

面向空天地遥感的日光诱导叶绿素荧光反演算法综述

陶诗语^{1,2}, 陈镜明³, 张永光^{1,4,5}, 吴霖升^{1,2}, 章钊颖^{1,2}

1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210023;

2. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023;

3. 加拿大多伦多大学地理与规划系, 加拿大 多伦多市 M5S3G3;

4. 自然资源部国土卫星遥感应用重点实验室, 南京 210023;

5. 江苏省软件新技术与产业化协同创新中心, 南京 210023

摘要: 日光诱导叶绿素荧光 SIF (Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence) 是植物叶绿素在受到日光照射时激发的光谱信号, 是植物光合作用准确监测的关键指标, 对陆地生态系统碳水循环监测具有重要意义。近年来, 随着“星—空—地”荧光遥感技术的综合发展, SIF 遥感反演取得了显著进展。本文从 SIF 反演的算法、平台与设备出发, 系统总结了各类 SIF 反演算法的特点、优势和局限性; 分析了 SIF 在近地面和航空航天各观测平台上反演设备的发展历程; 并探讨了当前 SIF 反演存在的问题及未来发展方向。

关键词: 叶绿素荧光, 遥感反演, 遥感设备, 估算方法, 生态监测, 多平台, 碳水循环

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 陶诗语, 陈镜明, 张永光, 吴霖升, 章钊颖. 2025. 面向空天地遥感的日光诱导叶绿素荧光反演算法综述. 遥感学报, 29(12): 3395–3434

Tao S Y, Chen J M, Zhang Y G, Wu L S and Zhang Z Y. 2025. Review of sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval algorithms for remote sensing from space, airborne, and ground platforms. National Remote Sensing Bulletin, 29(12): 3395–3434 [DOI: 10.11834/jrs.20255158]

1 引言

日光诱导叶绿素荧光 SIF (Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence) 是指从叶绿素分子在吸收光量子后, 从激发态跃迁回基态的过程之中所发射的一种光谱信号 (波长在 650—850 nm 之间), 代表未进入光化学或非光化学途径的光能的一部分 (Baker, 2008; Meroni 等, 2009)。SIF 反演是指通过遥感手段从卫星或地面观测的反射光谱中提取 SIF 信号的过程 (Cogliati 等, 2015a; Zhao 等, 2024a)。SIF 反演中, 辐照度与辐亮度的一致性 with 观测平台相关。卫星观测中, 辐照度未受地球大气影响, 而辐亮度为经过大气传输后的观测值, 二者路径不一致, 需进行大气校正, 常用 SVD 算法; 地面观测时二者均在相同大气条件下获取, 匹配性更高, 除 SVD 算法外, 也可使用多种地面

反演算法 (如 FLD) 进行 SIF 反演 (Liu 等, 2016; Wu 等, 2022)。SIF 被称为“植被光合作用的探针”, 与传统绿度植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 相比, 其与总初级生产力 GPP (Gross Primary Productivity) 的相关性更强, 这种特性使得基于 SIF 的模型在全球尺度 GPP 的动态模拟中展现出更高的精度和适用性 (刘良云等, 2006; Miao 等, 2018)。SIF 遥感技术在监测非生物胁迫 (干旱、热害、除草剂、氮等) (Ding 等, 2022)、植被物候 (Zhang 等, 2022a)、植被蒸腾 (Yang 等, 2024)、农作物估产 (Zhu 等, 2023) 等方面应用广泛, 为监测陆地生态系统碳水循环提供了新思路 (Porcar-Castell 等, 2014; Zhang 等, 2023a)。

植物发射的 SIF 信号非常微弱, 通常仅占植物反射太阳辐射的 1%—2% (Meroni 等, 2009; 吴霖

收稿日期: 2025-05-27; 预印本: 2025-10-13

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42125105, 42522108, 42471405, 42201398); 江苏省自然科学基金 (编号: BK20240068)

第一作者简介: 陶诗语, 研究方向为植被定量遥感、叶绿素荧光遥感。E-mail: taoshiyu20@mails.ucas.ac.cn

通信作者简介: 章钊颖, 研究方向为植被叶绿素荧光遥感和全球碳循环。E-mail: zhaoying_zhang@nju.edu.cn

升等, 2022), 其信号反演主要依赖于太阳大气吸收线(主要为太阳夫朗禾费暗线 FLs (Fraunhofer Dark Lines)) 或地球大气吸收线。FLs 是指太阳光球层分子对特定波长的吸收作用而产生的波段宽度为 0.1—10 nm 的微小吸收线 (Frankenberg 等, 2016; 章钊颖等, 2019), 由于吸收线内部的 SIF 信号会对太阳光谱的吸收波段产生一定的填充作用, 导致表观反射率光谱(包含叶绿素荧光的贡献)在这些吸收波段存在明显的尖峰(凸起)现象 (Perez-Priego 等, 2005; 刘良云, 2021; 王绍强等, 2020), 基于吸收线内部的填充效应即可实现 SIF 的反演 (刘良云, 2021; Perez-Priego 等, 2005; 王绍强等, 2020)。遥感反演 SIF 的算法起源较早, Plascyk 和 Gabriel (1975) 基于 FLs 提出了标准 FLD (Fraunhofer Line Discrimination) 算法, 实现了 SIF 的反演。基于 FLD 原理, 诸多研究进一步发展了多种改进算法, 包括 3FLD (three bands FLD), cFLD (correct FLD), iFLD (improved FLD) 等衍生方法, 从而提升了 SIF 反演在不同光谱条件下的适用性和精度。随后基于数学统计算法描述荧光光谱形状的光谱拟合法 SFM (Spectral Fitting Model) 被提出, 已有研究基于 SFM 的原理, 进一步发展了一系列变体算法, 如荧光光谱重建 FSR (Fluorescence Spectrum Reconstruction), 全光谱拟合法 F-SFM (Full-spectrum Spectral Fitting Method) 等, 这些算法在地面观测中得到了广泛应用。近年来, 已有研究不仅针对 FLD 算法与 SFM 算法等传统方法进行了改进与完善, 还将多种前沿的信号处理与数据分析技术应用至 SIF 反演中。其中, 奇异值分解 SVD (Singular Value Decomposition), 主成分分析 PCA (Principal Component Analysis), 差分光学吸收光谱算法 DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy), 小波分解 WD (Wavelet Decomposition) 以及机器学习 (Li 等, 2025) 等新兴技术的引入, 不仅实现了 SIF 反演精度和效率的提升, 更为大规模、复杂超光谱数据集的处理与分析提供了有效思路。特别是 SVD 和 PCA 算法, 在卫星反演 SIF 的应用中更为广泛 (Joiner 等, 2013; Köhler 等, 2018)。目前, SIF 反演算法领域正处于迅速发展阶段, 并被广泛用于地面及航空航天平台的 SIF 反演研究。尽管存在多种不同类型的反演算法, 但目前对 SIF 反演算

法的总结及存在问题的讨论仍不够全面, 如不同算法适用的拟合窗口和光谱环境不同 (Chang 等, 2020a), 算法精度往往受到不同因素(如仪器特性、数据噪声、大气效应及冠层结构等)的制约 (Dechant 等, 2022), 部分算法反演结果需要进一步的校正(如 SFM 算法需要精确的大气校正, 无荧光偏移值的校正等)等 (Van Schaik 等, 2020), 因此, 需针对各反演算法的原理、特点及优缺点开展深入的探讨, 确保各类反演算法的应用效果和适用性。

最早反演 SIF 的研究起源于 1980 年的地面人工观测, 随后发展了一系列自动化 SIF 观测系统(如 TriELEX), 随着航空航天遥感的发展, 多种搭载传感器的机载观测系统与无人机成为 SIF 反演的有力工具。近年来, 多颗搭载了具有 SIF 反演所需光谱波段的碳监测卫星传感器已发射升空, 推动了大尺度 SIF 反演研究的发展。Guanter 等 (2007) 首次利用环境卫星 ENVISAT (Environmental Satellite) 数据实现了星载 SIF 反演。Joiner 等 (2011) 基于温室气体卫星 GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) 卫星数据首次实现了全球 SIF 制图。Frankenberg 等 (2011b) 也基于 GOSAT 卫星反演了 O_2-A 的 SIF。而后, 随着碳观测科学实验数据卫星 OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2), 对流层监测仪 TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) 卫星传感器的成功发射, 全球 SIF 反演取得了迅猛发展 (Guanter 等, 2021; Köhler 等, 2020)。至今, 包括中国在内的众多国家正致力于 SIF 监测技术的研发。例如, 中国于 2017 年发射了首颗自主研发的全球碳浓度观测科学实验卫星 (Chinese Carbon Dioxide Observation Satellite Mission, Tansat)、2022 年 8 月又成功发射了搭载于陆地生态系统碳监测卫星 TECIS (Terrestrial Ecosystem Carbon Inventory Satellite), 其上配备了 SIF 成像光谱仪 SIFIS (SIF Imaging Spectrometer)、以及欧洲航天局即将开展的 FLEX 任务等, 这些新型卫星及对应传感器的部署, 不仅将进一步提升卫星监测 SIF 的空间分辨率, 也将为植被生理过程和光合作用动态变化模式方面的精细监测提供技术支持 (Du 等, 2022; Zhang 等, 2023c), 从而推动 SIF 在气候变化及生态系统管理的应用。尽管目前已

发展了诸多用于SIF反演的仪器设备和观测平台，但目前关于各平台的反演优缺点、反演算法、反演产品、仪器设备的特点及适用性等问题的总结仍有限，需要对这些问题进行更系统地归纳探讨，从而为未来实现高精度、高时空分辨率的SIF反演提供参考。

通过对近20年来基于遥感技术反演SIF相关文献的统计分析可以发现，该领域的研究成果数量和引用次数总体呈上升趋势，这表明国内外学者对该研究方向的关注度日益提升（图1）（Mohammed等，2019）。SIF在表征胁迫、植被物候、生态系统过程等方面得到了广泛应用，相关成果发表于国际顶级期刊如Science, Nature, PNAS等（Chen等，2024；Mohammadi等，2022；Wang等，2020b），SIF反演是这一领域的核心研究课题之一，目前已有诸多突破性进展。前人在已有文献中针对SIF反演的相关研究进展作出综述，已有文献中，Meroni等（2009）主要针对地基平台对2009年以前的SIF反演算法及应用作出介绍。Mohammed等（2019）针对部分代表性反演算法和观测设备作了总结。当前，已有综述大多侧重于SIF反演领域某一方面的总结，缺乏近年来对SIF反演相关算法、设备、平台、产品等方面发展全方位的深入评述，且近五年来SIF反演领域取得了重要进展，但尚未有研究对这些最新成果进行系统梳理与总结。基于此，本文旨在全面回顾SIF反演领域的研究进展，系统梳理了自1975年首次实现SIF反演至今的SIF反演产生及发展相关的文献，全面总结了自20世纪80年代以来在地面、航空航天多平台上的取得的理论进展与应用成果，特别地，本文重点评述分析了近年来SIF反演方面的进展。本文首先介绍了SIF遥感反演的基本原理；之后分析和比较目前常用的反演算法，进一步地对SIF反演的“星—空—地”平台及相应反演仪器设备及反演产品的发展与适用性作出归纳总结，最后探讨SIF反演领域的存在问题及未来的发展趋势（图2）。

