://gentinelab.eee.columbia.edu/content/datasets	[18]
降尺度 GOME2-SIF	GOME-2	NDVI, EVI, NIRv, ET, NDWI, LST	https://DOI.org/10.2905/21935FFC-B797-4BEE-94DA-8FEC85B3F9E1	[16-17]
\overline{SIF}_{005}	SCIAMACHY, GOME-2	MODIS 1-7 波段反射率	https://cornell.box.com/s/gkp4moy4grvqsus1q5oz7u51c30i7o41	[22]

CSIF 归一化为全天候日值 CSIF ($CSIF_{all-daily}$)。

分析结果表明,晴空瞬时 CSIF ($CSIF_{clear-inst}$) 与 OCO-2 原始 SIF 产品对不同生态系统类型均具有良好的-一致性。全天候平均 CSIF ($CSIF_{all-daily}$) 数据集表现出强大的空间、季节和年际动态,与 OCO-2 和 GOME-2 的 SIF 日值产品一致。但是,相对于 OCO-2 或 GOME-2 原始 SIF 卫星遥感产品,CSIF 产品缺乏荧光产率信息,难以体现 SIF 对光合作用生理状态的响应,因此该产品缺乏严格的生理信息和物理意义。

4.1.2 $\overline{SIF}_{OCO2_005}$ 产品

Yu 等^[20]利用生理条件约束的机器学习方法,基于 MODIS 反射率数据,生产了 0.05°、16 d 分辨率的全球 OCO-2 SIF 扩展产品。

本研究与 Zhang 等^[19]研究的不同之处在于,本研究所使用的人工神经网络模型是通过对生物群系和时间进行分层训练得到的。SIF 包含有关植被的生理和结构信息,而反射率则主要表征结构特性^[51]。分生物群系进行训练可以捕获不同生物群系之间植被生理特征的差异;分时间进行训练可以捕获不同时间 SIF 与反射率关系的差异(例如 SIF 与反射率对胁迫响应的-时间差异)。因此,该模型可以更加准确地刻画 SIF 和反射率之间的动态关系,从而在一定程度上保留 SIF 扩展产品中的植物生理特性信息。

验证结果表明, $\overline{SIF}_{OCO2_005}$ 产品与航空高光谱成像仪观测的 SIF 数据高度一致。通过时间和生物群系的-分层训练,可以改进生长季的农田、落叶温带和针叶林的 SIF 低估现象和秋季针叶林的 SIF 高估现象,并可提高对于旱影响的敏感性。

4.1.3 GOSIF 产品

Li 和 Xiao^[21]通过分析 SIF 的关键解释变量,利用 OCO-2 SIF 数据,MODIS 数据和 MERRA-2 气象再分析数据,通过 Cubist 回归树方法,构建了 SIF 预测模型,生产了 2000~2018 年的全球 0.05°、8 d 分辨率的 GOSIF 产品。

SIF 由 APAR 和荧光产率 (SIFyield) 共同决定,而 SIFyield 与物种和环境条件等因素有关。因此,该研究考虑了植被条件、气象条件和土地覆盖信息 3 种类型的 SIF 解释变量。利用增强植被指数 (EVI) 来表征植被状况,利用 PAR、大气饱和水汽压差 (VPD) 和气温来表征气象条件。土地覆盖类型作为分类变量,用于测试分物种建模能否提高模型精度。

验证结果表明,利用 EVI、PAR、VPD 和气温 4 个解释变量构建的 SIF 预测模型比基于 MODIS 1~7 波段地表反射率的 SIF 预测模型精度更高,与基于 MODIS 1~7 波段反射率和 3 个气象参数 (PAR、VPD、气温) 的模型精度相当。而土地覆盖类型信息的加入对模型精度改进作用不明显。