2 SIF遥感反演算法

2.1 SIF反演基本原理

植被吸收的能量主要来源于可见光（Ni等，

2019）。在光化学反应过程中，叶绿素分子吸收光能后处于激发态，这种不稳定状态需要通过释放能量以恢复至基态。此时，植被吸收的光能有3个去向：热耗散NPQ（非光化学猝灭，Non-Photochemical Quenching）、光合作用以及叶绿素荧光（Papageorgiou和Govindjee，2004；吴霖升等，2022）。与结构性植被参数（如叶面积指数）相比，SIF对光合有效辐射PAR（Photosynthetically Active Radiation）表现出高度敏感性，在不同光照条件下（如晴天和阴天），其强度会发生明显变化，因而反演更为复杂（Zhang等，2020）。

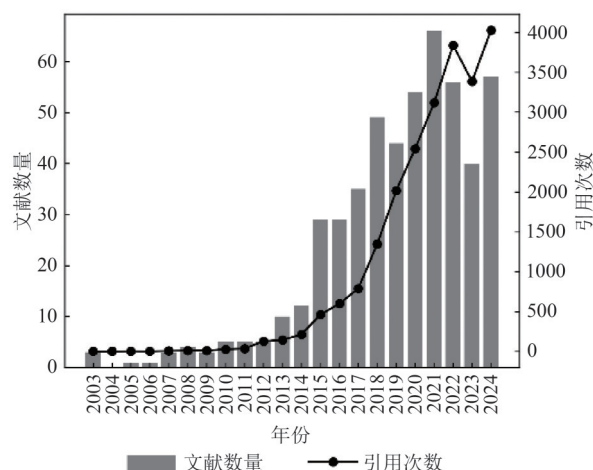


图1 近20年SIF反演发表文献数量及被引次数统计（以“sun induced chlorophyll fluorescence retrieval”, “solar induced Fluorescence retrieval”, “sun induced fluorescence retrieval”, “solar induced chlorophyll fluorescence retrieval”为主题在Web of Science中检索, 2025年7月24日）
Fig. 1 Statistics of the number of publications and citations on SIF retrieval in the past 20 years (Searched in Web of Science with the topics “sun induced chlorophyll fluorescence retrieval”, “solar induced fluorescence retrieval”, “sun induced fluorescence retrieval”, and “solar induced chlorophyll fluorescence retrieval” on July 24, 2025)

由于SIF不包含太阳光谱的夫朗禾费吸收特征，因此在吸收线内表现为填充效应。然而，SIF在传输过程中仍受到大气吸收影响，需通过大气校正加以修正。在不考虑大气影响的前提下（如近地面观测），SIF反演主要依赖地球大气吸收线O₂-A（760 nm）和O₂-B（687 nm）波段（图3），而卫星平台的SIF反演则主要依赖于太阳FLs，如Fe（758.8 nm）和KI（770.1 nm）等波段。

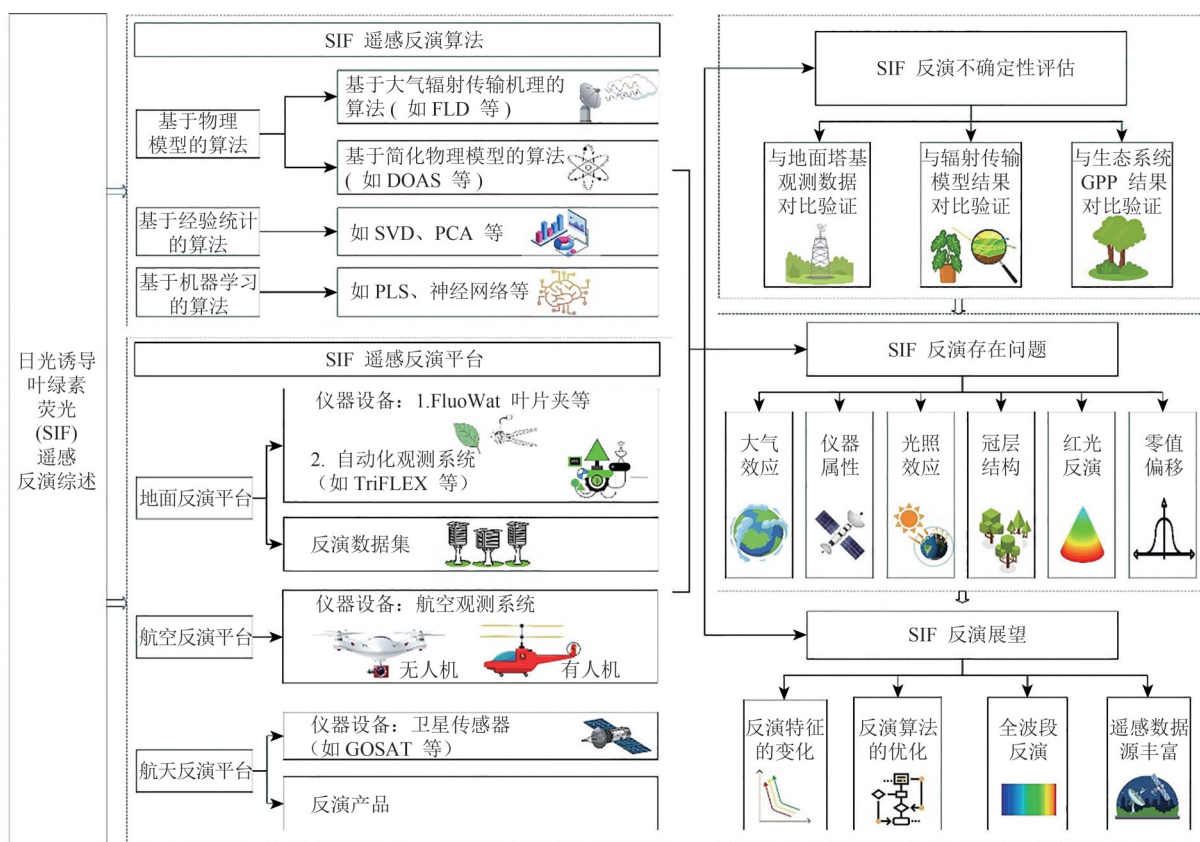


图2 论文整体结构框架

Fig. 2 Overall structure framework of the paper

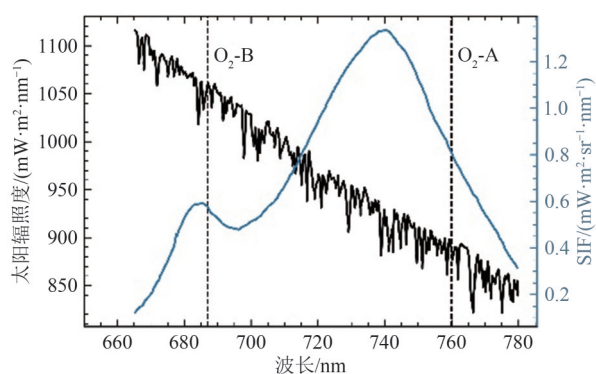


图3 太阳地球外辐照度(黑线)与地表SIF(蓝线)光谱
Fig. 3 Solar irradiance (black line) and surface SIF (blue line) spectra

在高光谱分辨率观测下, SIF在地球大气吸收线 O_2 -A 与 O_2 -B 中的填充效应大于 10%。相对而言, 由于FLs对应的吸收线相对较浅, 这里的荧光比例相对较小。传统遥感反演SIF算法大多是基于FLD原理, 在自然条件下, 通过测量吸收线内部SIF对于吸收线“井深”的填充效应可以实现荧光与辐亮度的分离(图4), 从而提取SIF(Plascyk和Gabriel, 1975)。随着技术的发展, 数据驱动算法作为一类新兴的方法, 能够通过机器学习等技术,

直接从光谱数据本身的特性提取SIF信息, 在空天平台的大范围观测中展现出明显优势(Plascyk和Gabriel, 1975)。

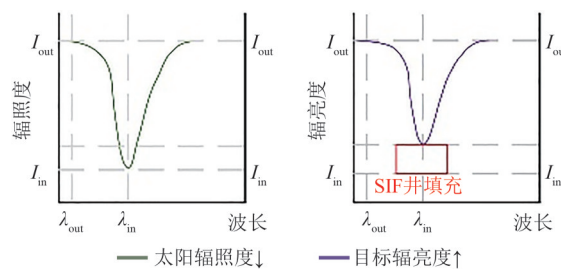


图4 FLD原理

Fig. 4 Principle of FLD

假设植被表面为朗伯体, 在考虑总冠层顶部TOC (Top of Canopy) 辐射时, 忽略冠层—传感器的大气效应和邻近效应, 则SIF对于TOC辐射的贡献如式(1)所示(Mohammed等, 2019):

$$L(\lambda) = \frac{r(\lambda)E(\lambda)}{\pi} + F(\lambda) \quad (1)$$

式中, λ 代表波长, $E(\lambda)$ 是太阳的已知(测量或模拟)入射辐照度, $r(\lambda)$ 为不考虑SIF的植被真实反射率, $F(\lambda)$ 为荧光值。由于式(1)的所有

变量都随波长变化,因此SIF反演方法基于吸收带内外的目标辐亮度与入射太阳辐照度特征(图5),结合光谱信息的差异性统计规律,对荧光信号进行分离与估算(阎广建等,2023)。假设对方程中的所有项都有先验知识, r 与SIF被视为波长的平滑函数,如FLD衍生算法假设这两个变量在狭窄波长范围内可能为常数或线性变化,能够通过光谱特征来估算和量化植物发射的SIF信息(Mohammed等,2019)。