4.1.4 TanSat 空间扩展 SIF 产品

Ma 等^[23]以 TanSat SIF 产品为训练样本,利用随机森林方法,生产了基于结构信息和生理信息重建的 TanSat SIF 空间扩展产品。该研究以 MODIS 4 个波段 (蓝、绿、红、近红外) 方向性归一化的地表反射率、归一化植被指数 (NDVI)、太阳天顶角的余弦、GLDAS 气温数据为输入参数,利用太阳角度归一化 (假设卫星有效观测数据均为晴空条件下获取,太阳角度可以代表太阳辐照度信息) 的 TanSat SIF 产品训练了前馈神经网络,生产了 2017~2019

年8月的全球连续的 TanSat 0.05°SIF 产品。分析结果表明,该产品与 TROPOMI SIF 产品具有较好的一致性。

该方法利用反射率和 NDVI 提供植被结构信息,利用气温和入射太阳辐射提供生理信息,但仍不能完全替代荧光产率所代表的光合作用生理信息。

4.2 GOME-2/SCIAMACHY SIF 时空扩展产品

4.2.1 RSIF 产品

Gentine 和 Alemohammad^[18] 以 GOME-2 SIF 产品为训练样本,利用机器学习方法,生产了基于 MODIS 地表反射率重建的 SIF 产品 RSIF。该研究以 Aqua-MODIS 4 个波段(蓝、绿、红、近红外)的地表反射率(重采样到 0.5°空间分辨率)为输入参数,利用 0.5°空间分辨率、太阳角度归一化(假设卫星有效观测数据均为晴空条件下获取,太阳角度可以代表太阳辐照度信息)的 GOME-2 SIF 产品训练了前馈神经网络,从而实现基于 MODIS 反射率的归一化 SIF 估算。在此基础上,乘以入射光合有效辐射信息,即可得到重建的 SIF 产品。

由于 MODIS 地表反射率数据具有远高于 GOME-2 SIF 产品的信噪比,RSIF 比原始 GOME-2 SIF 产品具有更好的视觉效果和更精细的空间分布格局,而且,基于该方法,可实现长时序(2002 年至今)、高空间分辨率(500 m)的 SIF 产品重建。分析结果也表明,在全球尺度上,RSIF 与 GPP 具有良好的相关关系,可以作为 GPP 估算的有效数据源。但是,MODIS 反射率数据仅能代表植物的光合有效辐射吸收比例(fPAR)信息,不能反映荧光产率(SIF yield)所代表的光合作用生理信息。尽管荧光产率相对稳定,但也会受到物种、环境等因素的影响,特别是在胁迫条件下,可以反映植被光合作用生理状态的变化,是 SIF 相对于反射率信息的独特优势。因此,RSIF 所代表的主要是植物吸收的光合有效辐射(APAR)信息。

4.2.2 GOME-2 空间降尺度 SIF 产品(Downscaled-GOME2-SIF)

Duveiller 和 Cescatti^[16] 率先开展了 SIF 卫星遥感产品的空间尺度扩展研究,并生产了空间降尺度 SIF 产品(SIF^{*})。该研究提出了一种基于光能利用率概念的非线性模型。首先,利用重采样到 0.5°分辨率的 MODIS 归一化植被指数(NDVI)、蒸散(ET)和地表温度(LST)产品和 0.5°分辨率的

GOME-2 SIF 产品,针对每个时间步长,在 3×3 像素窗口内独立训练得到 SIF 与 NDVI、ET、LST 之间的关系,然后利用训练得到的非线性模型和 0.05°分辨率的 MODIS NDVI、ET、LST 产品,将 GOME-2 SIF 值降尺度到 0.05°网格。

Duveiller 等^[17] 对上述方法进行了进一步的改进,对 SIF 解释变量的选取进行了优化。该研究将 SIF 的解释变量分为植被参数、水分参数和温度参数三类,其中植被参数变量选用了 NDVI、EVI 和 NIRv^[52],水分参数选取了 ET 和 NDWI,温度参数选取了 MODIS 上午星和下午星的地表温度产品,通过权衡信息量和计算量,给出了优化的解释变量组合公式,提高了 SIF 降尺度产品的精度。

4.2.3 $\overline{\text{SIF}}_{005}$ 产品

Wen 等^[22] 分别利用 2002~2012 年 1°分辨率的 SCIAMACHY SIF 产品和 2007 年至今 0.5°分辨率的 GOME-2 SIF 产品以及 MODIS 1-7 波段方向归一化的地表反射率数据,参考 Duveiller 和 Cescatti^[16] 的方法,按空间和时间分层训练了神经网络,以体现不同生物群系、不同气候区、不同物候期 SIF 和反射率关系的差异。利用训练得到神经网络,分别生产了 0.05°空间分辨率的 SCIAMACHY 和 GOME-2 月值 SIF 空间降尺度产品。在此基础上,利用累积分布函数(CDF)匹配方法,逐网格对 SCIAMACHY 和 GOME-2 的 SIF 空间降尺度产品进行匹配,消除二者之间的偏差,实现两种传感器 SIF 产品的融合,从而生产了 2002 年至今 0.05°分辨率、长时序、月值 SIF 产品($\overline{\text{SIF}}_{005}$)。

验证结果表明, $\overline{\text{SIF}}_{005}$ 产品与原始 SIF 卫星反演产品具有一致的时空分布规律,且与航空 SIF 反演结果具有较好的一致性,利用 $\overline{\text{SIF}}_{005}$ 计算的荧光产率与地面观测结果也基本吻合。此外, $\overline{\text{SIF}}_{005}$ 产品还可清晰地反映干旱和热浪等极端气候事件,表明 $\overline{\text{SIF}}_{005}$ 产品保留了丰富的 SIF 生理信息。但是,在利用 $\overline{\text{SIF}}_{005}$ 产品进行长时序研究时,还需考虑 SCIAMACHY 和 GOME-2 传感器随时间的衰减对 SIF 值带来的影响。

4.3 SIF 时空扩展产品存在的问题

综上所述,尽管国内外学者研究发展了诸多全球 SIF 时空扩展产品,但现有产品仍存在一系列问题,对 SIF 应用研究带来了一定的局限性。

目前多数 SIF 空间扩展模型的解释变量主要是可见—近红外波段的反射率信息,少数用到了气象

信息^[16-17,21,23]。反射率主要表征冠层的色素含量和结构信息,缺少对植物光合生理信息的表征;温度、湿度等气象参数与植被光能利用率等光合生理状态相关,是对反射率信息的有效补充。但是,SIF与光合作用过程的关联存在直接的物理机制,这种独特优势是反射率和气象数据难以体现的。因此,多数SIF空间扩展产品损失了原始SIF数据所包含的植物生理信息,不是真正意义的SIF产品。

此外,SIF由叶片内部产生,受到冠层内部叶片的再吸收与散射作用影响,只有一部分逃出冠层的SIF信号可被遥感器观测到。近年来,国内外学者开展了一系列SIF冠层逃出效率研究^[53-55],通过校正冠层辐射传输对SIF信号的影响来提高SIF估算GPP的精度^[56]。但同时也有研究表明,SIF冠层逃出效率所代表的冠层结构信息对SIF-GPP关系存在增强作用,并据此提出了植被近红外波段反射辐亮度等SIF替代参数^[57-59],具有更高的时空分辨率和反演精度。

5 结论与展望

SIF与植物光合作用过程直接相关,是植被光合生产力遥感探测的理想探针。鉴于此,国内外学者利用现有的大气成分探测卫星高光谱载荷的卫星遥感资料生产了一系列全球SIF卫星遥感产品,并针对原始SIF反演产品存在的时空分辨率较低的问题,开展了SIF产品时空尺度扩展研究,借助反射率等信息和机器学习方法,生产了高时空分辨率的SIF扩展产品,为SIF应用研究提供了丰富的数据源。

尽管全球SIF反演研究取得了丰硕的成果,但现有的全球SIF卫星遥感产品及时空尺度扩展产品还存在诸多局限性,仍然极大限制了其在全球植被生产力遥感监测中的应用潜力。主要问题包括:

(1)全球SIF卫星遥感产品时空分辨率较低,无法满足植被生产力高精动态监测的需求。针对这一问题,尽管国内外学者已开展了一系列SIF时空尺度扩展研究工作,但这些工作大多通过建立SIF与其他相关参数(如反射率、植被指数、地表覆盖类型、温度等)的统计关系,从而利用其他具有高分辨率的植被和气象参数预测SIF,以进行SIF原始卫星遥感产品的时空尺度扩展研究,但是,利用这些统计模型得到的SIF时空尺度扩展产品难以完整保留SIF所具有的独特生理信息,还存在诸多技术困

难有待克服。

(2)不同SIF卫星遥感产品之间由于时空尺度、成像时间、光谱特性、反演算法、产品波段等方面的差异,不同产品的SIF绝对值缺乏可比性,给多源数据融合应用带来了困难,削弱了现有卫星SIF产品的长时序、多尺度应用潜力。

(3)卫星传感器在长期运行过程中不可避免地存在仪器衰减现象,因此利用原始的长时序遥感资料获取的SIF卫星遥感产品无法支持长时序变化分析。现有的时间序列最长的SIF卫星遥感产品为GOME/GOME-2系列SIF产品,可追溯至1995年。但两代传感器的差异,以及传感器自身随时间衰减对SIF反演结果带来的影响仍有待解决。NASA GOME-F的产品说明明确指出,该产品不能支持长时序分析。

在上述背景下,中国陆地生态系统碳监测卫星SIF探测载荷、欧洲FLEX荧光探测计划等专门为SIF探测设计的卫星载荷必将提供更具优势的SIF卫星遥感数据源,但是,受技术条件等制约,两种SIF卫星载荷在光谱性能和成像技术等方面仍然存在较大的局限性。

针对以上SIF卫星遥感产品与卫星载荷面临的问题,在未来的SIF卫星遥感研究工作中,应着重关注以下3个方面。

(1)在SIF卫星遥感产品时空扩展研究方面,首先,应进一步发展SIF时空尺度扩展方法,加强对SIF生理信息的体现,探索利用多源遥感数据,如不同分辨率的SIF产品、气象数据、不同特征波段的反射率数据,尽可能多地保留SIF生理信息;此外,应深入研究SIF与光合生理过程的关联机理,明确不同生态系统类型、不同时空尺度条件下SIF和GPP的关键驱动变量,探寻潜在的高分辨率SIF替代产品。

(2)在长时序、多源SIF卫星遥感产品一致性研究方面,需要开展标准化多源SIF遥感数据的相关研究,构建多源长时序SIF产品的统一框架,提升多源数据的可比性和可用性;改进卫星传感器在轨道标和历史数据辐射校正方案,为SIF反演提供时序一致的辐亮度数据源。

(3)在未来的SIF遥感卫星任务设计方面,应针对不同应用需求和SIF反演算法的特点,加强载荷技术指标论证工作。针对全球尺度的SIF机理与应用研究需求,设计宽幅成像、多星组网等观测模式,

从而实现全球高精度、高频次的SIF卫星遥感探测目标;针对特定区域的精细化观测与研究需求,设计高时空分辨率、侧摆凝视观测、地球同步轨道观测等模式,从而实现区域日尺度和季节尺度的高分辨率SIF观测,以更好满足与其他多源遥感和地面观测数据协同分析的需求。

参考文献(References):