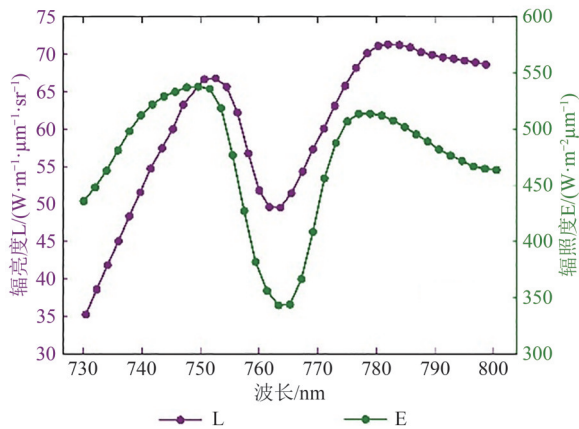


图5 辐亮度(L)与辐照度(E)的光谱分布

Fig. 5 Radiance (L) and irradiance (E) spectra

目前,SIF反演算法通常包含两类:基于物理模型的算法与基于经验统计的算法。物理模型类算法通常在大气辐射传输机理或简化物理模型的基础上发展而来,基于不同的假设条件模拟SIF光谱的变化,这类算法反演形式简单,物理意义清晰(Plascyk,1975),但大多容易受到大气效应的干扰(Naethe等,2022),地面观测可以获取植被冠层顶部的入射辐射数据(Alonso等,2008; Zhang和Zhang,2025),能够提供物理模型类算法反演所需的数据。然而,卫星观测通常只能获取大气层顶的辐射数据(Köhler等,2015a),且这类算法且往往对于成像几何和地形因素有较高的要求,难以实现卫星平台的全球大范围反演(Köhler等,2015a)。经验统计类算法通常从数据本身的特性出发,采用数学统计的算法来表征光谱数据的结构信息,这类算法相较物理模型类算法,在一定程度上降低了对于大气辐射传输过程模拟和光谱分辨率的要求,能够有效提升反演效率,避免复杂的大气辐射传输建模过程(Köhler等,2015b),适用于较高的塔基或航空航天平台的反演,但反演精度往往会受到训练集,反演参数等

的限制(吴霖升等,2022)。

2.2 基于物理模型的算法

2.2.1 基于大气辐射传输机理的算法

2.2.1.1 基于O₂-A波段的算法

基于大气辐射传输机理的算法通常是在标准FLD算法的基础上进行改进或针对具体的研究对象演变而来的。由于反演波段的不同,反演难度也有所差异,这类算法可分为基于单波段(主要包括O₂-A和O₂-B波段)以及基于全波段的方法(表1)。现有的反演算法大多适用于O₂-A波段的SIF反演,1975年,Plascyk和Gabriel(1975)提出了标准FLD算法,FLD算法通常需要测量吸收线内一个波段(λ_{in})与吸收线外一个波段(λ_{out})的太阳辐照度E(Solar Irradiance)与目标辐亮度L(Target Radiance),实现SIF的反演(阎广建等,2023)。

$$L(\lambda_{in}) = \frac{r(\lambda_{in})E(\lambda_{in})}{\pi} + F(\lambda_{in}) \quad (2)$$

$$L(\lambda_{out}) = \frac{r(\lambda_{out})E(\lambda_{out})}{\pi} + F(\lambda_{out}) \quad (3)$$

$$F(\lambda_{in}) = F(\lambda_{out}) \quad (4)$$

$$r(\lambda_{in}) = r(\lambda_{out}) \quad (5)$$

$$r = \frac{L(\lambda_{out}) - L(\lambda_{in})}{E(\lambda_{out}) - E(\lambda_{in})} \cdot \pi \quad (6)$$

$$F = \frac{E(\lambda_{out}) * L(\lambda_{in}) - L(\lambda_{out}) * E(\lambda_{in})}{E(\lambda_{out}) - E(\lambda_{in})} \quad (7)$$

式(2) — (7)中, r 代表反射率, λ_{in} 代表吸收线内的波段, λ_{out} 代表吸收线外的波段,E为太阳入射,L为目标辐射率。FLD算法形式简单,输入参数少,但该算法假设反射率 r 和SIF在测量中涉及的两个近波长处保持恒定,这一假设往往在应用于较宽波段的反演时导致存在较大的估算误差(Meroni和Colombo,2006;Moya等,2006)。FLD算法在近地面和卫星观测中应用较早(Amoros-Lopez等,2008;Guanter等,2007),但FLD算法对成像几何和地形、因子有很高的要求,难以实现卫星平台全球大范围的SIF观测。

为了解决此问题,基于FLD算法,已有研究提出了一系列改进算法,这些算法对原有的光谱变化假设进行了优化和调整。例如,3FLD算法和cFLD算法,其中,3FLD算法利用吸收线外的两个相邻波段的加权均值(Maier等,2004)来代替传统FLD算法中单一吸收线外波段(λ_{out})的数值。

表1 基于物理模型的算法
Table 1 Physical model-based algorithms

反演算法	荧光波段/范围	反演窗口内对SIF形状的假设	优点	缺点/误差来源	计算成本	适用平台	参考文献
FLD	O ₂ -A(760 nm); O ₂ -B(687 nm)	恒定	形式简单,输入参数少	依赖恒定假设,受吸收线内外波段与参考波长选择、插值算法的影响较大	低	近地面	(Plascyk, 1975)
3FLD	O ₂ -A; O ₂ -B	线性	提升了在复杂光谱环境下的适用性与准确性,对仪器噪声不敏感,结果更稳健且不易低估	建立在线性假设基础上,结果对吸收带波段选择和插值方式较为敏感	低	近地面	(Maier等, 2004)
cFLD	O ₂ -A; O ₂ -B	校正系数调节	更准确地表示了SIF和光谱的变化关系	主要适用于单一植被类型,对波段选择与插值方法依赖较强	低	近地面	(GomezChova等, 2006)
iFLD	O ₂ -A; O ₂ -B	校正系数调节	相比FLD算法, 3FLD具有更高的反演精度	对仪器的光谱分辨率和信噪比要求较高,同时受波段选取与插值方法影响明显	低	近地面	(Alonso等, 2008)
eFLD	O ₂ -A; O ₂ -B	无假设	有效降低大气效应影响,可同时反演多个吸收带的SIF	表观反射率引入潜在误差,光谱建模假设存在局限,且受波段与插值方法影响	低	近地面	(Mazzoni等, 2006)
nFLD	O ₂ -A; O ₂ -B	线性	模型复杂度可灵活调整,适应不同应用需求	荧光光谱形状的固定假设,受大气干扰及冠层结构的影响	低	近地面	(Daumard等, 2010)
mFLD	O ₂ -B	线性	有效减少辐照度不匹配对红光波段SIF反演的干扰	结果对吸收带和参考波段选择及插值方式高度敏感	低	近地面	(Zhang和Zhang, 2025)
GARLIC	755 nm	线性	无需迭代计算,对云污染敏感度较低	简化假设,噪声干扰及云污染的影响	低	卫星(GOSAT)	(Köhler等, 2015a)
SFM	O ₂ -A; O ₂ -B	多项式或其他函数	不受光谱分辨率与采样间隔限制,对噪声不敏感	结果依赖于拟合窗口的宽度、多项式阶数、拟合SIF函数的选择	中	近地面; 卫星	(Meroni和Colombo, 2006)
FSR	640—850 nm	多项式拟合	可有效追踪荧光光谱的昼夜变化	拟合函数形式、吸收带宽度与训练集大小影响性能,假设植被结构均一,且依赖高质量传感器数据	中	近地面	(Zhao等, 2014)
F-SFM	645—805 nm	线性组合	在低分辨率和低信噪比条件下仍具高精度表现	选取基础波谱数量的方式影响反演精度	中	近地面	(Liu和Liu, 2015)
SpecFit	670—780 nm	伪福格特函数	考虑了方向效应的影响	光谱形状系数设定及仪器效应会影响性能	中	近地面	(Cogliati等, 2015b)
aFSR	640—850 nm	线性组合	更优的稳定性,受大气和方向效应的影响较小	测量中太阳与冠层辐照度存在时间滞后会引入误差	中	近地面	(Zhao等, 2018b)
aFSR-SVE	650—800 nm	线性组合	放宽对太阳辐照度和目标辐亮度同步测量的要求,减少不必要的数据采集	复杂天气条件(如卷云)下的适用性尚待探索	中	近地面	(Zhao等, 2024b)
FSM	650—800 nm	无假设	计算成本低、反演精度高	缺少对三维信息(如冠层结构)的考虑	低	近地面	(Li等, 2024)
PH	O ₂ -A; O ₂ -B	无假设	不依赖预设的荧光光谱模型或真实反射率假设,对噪声鲁棒性强	噪声干扰、吸收波段的选择、总辐照度数据的获取	低	近地面; 卫星	(Alonso等, 2014)
BSF	O ₂ -A; O ₂ -B	线性组合	在缺少大气属性参数的情景下提供可靠的SIF反演结果	对仪器特性与大气敏感	中	近地面	(Van der Tol等, 2023)
DOAS	685 nm	参考光谱或高斯函数	适用于陆地与海洋等多种环境条件,适应性强	反演结果中可能出现负值,噪声干扰	中	近地面; 卫星	(Wolanin等, 2015)

$$W_{\text{left}} = \frac{\lambda_{\text{out}} - \lambda_{\text{in}}}{\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}} \quad (8)$$

$$W_{\text{right}} = \frac{\lambda_{\text{in}} - \lambda_{\text{left}}}{\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}} \quad (9)$$

$$\tilde{E}_{\text{out}} = W_{\text{left}} \times E_{\text{left}} + W_{\text{right}} \times E_{\text{right}} \quad (10)$$

$$\tilde{L}_{\text{out}} = W_{\text{left}} \times L_{\text{left}} + W_{\text{right}} \times L_{\text{right}} \quad (11)$$

$$F = \frac{L_{\text{in}} \times \tilde{E}_{\text{out}} - \tilde{L}_{\text{out}} \times E_{\text{in}}}{\tilde{E}_{\text{out}} - E_{\text{in}}} \quad (12)$$

式中, W_{left} 与 W_{right} 代表吸收线外波段的权重系数, $\tilde{E}_{\text{out}}$ 与 $\tilde{L}_{\text{out}}$ 分别代表加权后的太阳入射与辐射亮度。3FLD算法的改进增强了算法在复杂光谱环境下的适用性和准确性, 且该算法对仪器噪声的敏感性较低, 反演结果不易低估 (Damm 等, 2011; Maier, 2002), 但 3FLD算法的线性假设条件仍存在局限性 (Cendrero-Mateo 等, 2019)。cFLD算法在 3FLD算法的基础上进一步改进 (GomezChova 等, 2006), 通过引入两个校正因子 (α_r^* 和 α_f) 表征吸收线内外反射率光谱与 SIF 的变化, 3FLD 和 FLD 方法可以视为 cFLD 的特殊情况, 其中, α_f 被设置为 1 (3FLD), 两个系数都被设置为 1 (FLD)。

$$r(\lambda_{\text{in}}) = \alpha_r^* r(\lambda_{\text{out}}) \quad (13)$$

$$F(\lambda_{\text{in}}) = \alpha_f F(\lambda_{\text{out}}) \quad (14)$$

尽管 cFLD 算法更准确地表示了 SIF 和光谱的变化关系, 但 cFLD 算法通常只适用于估算单一植被, 这是因为 cFLD 算法的原理依然基于 SIF 和反射率为线性关系这一假设, 而校正因子在不同的植被类型上有所差异 (GomezChova 等, 2006)。

SIF 光谱变化复杂, 单一的线性假设条件难以完全描述 SIF 的变化, 因此, 诸多涵盖高光谱研究资料的算法 (iFLD, eFLD) 被提出, 这类算法不再对吸收线内外的荧光光谱和反射率之间的关系做出假设。其中, iFLD 算法在 cFLD 算法的基础上改进, 假设表观反射率与反射率的形状一致, 利用观测的高光谱资料, 通过样条插值、三次卷积等算法, 计算 SIF 的校正因子 (Alonso 等, 2008)。Alonso 等 (2008) 使用模拟数据库和 ASD FieldSpec FR Pro 数据基于 iFLD 算法反演了冠层水平的 SIF, 发现 iFLD 算法能够减少 FLD 算法的偏差。敏感性分析结果还表明, iFLD 算法对 α_r^* 的不准确性会比 α_f^* 更敏感。

$$\alpha_f^* \approx \frac{E(\lambda_{\text{out}})}{\tilde{E}(\lambda_{\text{in}})} \alpha_r^* \quad (15)$$

式中, α_f^* 和 α_r^* 分别代表 SIF 和反射率的校正因子,

$E(\lambda_{\text{out}})$ 是吸收线外部的太阳辐照度, 而 $E(\lambda_{\text{in}})$ 是吸收线外部的太阳辐照度以去除大气效应而获得的吸收线内部的太阳辐照度。已有研究表明 iFLD 算法的精度相较 3FLD 算法与 FLD 算法较优 (Alonso 等, 2008; Bandopadhyay 等, 2020), 但反演精度依赖于仪器的光谱分辨率与信噪比。

eFLD 算法仅对反射率函数进行了类似于 iFLD 的假设, 对吸收带附近荧光光谱变化的规律并不作假设, 假设入射辐射光谱的局部最大值不受大气吸收的影响, 直接利用反射率光谱基准线与辐射传输方程计算 SIF (Mazzoni 等, 2006)。这种算法的优势在于能够减少大气效应的影响, 能够反演多个吸收带的 SIF, 局限性在于入射辐射光谱的局部最大值不受大气吸收影响这一假设并不符合所有真实情况, 而且在计算中使用的是表观反射率, 并非真实反射率, 可能会引入误差 (Bandopadhyay 等, 2020)。在反演塔基 SIF 时, 传感器测得的辐照度需要与冠层实际接收到的辐照度相匹配。

上述 cFLD, iFLD, eFLD 等改进假设条件的算法提升了近地面 SIF 反演的精度 (GomezChova 等, 2006), Köhler 等 (2015a) 针对于日本温室气体卫星 (GOSAT) 提出基于 FLD 的 SIF 反演算法 GARLiC (GOSAT Retrieval of Chlorophyll Fluorescence), 该算法仅使用一个拟合窗口, 不需要迭代计算, 而且对云污染的敏感度较低。验证结果表明, GARLiC 的反演结果与前人使用经验统计与 SVD 法的反演结果较一致。

2.2.1.2 基于 O_2 -B 波段的算法

FLD, 3FLD, cFLD 算法往往假设反射率与 SIF 光谱为定值或者线性变化 (GomezChova 等, 2006; Maier 等, 2004; Plascyk, 1975), 通常原理和步骤简单, 不受限于观测资料的光谱分辨率, 在 O_2 -A 波段反演结果较好, 但对于 SIF 光谱与反射率变化复杂的情况 (如位于植被反射率光谱“红边”位置的 O_2 -B 波段), 反演误差较大 (Liu 等, 2015a; Meroni 等, 2009)。

为了减小由于不同观测角度或冠层位置导致的直散射光比例差异, 从而降低红光波段 SIF 反演的方向性误差, Zhang 和 Zhang (2025) 基于几何光学理论提出了一种新的红光波段 SIF 反演算法 mFLD (modified 3FLD method)。该算法考虑了直散射光的比例, 通过计算任意观测方向上到达冠层的实际辐照度提高反演精度, 相比于传统的

3FLD算法,能够有效减少辐照度不匹配对红光波段SIF反演的影响。

2.2.1.3 基于 O_2 -A波段和 O_2 -B波段的算法

为了改善 O_2 -B波段的反演精度, Daumard等(2010)提出了反演SIF的新算法nFLD(limited number FLD, n 代表观测波段数量),当波段数为2时等同于FLD算法(Goulas等, 2017),该算法允许根据需要选择不同数量(n)的观测波段,在不同吸收带采用不同的模型(如多阶多项式)来描述反射率,从而可以灵活地调整模型的复杂度,适用于 O_2 -A与 O_2 -B波段的SIF反演。

FLD衍生算法的反演误差通常来源于以下3个方面:吸收线内外波段的选择;吸收特征之外参考波长的选取;插值算法的选择(Cendrero-Mateo等, 2019)。为了改善低光谱分辨率传感器下反演SIF的精度, SFM算法被提出,通过设置包括多个吸收线的宽拟合窗口(数十纳米),基于数学统计算法(如高阶多项式法),描述反射率光谱与SIF的变化形状,当拟合辐亮度 $L(\lambda)$ 与观测辐亮度 $L(\lambda)$ 之间差异最小时,输入的SIF光谱即为SFM反演的SIF(Meroni和Colombo, 2006)。SFM算法中,多项式阶数随着光谱吸收带不同而有所差异,如二次多项式($n=2$)适用于 O_2 -A带,而对于 O_2 -B带,则需要更高阶的多项式($n=6$)(Meroni等, 2009)。SFM适用于近地面与卫星的SIF观测,相较FLD算法, SFM算法的应用起源较晚,始于2004年, Meroni等(2004)使用光谱仪HR2000(光谱分辨率0.2 nm)在叶片水平的 O_2 吸收带上基于SFM算法的线性模型反演了SIF。随后一系列研究基于SFM算法成功反演了地面实测的SIF(Li等, 2020b; Mazzoni等, 2008; Peng等, 2022)。SFM算法不受光谱分辨率与光谱采样间隔的限制,使用吸收带附近数百个波段的高分辨率光谱信息,能有效改善在有噪声条件下的SIF反演精度,尤其是在 O_2 -B波段,但该算法运算过程中需要输入连续的光谱观测资料,运算过程复杂,时间成本较高(Mohammed等, 2019)。

2.2.1.4 全波段耦合的反演算法

上述SIF反演算法大多针对特定波段的SIF,全波段耦合的SIF反演结果能够提供更充分的量化植被光合作用的指示信息。基于SFM的全波段反演算法是SFM算法的变体,通常将全波段SIF重构为与SIF反演结果相匹配的基础光谱的线性组合(Mohammed等, 2019)。Zhao等(2014)提出了一

种用于重建全波段(640—850 nm)的SIF光谱的FSR算法,首先基于SFM从太阳光谱的5个吸收线提取了SIF的反演结果,之后使用奇异值分解SVD(Singular Value Decomposition)从SCOPE(Soil Canopy Observation, Photochemistry and Energy Fluxes)模型中提取了3个SIF基础光谱,最后通过加权线性最小二乘WLLS(Weighted Linear Least Squares)拟合确定其系数以重建光谱。实测数据的验证结果表明,基于FSR重建的光谱能较好地追踪SIF日变化。Cogliati等(2015b)提出了一种用以反演全波段荧光的基于光谱拟合的反演算法SpecFit(Spectral Fitting Based Algorithm),该算法将SFM扩展到更宽的光谱窗口,使用分段立方样条法拟合反射率,结果表明在方向效应影响较小时能够在 O_2 -A波段获取更好的精度。Specfit算法用于拟合光谱形状的拟合系数较多,在系数的选择上存在不确定性(杜珊珊, 2020),且SpecFit算法不考虑在715—735 nm之间的水汽吸收带的光谱区域(Köhler等, 2015a)。Liu等(2015b)基于PCA提出一种新的F-SFM算法来反演SIF,基于SCOPE生成的训练数据集,应用PCA算法对650—800 nm范围内的SIF进行了全谱段的建模,并基于最小二乘法估计了主成分的加权系数,验证结果表明, F-SFM即使在相对较低的光谱分辨率和信噪比下也能提供高精度的全谱段SIF信息。F-SFM与FSR算法选取基础波谱数量的方式存在主观性(杜珊珊, 2020)。为了解决这个问题, Zhao等(2018b)在FSR算法的基础上进行改进,提出一种先进的荧光光谱重建aFSR(Advanced Fluorescence Spectrum Reconstruction)法,根据贝叶斯信息准则确定反射率基础光谱的数量,使用反射率基础光谱的线性组合近似估算SIF和反射率的光谱(Zhao等, 2024a)。Zhao等(2018b)与其他3种算法(FSR、F-SFM与Specfit)的对比结果表明, aFSR算法具有更优的稳定性,受大气和方向效应的影响较小。由于太阳辐照度和冠层辐照度光谱测量通常存在时间滞后,导致SIF反演过程中存在不确定性。为减少这种时间不匹配带来的测量误差, Zhao等(2024b)在aFSR算法基础上提出了优化的aFSR-SVE算法。该算法利用奇异值分解技术对在冠层辐亮度相近时刻的太阳辐照度进行特征提取,从而有效地建模非荧光项。验证结果表明,与aFSR算法和FSM算法相比, aFSR-

SVE算法在时间滞后较大的情况下能够提升反演结果的稳定性。该算法能够放宽对太阳辐照度和目标辐亮度同步测量的要求，减少不必要的数据采集，然而，其在复杂天气条件（如卷云）下的适用性仍需进一步研究。为了克服现有全波段反演算法对于反射率训练数据集的依赖以及SIF反演的光谱范围有限的问题，Li等（2024）提出一种基于傅里叶级数的全波段SIF反演算法FSM（Fourier Series-based Method），该算法应用傅里叶级数展开式的连续求和来近似光谱范围内的反射率数据，反演精度优于aFSR算法和SpecFit算法。FSM仅使用一次计算就可以实现完整的全光谱SIF反演，具有计算成本低的优点，但由于该算法使用的SIF向量是基于二维模型SCOPE模拟的，缺少对三维信息（如冠层结构）的考虑。

基于大气辐射传输机理的反演算法精度依赖于对于大气辐射传输过程及大气状态描述的准确度（Liu和Liu，2014），这类算法受到大气效应（气溶胶光学厚度）、气压等影响较大，在O₂-A波段可达20%—200%（Guanter等，2010），针对地面观测中O₂吸收带反演SIF需要进行大气校正的问题，Van der Tol等（2023）提出适用于近地面反演SIF的带状拟合BSF（Band Shape Fitting）法，该算法能够在缺少大气属性参数，透射率估算精度不足的情况下作为辐射传输模型的替代，利用O₂吸收带的光谱信息同时反演SIF和相对光程长度（深度），该算法在100 m高的森林提供了可靠的反演结果。BSF算法的局限性在于对仪器特性与大气敏感，因此适用于近地面及高塔的SIF观测，但不适用于航空航天平台的观测。基于大气辐射传输机理的算法大多更适用于近地面观测，以避免大气效应的干扰。