- [1] 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 Phytol.*, 2019, 223 (3): 1179-1191. DOI: 10.1111/nph.15796.
- [2] Liu Liangyun. Principle and application of vegetation quantitative remote sensing [M]. Beijing: Science Press, 2014. [刘良云. 植被定量遥感原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [3] Zhang Zhaoying, Wang Songhan, Qiu Bo, *et al.* Retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence and advancements in carbon cycle application [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(1): 37-52. [章钊颖, 王松寒, 邱博, 等. 日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展[J]. *遥感学报*, 2019, 23(1): 37-52.]
- [4] Guanter L, Zhang Y, Jung M, *et al.* Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2014: 201320008. DOI: 10.1073/pnas.1320008111.
- [5] Sun Y, Frankenberg C, Wood J D, *et al.* OCO-2 advances photosynthesis observation from space via Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence [J]. *Science*, 2017, 358 (6360): eaam5747. DOI: 10.1126/science.aam5747.
- [6] 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. DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.030.
- [7] Kraft S, Del Bello U, Bouvet M, *et al.* FLEX: ESA's Earth Explorer 8 candidate mission [C] // *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2012 IEEE International, 2012: 7125-7128.
- [8] 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. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.007.
- [9] Du S, Liu L, Liu X, *et al.* The Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Imaging Spectrometer (SIFIS) Onboard the First Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite (TECIS-1): Specifications and Prospects [J]. *Sensors*, 2020, 20 (3): 815. DOI: 10.3390/s20030815.
- [10] Liu Xinjie. Retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence by remote sensing [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. [刘新杰. 日光诱导叶绿素荧光的遥感反演研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.]
- [11] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, *et al.* First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space [J]. *Biogeosciences*, 2011, 8 (3): 637-651. DOI: 10.5194/bg-8-637-2011.
- [12] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, *et al.* Filling-in of near-infrared solar lines by terrestrial fluorescence and other geophysical effects: simulations and space-based observations from SCIAMACHY and GOSAT [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2012, 5(4): 809-829. DOI: 10.5194/amt-5-809-2012.
- [13] Joiner J, Yoshida Y, Guanter L, *et al.* New methods for the retrieval of chlorophyll red fluorescence from hyperspectral satellite instruments: simulations and application to GOME-2 and SCIAMACHY [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2016, 9(8): 3939-3967. DOI: 10.5194/amt-9-3939-2016.
- [14] Köhler P, Guanter L, Joiner J. A linear method for the retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from GOME-2 and SCIAMACHY data [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2015, 8(6): 2589-2608. DOI: 10.5194/amt-8-2589-2015.
- [15] Köhler P, Frankenberg C, Magney T S, *et al.* Global Retrievals of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence With TROPOMI: First Results and Intersensor Comparison to OCO-2 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2018, 45(19): 10,456-10,463. DOI: 10.1029/2018GL079031.
- [16] 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. DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.027.
- [17] 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. DOI: 10.5194/essd-12-1101-2020.
- [18] 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]. *Geophys. Res. Lett.*, 2018, 45(7): 3136-3146. DOI: 10.1002/2017GL076294.
- [19] 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. DOI: 10.5194/bg-15-5779-2018.
- [20] Yu L, Wen J, Chang C, *et al.* High-resolution global contiguous SIF of OCO-2 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, 46(3): 1449-1458. DOI: 10.1029/2018GL081109.
- [21] 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. DOI: 10.3390/rs11050517.
- [22] 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. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111644.
- [23] Ma Y, Liu L, Chen R, *et al.* Generation of a global spatially continuous TanSat Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence product by considering the impact of the solar radiation intensity [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(13): 2167. DOI: 10.3390/rs12132167.
- [24] Plascyk J A, Gabriel F C. The fraunhofer line discriminator