2.2.2 基于简化物理模型的算法

简化物理模型的SIF反演算法主要包括DOAS，小波分解WD（Wavelet Decomposition）等算法。其中，DOAS算法原理是以大气中的气体分子对于紫外和可见光波段的特征吸收为基础，根据窄带吸收强度推断痕量气体的浓度和类型（倪卓娅等，2021）。Wolanin等（2015）基于DOAS技术通过耦合的海洋—大气辐射传输模型SCIATRAN反演了海洋SIF观测结果，并与中分辨率成像光谱仪MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）产品比较，并证实了这一算法

应用于陆地SIF反演的适用性。DOAS算法把SIF视作一种痕量气体，引入差分概念，则：

$$-\ln \frac{L(\lambda, \theta)}{E_g(\lambda, \theta)} = \sum_{n=1}^N \sigma'_n(\lambda) S_n + \sigma_{\text{Ray}}(\lambda) S_{\text{Ray}} + \sigma_{\text{Mile}}(\lambda) S_{\text{Mile}} + \sigma_f(\lambda) S_f + \sum_{m=1}^M a_m \lambda_m \quad (16)$$

式中， $\sigma_f(\lambda)$ 表示气体的横截面积， S_f 表示气体的柱密度，通过在波谱窗口之中拟合求解荧光项系数，从而求解SIF。DOAS算法被应用于近地面和卫星SIF的反演（Grossmann等，2018；OCO-2 Science Team等，2020）。该算法的优势在于反演SIF时能够适应陆地和海洋不同的环境条件，缺点在于需要解决反演结果中可能出现的负值问题，这些负值可能是由噪声数据引起的，或者是由于对水汽和拉曼散射的校正被高估所致。

现有的SIF反演算法（如FLD，3FLD）大多会对荧光和反射率的变化关系做出假设，反演算法的精度依赖于假设的准确性，对荧光光谱形状不做假设的算法能够避免由于不正确或不同空间尺度和反演算法之间的荧光模型而产生的偏差，允许反演不同测量条件设置下的荧光光谱形状。Alonso等（2014）提出基于辐射吸收特征来反演SIF的峰高PH（Peak Height）算法，它不依赖于对荧光光谱的预定义模型，也不需要真实反射率的假设。该算法在不同植被类型的冠层和大气状况的评估显示了其的优越性，即使在有噪声的数据下，相对均方根误差RRMSE（Relative Root Mean Square Error）也小于10%。然而，PH算法需要获取总辐照度数据，而且只能在特定的吸收波段内反演SIF，在这些波段之外，无法进行SIF反演。结合WD技术的反演算法能够有效解决这一问题，WD是一种信号分析的算法，其基本原理是利用小波函数对信号进行分解，小波函数是一种局部化的基函数，可以将信号分解成不同尺度和频率的成分（陆文星等，2024）。Oehl和Damm（2023）利用WD技术基于反射辐射光谱和无荧光的参考辐射，同样对荧光光谱未做任何关于光谱形状的假设，仅用抛物线模型拟合反射率的形状，提出基于小波分解的SIF反演算法WAFER（Wavelet Decomposition Fluorescence Retrieval）算法，相较SFM算法在验证数据集上的反演精度更优，但对于噪声数据的稳定性弱于SFM。该算法的优势在于能够灵活选择波长窗口，并利用整个

光谱范围内的数据，无需大量的训练数据集，缺点在于计算成本高，对反射率的抛物线假设较为单一，且难以区分反演的SIF与仪器效应导致的零值偏移。

总体而言，基于简化物理模型的SIF反演算法依托于其他常用的物理模型来反演SIF，形式较为简单，但对于仪器属性（如信噪比）要求较高，而且对噪声数据和杂散光敏感（张立福等，2018），

在光谱卷积过程中原始太阳光谱数据源及传感器光谱响应函数的选择会造成系统误差。

2.3 基于经验统计的算法

为了减弱大气效应对于SIF反演的影响，基于经验统计的算法得到了迅速发展，通常包括SVD与PCA的统计算法（表2），将非线性的大气层顶辐射使用方程转化为用少数主成分代表的线性方程，进而求解出SIF（Sun等，2018）。

表2 基于经验统计的算法
Table 2 Empirical statistic-based algorithms

反演算法	荧光波段/范围	反演窗口内对SIF形状的假设	优点	缺点/误差来源	计算成本	适用平台	参考文献
WAFER	O ₂ -A; O ₂ -B	无假设	可灵活选择波长窗口, 无需依赖大量训练数据集	噪声及仪器效应的影响, 反射率的抛物线假设	高	近地面; 卫星	(Oehl和Damm, 2023)
SVD	755 nm; 770 nm	恒定	运行效率高, 结果鲁棒性强, 无需对光谱形状和太阳辐照进行建模	参数选取 (如奇异向量数), 拟合窗口宽度	中	近地面; 卫星	(Guanter等, 2013)
pFLD (PCA)	740 nm	高斯函数拟合	提升了O ₂ -B波段SIF的反演精度, 在低反射率和低信噪比条件下表现稳定	参数选取 (如主成分个数, 多项式阶数, 拟合的荧光函数等)	低	卫星	(Liu和Liu, 2015)
SFM-PCA	O ₂ -B	高斯函数拟合	相比传统算法 (如FLD类和SFM算法) 反演精度更高, 与远红光SIF结果一致性更好	SCOPE模型的假设, 复杂的冠层结构及多变的环境条件, 模拟光谱与实测光谱之间的差异	低	近地面; 卫星	(Du等, 2024)
RANSAC	O ₂ -A	无假设	具备较强的抗异常值和抗噪声能力	参数选取 (如迭代次数, 阈值等), 大气 (温度、气压、气溶胶) 干扰	中	卫星	(Zhou等, 2020)

基于SVD的SIF反演算法从光谱数据本身的特性出发，将传感器接收的辐亮度信号表示为光谱非平滑项（吸收谱线特征）和光谱平滑项（荧光光谱和地表反射率光谱）的组合，需要较高的光谱分辨率数据（<0.05 nm）及足够数据量的训练光谱，从而在较窄的反演窗口（约2 nm）内估算SIF（Guanter等，2012），在卫星与近地面的SIF观测中都得到了应用（Chen等，2022a）。不同平台的SVD反演过程有所不同，在星载SIF反演中，无SIF训练集通常来源于全球范围内的冰雪、裸地或沙漠地表观测的星上辐亮度信号（Li等，2021），因为这些地表类型通常不包含SIF信号。而在地面塔基观测中，奇异向量的计算则来源于对下行太阳辐照度光谱进行特征提取或地面观测的无SIF像元（如参考板等）（杜珊珊，2020；鄢列慎等，2023；张立福等，2018）。Guanter等（2013）提出了基于SVD与多项式拟合的SIF反演算法，基于奇异值分解表征非荧光光谱的结构，使用包含

（氧气和水汽）大气带拟合窗口反演SIF，发现该算法能有效减少反演结果中的噪声。Wang等（2020a）对SVD算法和3FLD算法进行了性能评估，发现在冠层尺度上，两种算法的反演结果表现出良好的一致性，这证明了SVD算法的应用潜力。SVD算法往往运行速度快，反演结果鲁棒性较高，而且不需要对光谱形状、太阳辐照数据进行建模，能够在由于不同光谱仪、光路匹配误差以及光照变化等因素导致同步太阳光谱缺失的情况下，依然实现SIF的反演。但SVD算法的参数（如奇异向量数）会对结果的准确度造成影响（Bandopadhyay等，2020）。

PCA是一种使用广泛的数据降维方法，主要思想是将 n 维特征映射到 k 维上，这 k 维是全新的正交特征也被称为主成分。基于PCA的SIF反演算法使用较粗的光谱分辨率数据（0.5 nm）在较宽的光谱窗口（>30 nm）内反演SIF，更多地适用于卫星SIF的反演（Joiner等，2013）。Liu和Liu（2015）

基于PCA提出pFLD (PCA-based FLD) 算法, 利用模拟的主成分光谱拟合吸收线内外的荧光光谱与反射率, 与FLD和3FLD算法相比, pFLD算法明显提升了O₂-B波段的SIF反演精度, 而且在光谱反射率和信噪比较低的时候该算法也表现出良好的适用性。基于PCA的算法将整个辐射信号视为非荧光和荧光的总和, 然后使用主成分来表示变量。

$$L(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{\pi} \sum_{i=1}^{n_r} a_i \phi_i + \sum_{j=1}^{n_f} b_j \phi_j \quad (17)$$

式中, ϕ_i 和 ϕ_j 是第 i 个主成分对应的反射率与SIF, a_i 和 b_j 是第 i 个主成分的权重系数, n_r 和 n_f 是反射率和SIF对应的主成分数。在基于PCA反演SIF的方法中, 多项式阶数、主成分数量、拟合的荧光函数、反演波段以及反演窗口的宽度都会影响SIF反演的精度 (Jiang 等, 2023; Morata 等, 2021; Zou 等, 2021)。基于PCA的算法形式简洁、运算效率高, 相较SFM算法, 基于PCA的算法反演的SIF能够减弱由于太阳和观测角度带来的偏差, 但反演精度通常会受到参数设置的影响 (Sun 等, 2021)。Sun 等 (2021) 探讨了主成分数量及反演波段对于PCA算法精度的影响, 结果表明, 只反演近红外区域可以显著提高SIF的反演精度, 此外, 在基于PCA的SIF反演中使用3个主成分会更准确。反演窗口的宽度也会对反演精度造成影响, Van Schaik 等 (2020) 在 Sanders 等 (2016) 基于PCA算法的基础上进行了改进, 提出了陆地生态系统叶绿素荧光反演SIFTER (Sun-Induced Fluorescence of Terrestrial Ecosystems Retrieval) v2算法, 该算法采用了更窄的光谱反演窗口和更少的主成分数, 从而有效减小了氧气和水汽吸收的影响。针对O₂-B波段反射率真实形状建模困难的问题, Du 等 (2024) 提出了一种基于PCA的改进光谱拟合算法 (SFM-PCA)。该算法利用PCA构建了无SIF贡献的反射率数据集, 从而更准确地对反射率的光谱形状进行建模。该算法在红光波段的地基SIF反演中, 相较于传统算法 (如FLD类算法和SFM算法) 反演精度有所提升, 而且其反演结果与远红光波段的SIF更为一致, 但由于SCOPE模型的假设、复杂的冠层结构及多变的环境条件, 模拟光谱与实测光谱之间的差异可能导致反演结果的不确定性。