- Mk II - an airborne instrument for precise and standardized ecological luminescence measurement[J]. *IEEE. T. Instrum. Meas.*, 1975, 24(4): 306-313. DOI: 10.1109/TIM.1975.4314448.
- [25] Guanter L, Alonso L, Gómez-Chova L, *et al.* Estimation of solar-induced vegetation fluorescence from space measurements[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34(8). DOI: 10.1029/2007GL029289.
- [26] Guanter L, Alonso L, Gómez-Chova L, *et al.* Developments for vegetation fluorescence retrieval from spaceborne high-resolution spectrometry in the O2-A and O2-B absorption bands [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115(D19). DOI: 10.1029/2009JD013716.
- [27] Cogliati S, Rossini M, Julitta T, *et al.* Continuous and long-term measurements of reflectance and sun-induced chlorophyll fluorescence by using novel automated field spectroscopy systems [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.027.
- [28] Verhoef W, Van Der Tol C, Middleton E M. Vegetation canopy fluorescence and reflectance retrieval by model inversion using optimization[C]// 5th Int. Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence, 2014.
- [29] Frankenberg C, Butz A, Toon G C. Disentangling chlorophyll fluorescence from atmospheric scattering effects in O2A-band spectra of reflected sun-light [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, 38(3). DOI: 10.1029/2010GL045896.
- [30] Zhang Lifu, Wang Siheng, Huang Changping. Top-of-atmosphere hyperspectral remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: a review of methods[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1):1-12.[张立福,王思恒,黄长平. 太阳诱导叶绿素荧光的卫星遥感反演方法[J]. *遥感学报*, 2018, 22(1):1-12.]
- [31] Guanter L, Frankenberg C, Dudhia A, *et al.* Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 236-251. DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.006.
- [32] 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]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, 6(10): 2803-2823. DOI: 10.5194/amt-6-2803-2013.
- [33] Ji Menghao, Tang Bohui, Li Zhaoliang. Review of solar-induced chlorophyll fluorescence retrieval methods from satellite data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(3):455-466.[纪梦豪,唐伯惠,李召良. 太阳诱导叶绿素荧光的卫星遥感反演方法研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(3):455-466.]
- [34] 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. DOI: 10.1016/j.scib.2018.10.003.
- [35] Guanter L, Aben I, Tol P, *et al.* Potential of the TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard the Sentinel-5 Precursor for the monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2015, 8(3): 1337-1352. DOI: 10.5194/amt-8-1337-2015.
- [36] Parazoo N C, Frankenberg C, Köhler P, *et al.* Towards a Harmonized Long-Term Spaceborne Record of Far-Red Solar-Induced Fluorescence [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019. DOI: 10.1029/2019JG005289.
- [37] Lichtenberg G, Kleipool Q, Krijger J, *et al.* SCIAMACHY Level 1 data: calibration concept and in-flight calibration [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(12): 5347-5367. DOI: 10.5194/acp-6-5347-2006.
- [38] Callies J, Corpaccioli E, Eisinger M, *et al.* GOME-2-Metop's second-generation sensor for operational ozone monitoring[J]. *ESA bulletin*, 2000, 102: 28-36.
- [39] Kuze A, Suto H, Nakajima M, *et al.* Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring [J]. *Appl. Optics.*, 2009, 48(35): 6716-6733. DOI: 10.1364/ao.48.006716.
- [40] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, *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. DOI: 10.1016/j.rse.2014.06.022.
- [41] Sanders A F, Verstraeten W W, Kooreman M L, *et al.* Spaceborne Sun-Induced Vegetation Fluorescence Time Series from 2007 to 2015 Evaluated with Australian Flux Tower Measurements [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 895. DOI: 10.3390/rs8110895.
- [42] Eldering A, Taylor T E, O'Dell C W, Pavlick R. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12: 2341-2370. DOI: 10.5194/amt-12-2341-2019.
- [43] Köhler P, Behrenfeld M J, Landgraf J, *et al.* Global Retrievals of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence at Red Wavelengths With TROPOMI [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2020: e2020GL087541. DOI: 10.1029/2020GL087541.
- [44] Guanter L, Bacour C, Schneider A, *et al.* The TROPISIF global sun-induced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission [J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2021: 1-27. DOI: 10.1029/2019JG005534.
- [45] Wolanin A, Rozanov V V, Dinter T, *et al.* Global retrieval of marine and terrestrial chlorophyll fluorescence at its red peak using hyperspectral top of atmosphere radiance measurements: Feasibility study and first results[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2015.05.018.
- [46] Kraft S, Bello U D, Drusch M, *et al.* FLORIS: The Fluorescence Imaging Spectrometer of the Earth Explorer Mission Candidate FLEX [C] // 5th International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence, 2014. DOI: 10.1117/12.2309086.
- [47] Wang Siheng, Huang Changping, Zhang Lifu, *et al.* Design and assessment of Far-Red solar-induced chlorophyll fluorescence retrieval method for the terrestrial ecosystem carbon inventory satellite[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(3):476-487.[王思恒,黄长平,张立福,等. 陆地生态系统碳监测卫星远红波段叶绿素荧光反演算法设计