数据噪声会影响SIF反演的精度, 已有的诸多SIF反演算法 (如PLS) 对于噪声敏感, 随机样本一致性RANSAC (Random Sample Consensus) 算法

是一种迭代的参数估计算法, 用于从包含噪声和异常值的观测数据中估算模型参数 (Fischler 和 Bolles, 1981)。Zhou 等 (2020) 基于RANSAC算法进行SIF反演, 其反演结果与OCO-2卫星的SIF产品表现出较高的一致性 ($R^2 = 0.81$), 并且在空间分布细节方面表现更优。该算法能较好地解决异常值与噪声的问题, 但性能同样依赖于参数的设置 (如迭代次数, 阈值等)。

总体来说, 基于经验统计的算法能够提升SIF反演的效率, 在一定程度上对光谱分辨率和大气传输的要求不高, 不需要对复杂的大气传输过程进行建模, 但反演精度受到训练集、反演波段、以及训练参数的限制 (吴霖升 等, 2022)。

2.4 基于机器学习的算法

随着人工智能的发展, 结合机器学习的算法在SIF反演中得到应用, 相较传统算法能够提升在复杂数据中提取参数的能力 (表3)。偏最小二乘法PLS (Partial Least Squares) 是一种经典的机器学习算法, 结合了多元线性回归、主成分分析和典型相关分析的思想, 通过最小化误差平方和来寻找数据集中一组观测的最佳函数匹配。Naethe 等 (2022) 基于PLS算法构建了一种用于基于太阳FLs反演SIF的算法, 结合降维与多元统计回归思想, 以辐射为输入变量, SIF为输出变量, 该算法的反演结果与SFM, SVD传统算法表现出较好的一致性, 并在其研究中的日变化数据集上展现出更高的计算效率, 运行时间比SFM算法快约37倍, 同时无需给出模型的具体表达形式。此外, 结合FLs的算法能够避免大气重吸收的影响, 因此不需要进行复杂的大气校正。然而, PLS算法对仪器噪声较为敏感, 在信噪比较低的情况下, 反演误差较大。因此, 该算法不适用于存在大量噪声的情况 (Naethe 等, 2022)。而另一种结合傅里叶变换与监督式机器学习的算法能够考虑光谱数据的噪声, 基于傅里叶变换的算法在光谱信号分析中应用广泛, 该算法将一个信号表示成三角函数的组合 (Fereidouni 等, 2012)。Scodellaro 等 (2022) 提出了一种新的结合傅里叶变换—机器学习的算法 $i-\varphi$ -MaLe (A Novel Hybrid Phasor-Machine Learning-Based Approach), 基于离散傅里叶变换的光谱窗口计算结果, 通过监督式机器学习从全球范围内同时反演了冠层和光系统水平的SIF, 并

与Specfit算法对比，在农田与森林的实验数据中展示了该算法的可靠性。该算法的优点在于训练速度快，能够提供除荧光外的其他生物物理参数（如LAI），但该算法的精度依赖于噪声与训练集的大小，依赖于耦合的MODTRAN-SCOPE辐射传输模拟，对实验测量的准确性取决于SCOPE对特定冠层的有效代表性，因此与FLD、SFM、SpecFit等不依赖于辐射传输模型的简单算法相比，该算法在研究不同类型冠层时适用性可能受限。近年来，

基于深度学习的算法在SIF反演中也有所应用，Buffat等（2025）开发了一种基于DESI高光谱影像在O₂-A波段进行SIF反演的方法，训练了一个基于模拟的自监督神经网络SFMNN（Spectral Fitting Method Neural Network），充分利用深度学习对复杂非线性关系的建模能力，同时引入物理先验知识减少过拟合、提升可解释性，但反演精度会受到正则化参数选取的制约。

表3 基于机器学习的算法
Table 3 Machine learning-based algorithms

反演算法	荧光波段/范围	反演窗口内对SIF形状的假设	优点	误差来源	计算成本	适用平台	参考文献
PLS	O ₂ -A;O ₂ -B	无假设	运算效率高,无需明确给出模型形式,亦不需要复杂的大气校正过程	数据分布假设,噪声干扰及仪器信噪比的影响	中	近地面;卫星	(Naethe等, 2022)
φ-MaLe	O ₂ -A;O ₂ -B	无假设	训练速度快,除荧光外还能反演其他生物物理参数(如LAI)	噪声干扰,训练集大小,SCOPE对特定冠层的有效代表性	高	近地面;卫星	(Scodellaro等, 2022)
SFMNN	O ₂ -A	无假设	具备较强的非线性拟合能力,引入先验知识可提升模型可解释性	模型训练正则化参数设置,过拟合风险	高	卫星	(Buffat等, 2025)

2.5 基于辐射传输模型的反演

光在介质中传播的辐射传输理论已经成功应用于天体物理、大气辐射、植被生长状况监测等多个领域（Ross, 1981）。基于辐射传输模型RTM（Radiative Transfer Model）在通过查找表反演SIF的同时，可以同时计算相关的生物物理参数（如叶绿素含量、叶面积指数等）与相关变量（如光合作用有效辐射吸收分数等），这些信息能够进一步解释SIF与光合作用的关系（Mohammed等，2019）。基于辐射传输模型反演SIF的方法通常需要应用可见光与近红外波段的光谱信息以调整模型参数，但目前难以基于同一传感器获取宽光谱范围内的高分辨率光谱，这可能会导致空间配准、辐射校正方面的误差。因此，在基于多个卫星传感器反演SIF时，需要进行高精度的光谱数据配准与辐射校准（Celesti等，2018）。

大多数数值模拟基于均匀的一维场景和朗伯假设（图6），即地表在垂直方向上是均匀的，并且地表对辐射的反射在各个方向上保持一致（Damm等，2011；Liu等，2015b；Meroni等，2010），并且在模型模拟中仅在少数情况下考虑了双向反射分布函数，往往忽略了冠层结构对BRDF（Bidirectional Reflectance Distribution Function）的

影响，在反演复杂植被类型的SIF时，通常难以避免由于冠层异质性而引起的估算误差（Liu和Liu，2018；Mazzoni等，2010；Zarco-Tejada等，2013）。三维辐射传输模型如FluorWPS（Fluorescence model with Weighted Photon Spread method）、FluorFLIGHT，提供了更先进的策略来计算异质植被冠层中的SIF反演精度（Zhao等，2016）。在本节，我们将会对用以反演SIF的辐射传输模型做一个系统的概述。

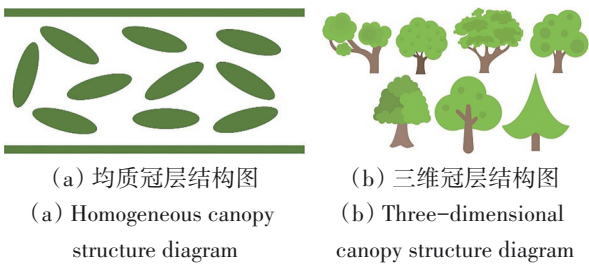


图6 植被冠层结构描述图
Fig. 6 Illustration of vegetation canopy structure

2.5.1 一维辐射传输模型

当前，大多数SIF反演的一维辐射传输模型是基于Verhoef（1984）的Sail（Scattering of Arbitrarily Inclined Leaves）模型的延伸（Kuusk，1994；詹春晖等，2020）。Sail模型使用4个线性方程描述叶片内的辐射传输过程。Miller等（2005）在Sail模型

的基础上, 结合大气辐射传输模型 MODTRAN4, 提出了反演冠层尺度 SIF 的 FluorSAIL 模型, 其光谱分辨率为 1 nm, 波段范围为 400—1000 nm。该模型使用来自 FlurMODleaf 模型输出的反射率、透过率以及描述荧光发射的矩阵信息作为叶片输入参数, 最终输出冠层尺度的 SIF。Miller 等 (2005) 同时开发了另一个针对于叶片尺度 SIF 反演的 FlurMODleaf 模型, 这个模型与 FluorSAIL 模型隶属于 FluorMOD 项目, 该模型基于广泛使用和验证的 PROSPECT 叶片辐射传输模型 (Jacquemoud 和 Baret, 1990) 开发, 沿用了 PROSPECT 模型的输入参数与输出的反射率、透过率, 模拟了叶片反射和透射中的叶绿素荧光, 考虑了树冠内的辐照度分布, 能够模拟叶片内部的辐射传输过程 (詹春晖 等, 2020)。

Van der Tol 等 (2009) 将辐射传输与能量平衡过程相结合, 提出了一维辐射传输模型 SCOPE, 能够反演 0.40—50 μm 波段的 SIF 及反射光谱。模型的输入参数为叶片结构参数、光学参数、气象数据等, SCOPE 主要基于 SAIL 模型模拟冠层辐亮度、净辐射以及光合有效辐射, 之后模拟叶片光合作用与表层温度等, 通过输入 Fluspect-B 模型的结果及冠层光和有效辐射来模拟 SIF 在冠层的传输对于叶片冠层结构定义与 SAIL 模型相同 (詹春晖 等, 2020)。SCOPE 模型结构较为复杂, 计算量较大, 在站点尺度应用较多 (詹春晖 等, 2020)。而且尽管 SCOPE 模型可以可靠地模拟冠层 SIF, 但需要考虑荧光量子效率的季节性变化或其与植物生理状态的依赖性 (Hu 等, 2018b)。Celesti 等 (2018) 基于简化的 SCOPE 模型, 结合高光谱遥感数据, 反演了冠层 SIF 的全谱, 荧光效率 (Φ_F) 以及控制光吸收和重新吸收的主要植被参数, 该算法与 SFM, Specfit 算法的反演结果呈现出较好的一致性。然而, 这一算法在对比时采用的植被数据经过化学处理, 尚缺乏该算法对于自然植被或卫星数据适用性的验证。Yang 等 (2021) 结合 mSCOPE 模型, 提出了用于定义具有垂直非均匀冠层的 SCOPE 2.0 模型, 但该模型仍缺乏处理水平异质性冠层的能力。叶片属性的垂直差异性可能会对植被冠层内的辐射变化和 SIF 产生影响, Yang 等 (2017) 在 SCOPE 模型的基础上进行改进, 提出了能够模拟具有垂直异质性冠层 SIF 的 mSCOPE 模型, mSCOPE 在垂直方向能够最多输入 60 层的叶

片属性数值, 通过比较该模型与原始 SCOPE 模型的模拟结果与实测数据, 结果表明考虑叶片垂直异质性能更好地预测玉米衰老期的 SIF。FLD 类算法和 SFM 类算法通常需要较高的光谱分辨率数据, 以及假设植被冠层是朗伯的。为了克服这一局限性, Verhoef 等 (2018) 提出一种基于 BSM 模型的新算法, 这种算法利用模拟的顶层辐射数据反演 SIF, 该算法在正确的大气参数下反演结果精度较高, 但这种方法仅适用于特定的 FLEX (Fluorescence Explorer) 和 Sentinel-3 卫星。

BEPS 是一种基于过程的模型, 采用 FvCB 光合模型估算叶片尺度的光合作用 (Farquhar 等, 1980) 能够通过累加阳光叶和阴影叶分量上的光合速率计算冠层 GPP。Qiu 等 (2019) 考虑了冠层散射对于 SIF 估算的影响, 将荧光模型与 BEPS 模型相结合, 提出一种用于全球 SIF 估算的 BEPS-SIF 模型, 该模型的结果能够较好地描述全球 SIF 分布及季节性变化。Cui 等 (2020) 提出了一种结合 SCOPE 与 BEPS 的模型, 其基于阴阳叶分离原理, 能够有效描述 SIF 与环境因子之间的非线性关系。该模型基于 BEPS 计算了 SIF, 简化了 SCOPE 模型中的辐射传输过程, 从而提升了模型的计算速度和精度, 使其适用于大范围乃至全球范围内的 SIF 反演。然而, 在应用于针叶林时可能会出现高估现象, 需要进一步的校正。

TBM_s 模型能够描述叶片和冠层尺度荧光发射的关键过程。Parazoo 等 (2020) 耦合了包括 BEPS, SCOPE 在内的多个模型估算了 SIF, 并与地面实测 SIF 进行了分析, 但模型在强光条件以及夏末降水增加时, 会产生估算偏差。需要进一步考虑入射辐射传输、水分胁迫对光合作用的影响以及叶片能量分配机制等因素, 以提高 SIF 估算的准确性。

2.5.2 三维辐射传输模型

一维辐射传输模型通常假设植被冠层水平方向各向均一, 多适用于草地、农田等简单植被类型的估算 (詹春晖 等, 2020)。但对于森林等复杂的植被类型, 大气 (10—1000 km^2) 和植被冠层 (0.01—1 km^2) 空间尺度通常差异很大, 在晴朗天气条件下, 大气通常可以被视为连续介质, 而植被冠层通常被表示为在公里尺度及以上的异质和复杂的三维场景 (Zhao 等, 2022), 需要发展具有

水平和垂直异质性的复杂三维树冠中的SIF辐射传输模型(Hornero等, 2021; Liu等, 2019a)。尽管三维辐射传输模型能更全面准确地描述树冠内复杂的散射过程, 但由于计算成本较高, 通常只适用于小尺度(如30 m)的植被监测, 而难以在景观尺度(如>100 m)上监测植被的生长状态(Li等, 2022)。

蒙特卡洛光线追踪算法MCRT(Monte Carlo Ray-Tracing)分为前向追踪与逆向追踪, 为在具有任意结构复杂度的植被冠层中模拟光子传输过程的方法, 能够描述植被冠层的辐射传输过程。Zhao等(2016)提出了一种用于模拟三维冠层中SIF的辐射传输模型FluorWPS, 该算法基于蒙特卡洛光线追踪算法MCRT(Monte Carlo Ray-Tracing)构建, 基于权重减少与光子扩散WPS(Weighted Photon Spread)估算SIF, 仅追踪对观测方向有贡献的光子, 提升了运算效率, 通过田间测量数据对该模型性能进行了评估, 发现FluorWPS与SCOPE模型的模拟SIF分布较为一致。Tong等(2021)对FluorWPS模型的反演结果与DART模型进行了比较, 发现二者一致性较好。FluorWPS模型的改进方向包括不同类型森林植被的结合及参数化方法的优化。

FLiES模型通过考虑景观异质性对辐射过程的影响, 确定能量、水分和碳交换相联系的过程。Sakai等(2020)使用MCRT算法对FLiES模型进行了改进, 创建了FLiES-SIF模型, 考虑了森林冠层内的多次散射过程, 能够分别计算受阳光照射和阴影下的叶片SIF。Kallel(2020)基于利用三维向量辐射传输理论VRT(Vector Radiative Transfer)和MCRT方法, 提出一种在叶片和冠层水平上模拟SIF的FluLCVRT模型, 并考虑了叶绿体内部的荧光产生机制。研究发现, 叶片的水平和垂直结构对荧光发射和反射产生显著影响, 特别是在红光和近红外波段。

针对植被冠层异质性导致的混合像元中SIF反演误差较大的问题, Zarco-Tejada等(2013)在FluorSAIL和FluorMODleaf模型的基础上, 结合FLIM(Forest Light Interaction Model)模型, 建立了能够描述非均质植被冠层的FluorFLIM模型。该模型能够根据覆盖百分比估算冠层SIF, 与纯像元反演结果相比, 取得了更好的精度($R^2 = 0.72$, $p < 0.01$)。辐射度方法(Radiosity Method)是一种

描述光在三维朗伯表面反射、散射及多次散射的方法(Borel等, 1991)。Zhao等(2018a)将该方法引入植被冠层SIF反演研究中, 并利用辐射度法构建了FluorRGM(Fluorescence Model with Radiosity-Graphics Combined Method)模型, 用于模拟三维冠层中的SIF反演。FluorRGM与FluorWPS模型的反演结果较为接近, 验证了该模型的准确性。从受阳光照射的树冠像元中提取的SIF与树木生理状况存在显著关系, 但在较低分辨率下使用混合像元时关系较差。为了解决在粗空间分辨率下基于混合像元反演SIF时精度受限的问题, Hernández-Clemente等(2017)基于三维辐射传输模型FLIGHT提出了FluorFLIGHT模型, 能够在不同空间分辨率下反演SIF, 有效提升了在混合像元下反演SIF的准确性。在中低分辨率图像中, 混合像元涵盖了土壤和植被, 可能导致混淆, 限制了对冠层尺度的SIF的理解。Hornero等(2021)通过考虑树冠、林下植被和土壤背景的影响, 对FluorFLIGHT模型进行了改进, 并利用HyPlant收集的航空数据进行了验证, 从而提高了SIF反演的准确性。离散各向异性辐射传输DART(Discrete Anisotropic Radiative Transfer)模型是由法国图卢兹的CSEBIO实验室开发的, 模拟了异质性的三维场景中的辐射传输(Gastellu-Etchegorry等, 1996), 通过离散顺序技术来追踪光线在不同方向上的传播, 将三维场景离散为一系列空间相邻的体元, 根据光学特性和结构参数(如叶绿素含量, LAI等)计算不同体元或面源的散射函数, 通过迭代模拟场景内的多次散射, 能够涵盖从紫外到热红外波段的光谱范围。Malenovský等(2021)将Fluspect-Cx模型与DART模型相结合, 将SIF反演从叶片尺度上升至三维冠层尺度。对于均质冠层, DART模型的反演结果几乎与两个现有模型(SCOPE, mSCOPE)模拟的SIF相同(均方根误差 $<0.221 \text{ mW/m}^2/\text{nm/sr}$)。在三维冠层中, DART模型能够更好地度量植被冠层中SIF信号的复杂变化。

随机辐射传输方程SQTE(Stochastic Radiative Transfer Equation)将三维冠层结构通过概率函数参数化, 从而将复杂的三维辐射简化为一维(Shabanov等, 2000)。Zeng等(2020)开发了基于逃逸与再碰撞概率的荧光辐射传输模型FluorRTER(Fluorescence Radiative Transfer model based on Escape and Recollision probability), 能够

模拟具有均匀叶片和间隙的不连续冠层中的 SIF。FluorRTER 模型对一维均匀冠层和三维异质冠层进行 SIF 模拟时与 SCOPE 模型和 FluorWPS 模型吻合良好。对于 SCOPE 模型，685 nm 和 740 nm 处方向观测到的 SIF 的平均相对误差 ARE (Average Relative Error) 仅为 4.6% 和 1.5%，对于 FluorWPS 模型分别为 7.7% 和 2.6%。

由于各种害虫，如落叶虫和木质虫的危害，全球范围内的森林受到了广泛破坏。现有的 SIF 辐射传输模型可以模拟具有均匀叶片和间隙的不连续冠层中的 SIF，但通常忽略了由害虫引起的树冠内的异质性。Li 等 (2020a) 通过扩展随机辐射传输 SRT (Stochastic Radiative Transfer) 中的随机矩表达式，提出了一种用于模拟森林冠层双向反射率因子的方法，该方法考虑了不同受损叶片分布的情况。随后，Li 等 (2022) 进一步提出了 FluorESRT 模型，用于模拟具有受损叶片异质分布的森林的 SIF。FluorESRT 模型经过了一维模型 SCOPE 和三维模型 DART 的验证。该模型可以评估树冠 SIF 和表观反射对害虫损害水平的敏感性。

3 SIF 遥感反演平台

为了保证 SIF 反演的准确性，除了反演算法本身的性能外，反演精度在很大程度上依赖于观测

平台和仪器设备所提供的数据质量，因此了解应用于 SIF 反演的平台设备至关重要。本节主要针对从 1970 年代至今的 SIF 反演的平台设备发展状况进行总结，包括了众多涵盖地面、无人机、卫星平台 (“星—空—地”) 的研究 (图 7)，同时概述了有关各种反演波段、仪器设备、反演产品等信息。SIF 反演的研究最初主要基于地面观测平台，这得益于地面仪器较易获取的优势。地面观测数据因受大气干扰较少而具有较高的精度和可靠性，能够对单个叶片或局部区域进行连续高精度的观测，使其能够为卫星数据产品和模型验证提供精确的实测数据支持，然而，其主要局限在于观测覆盖范围有限，难以实现广域或全球尺度的连续监测 (Zhang 等, 2022b)。随着航空航天技术的发展，一些传感器为大尺度，高时间分辨率的全球 SIF 反演提供了数据源 (Köhler 等, 2018)。SIF 卫星反演产品在植被物候监测，植被干旱胁迫，作物估产等方面应用广泛 (Peng 等, 2020; Wang 等, 2023)。现有的探测 SIF 的卫星传感器大多并非专门为 SIF 设计的，而且时空分辨率往往相互制约，未来，随着更多高时空分辨率的卫星传感器 (如 FLEX) 的发射，高精度、精细尺度的 SIF 反演研究有望成为可能 (Coppo 等, 2017; Drusch 等, 2017)。