- [J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3):476-487.]
- [48] Moore Iii B, Crowell S M R, Rayner P J, *et al.* The Potential of the Geostationary Carbon Cycle Observatory (GeoCarb) to Provide Multi-scale Constraints on the Carbon Cycle in the Americas [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6 (109). DOI: 10.3389/fenvs.2018.00109.
- [49] Geddes J A, Martin R V, Bucsela E J, *et al.* Stratosphere - troposphere separation of nitrogen dioxide columns from the TEMPO geostationary satellite instrument [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2018, 11 (11): 6271-6287. DOI: 10.5194/amt-11-6271-2018.
- [50] Gulde S, Kolm M, Smith D, *et al.* Sentinel 4: a geostationary imaging UVN spectrometer for air quality monitoring: status of design, performance and development [M]. 10563. SPIE, 2017.
- [51] Porcar-Castell A, Tyystjärvi E, Atherton J, *et al.* Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges [J]. *J. Exp. Bot.*, 2014: eru191. DOI: 10.1093/jxb/eru191.
- [52] Badgley G, Field C B, Berry J A. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis [J]. *Science Advances*, 2017, 3(3): e1602244. DOI: 10.1126/sciadv.1602244.
- [53] Yang P, Van Der Tol C. Linking canopy scattering of far-red sun-induced chlorophyll fluorescence with reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 456-467. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.029.
- [54] Liu X, Guanter L, Liu L, *et al.* Downscaling of solar-induced chlorophyll fluorescence from canopy level to photosystem level using a random forest model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 110772. DOI: 10.1016/j.rse.2018.05.035.
- [55] Zeng Y, Badgley G, Dechant B, *et al.* A practical approach for estimating the escape ratio of near-infrared solar-induced chlorophyll fluorescence [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019: 111209. DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.028.
- [56] Liu X, Liu L, Hu J, *et al.* Improving the potential of red SIF for estimating GPP by downscaling from the canopy level to the photosystem level [J]. *Agr. Forest. Meteorol.*, 2020, 281: 107846. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107846.
- [57] Dechant B, Ryu Y, Badgley G, *et al.* Canopy structure explains the relationship between photosynthesis and sun-induced chlorophyll fluorescence in crops [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 241: 111733. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111733.
- [58] Wu G, Guan K, Jiang C, *et al.* Radiance-based NIRv as a proxy for GPP of corn and soybean [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(3): 034009. DOI: 10.1088/1748-9326/ab65cc.
- [59] Baldocchi D D, Ryu Y, Dechant B, *et al.* Outgoing Near-Infrared Radiation From Vegetation Scales With Canopy Photosynthesis Across a Spectrum of Function, Structure, Physiological Capacity, and Weather [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125 (7). DOI: 10.1029/2019JG005534.

Research Progress and Prospective of Global Satellite-based Solar-induced Chlorophyll Fluorescence Products

Sun Zhongqiu¹, Gao Xianlian¹, Du Shanshan², Liu Xinjie²

(1. Academy of Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, China 100714;

2. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Solar-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF) is an ideal indicator of global vegetation productivity. Although there is still no satellite-based sensor designed for SIF monitoring specifically, there are a series of atmospheric monitoring hyperspectral sensors which have potential for SIF retrieval. And a number of satellite-based global SIF products have been developed and published. Furthermore, some spatial and temporal extended SIF products have also been developed to better match the requirements of SIF application. The design of specific satellite-based SIF sensors is already in progress in both China and Europe. Although the products of satellite-based SIF products developed fast in recent years, lots of uncertainties and limitations remains for application. In this paper, the existing and in-coming satellite-based sensors for SIF detection, the published global SIF products were summarized. From the perspective of application requirements, the existing limitations of global SIF products and the development direction in the future were analyzed. This paper can serve as a reference for the application of existing SIF satellite products and the design of future satellite-based SIF exploring missions.

Key words: Solar-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF); Satellite products; Spatiotemporal continuous products; Research progress