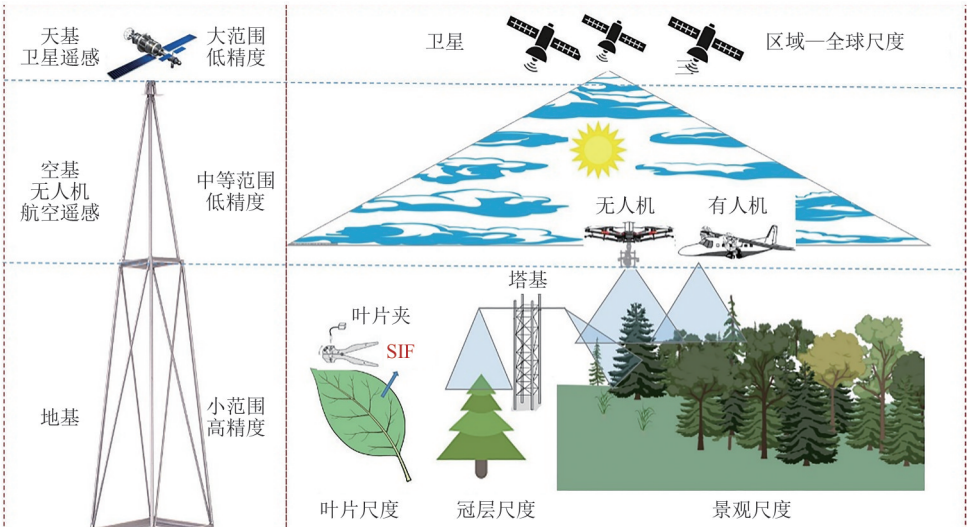


图7 多尺度下的多平台 SIF 观测

Fig 7 Multi-Platform SIF observations at multiple scales

3.1 地面平台 SIF 反演

早期的 SIF 反演工作主要是在地面平台上进行的，而且得到了广泛应用，地面反演的 SIF 不仅有

助于深入了解从叶片至冠层尺度的物质与能量交互作用，还可以为机载和卫星观测提供实测数据，用于参考和验证。地面冠层光谱观测的起源可以

追溯到人工测量时代,自20世纪80年代起,研究人员便利用各种SIF观测仪器对植被进行地面反演。最早反演SIF的研究起源于1980年,McFarlane等(1980)基于FLs运用标准FLD算法,使用FLD MARK II在三条夫琅禾费暗线(486.1 nm, 589.0 nm, 656.3 nm)上反演了SIF(Plascyk, 1975)。叶片尺度(仅单叶)观测起源于SIF研究初期,至今仍广泛用于植被光合响应与荧光机制的研究(Middleton等, 2015)。常用仪器包括在叶片尺度上反演SIF的FLD MARK II、夫琅禾费暗线辐射计FLR(Fraunhofer Line Radiometer)、双探测器及多通道版本PMFD(Evain等, 2001, 2002),FluoWat等叶片夹设备等。

已有的地面观测仪器中,FluoWat等便携式叶片夹设备因其测量区域明确、几何可控、标准化程度高等特点,已成为叶片尺度SIF研究的重要工具(Middleton等, 2015)。FluoWat叶片夹由西班牙瓦伦西亚大学研发,是一款定制化的便携式叶片夹,旨在田间(以太阳光为光源)或实验室环境下实现一致性的反射率与荧光光谱测量(Van Wittenberghe等, 2013, 2015)。测量时,需将夹具的开放进光口直接对准光源,以固定的45°角度照射夹持的叶片,同时通过连接光谱仪(如ASD FieldSpec 3, Malvern Panalytical, Analytik Ltd; Cambridge, United Kingdom)的光纤采集信号(Huemmrich等, 2022)。在荧光测量过程中,FluoWat需在进光口处依次安装两个低通滤光片,分别阻断波长高于650 nm和700 nm的入射辐射,从而确保长波段信号仅来源于叶绿素诱导荧光(图8)。为实现稳定的观测几何结构,设备配有垂直定位十字星辅助操作者调整方向:当太阳光准确照射至十字星中心形成明亮光斑时,即为理想测量角度。由于进光口直径仅约1 cm,FluoWat对太阳入射角度较为敏感,稍有偏离便可能导致叶片被遮挡,从而影响数据质量(吴霖升等, 2022)。

传统的地面观测仪器为SIF研究提供了关键的观测数据支撑,但这类观测方式不仅费时费力,由于测量效率低、重复性差(杜珊珊, 2020; McFarlane等, 1980),难以满足当前对高频次、长时间序列的荧光观测需求。近年来,地面自动观测光谱测量技术与观测装置迅速发展,这种观测方式通过将非成像光谱仪放置于通量塔站点或附

近,自动获取长时序的反射率与光谱数据,与叶片尺度的测量相比,塔基测量方式具有连续高频的优点。目前已部署了许多自动连续地观测冠层尺度(整个植被冠层,包含多个叶片的贡献)SIF和植被指数的系统(表4),如TriELEX(Daumard等, 2010)、HSI(Meroni等, 2011)、SpectroFLEX(Fournier等, 2012)、SFLUOR(Cogliati等, 2015a)、FluoSpec(Yang等, 2015)、SIF-Sys(Burkart等, 2015)、FloX(Julitta等, 2017)、FluoSpec2(Yang等, 2018)、AutoSIF(Hu等, 2018a)、Photospec(Grossmann等, 2018)、FAME(Gu等, 2019)、SIFSpec(Du等, 2019)、SIFprism(Zhang等, 2019a)、SIFmotor(Zhang等, 2022c)、4S-SIF(Kim等, 2022)、HyScreen(Peng等, 2022)。这些通常为视场角为180°的双半球系统对冠层辐射进行采样(如FAME, SIFprism, 4S-SIF),或为视场角约为25°的半球锥形系统(如FluoSpec2, Photospec, HyScreen)。Zhang等(2019a)研究发现,在地面观测时,与半球锥形系统相比,使用双半球配置的系统具有更大的视场,适合观测异质冠层,并更好地匹配涡度通量系统的足迹大小。相较双半球配置的系统,半球锥形系统所受大气散射的影响较小(Chang等, 2020a)。单个系统通常配备两个光谱仪,其中用于SIF反演的光谱仪具有高光谱分辨率和与信噪比SNR(Signal-to-Noise Ratio)(目前主流传感器为HR系列光谱仪与QE pro系列光谱仪),用于SIF反演,另一个光谱仪涵盖了可见光到近红外波段,用于计算植被指数(如HR2000+)。由于塔基观测时系统安装位置及观测高度较为固定,通常需要将观测足迹的大小与观测目标的空间异质性作为考虑要素。尽管目前国内研究团队基于不同植被类型构建了诸多SIF长时序自动观测系统,但各观测系统的测量方法、传感器设置、数据处理流程存在着很大的差异,大范围乃至全球规范网络的建设及联合多站点观测数据的应用仍存在极大挑战(杜珊珊, 2020)。

如今的一些研究机构能够同时提供SIF与EC通量观测的数据,如监测范围为全球的SpecNet(<http://specnet.info> [2025-05-27])与FLUXNET(<https://fluxnet.fluxdata.org/> [2025-05-27])、主要用于观测欧洲的EUROSPEC(<https://eurospect.eu> [2025-05-27])和主要用于观测中国区站点的连续SIF观测网络ChinaSpec(<https://chinaspec.nju.>

edu.cn/[2025-05-27]]，但横跨多年和多个站点的实测 SIF 数据仍有限。为了解决现有实测 SIF 数据集不足的问题，Du 等（2023）发布了涵盖中国区 6 个站点和美国 1 个站点 2018 年—2021 年的红光与远红光的实测 SIF 数据，Wu 等（2024a）发布了美国玉米带 2016 年—2021 年间 15 个站点年 760 nm 的实测 SIF 数据。基于大气辐射传输机理的反演算法往往需要同时测量向下的太阳辐照度和向上的冠层辐亮度为输入（Wu 等，2024a）。然而，用于辐照度测量的白色参考板和余弦接收器都容易受到雨水和灰尘的污染，这使得难以基于这些方法构建无人值守的自动 SIF 测量系统，这一技术问题是缺乏时间序列冠层 SIF 数据的主要原因。为了解决这一问题，可以通过使用特定的无需完全校准参考板的观测系统来获取光谱，并使用更高光谱分辨率（小于 0.05 nm）的测量设备以及限制 FLs

（745—758 nm）的使用范围（Wang 等，2017）。

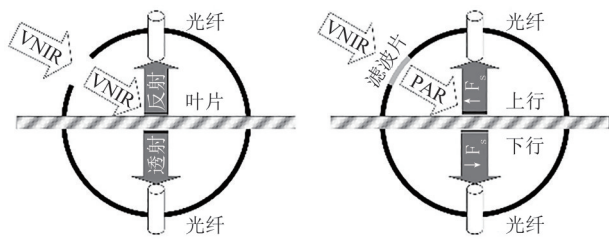


图8 FluoWat 叶片夹测量反射率、透射率与上下行荧光原理示意图(可分别测量叶片的反射辐射与透射辐射,安装短波通滤光片后,可获取稳态荧光信号(↑F_s与↓F_s))

Fig 8 Schematic diagram of the FluoWat leaf clip for measuring reflectance, transmittance, and both upward and downward fluorescence (The device allows for separate measurements of leaf reflectance and transmittance. After installing short-pass filters, steady-state fluorescence signals (↑F_s and ↓F_s) can be acquired)

表4 主要地面 SIF 长时序自动观测系统

Table 4 Major ground-based SIF long-term automatic observation systems

观测系统	光谱仪	仪器波段范围/nm	光谱分辨率/nm	荧光波段/nm	参考文献
TriFLEX	HR2000+ (Ocean Optics, Dunedin, Florida, USA)	630—815	0.5	687;760	(Daumard 等,2010)
	HR2000+	630—815	0.5		
	HR2000+	300—900	2		
HSI	HR4000 (Ocean Optics Inc., USA)	400—1000	1	760	(Meroni 等,2011)
	HR4000	700—800	0.1		
SpectroFLEX	HR2000+	630—820	0.2	687;760	(Fournier 等,2012)
SFLUOR	HR4000	700—800	0.1	760	(Cogliati 等,2015a)
	HR4000	400—1000	1		
FluoSpec	HR2000+	680—775	0.13	760	(Yang 等,2015)
SIF-Sys	STS-VIS (Ocean Optics Inc., USA)	337—823	3	760	(Burkart 等,2015)
FloX	QE pro	650—800	0.3	687;760	(Juliitta 等,2017)
	FLAME-S (Ocean Optics, Dunedin, FL, USA)	400—1000	1.5		
FluoSpec2	QE pro	730—780	0.17	760	(Yang 等,2018)
	HR2000+	350—1100	1.1		
AutoSIF	QE65 pro	645—805	0.3	687;760	(Hu 等,2018a)
PhotoSpec	QE pro 1 (Ocean Optics, Inc., Florida, USA)	670—732	0.3	红光;远红光	(Grossmann 等,2018)
	QE pro 2 (Ocean Optics, Inc., Florida, USA)	729—784	0.3		
	FLAME (Ocean Optics, Inc., Florida, USA)	177—874	1.2		
FAME	QE pro	730—786	0.15	760	(Cu 等,2019)
SIFspec	QE65pro (Ocean Optics, Dunedin, FL, USA)	649—805	0.3	687;760	(Du 等,2019)
SIFprism	QE pro	650—800	0.3	687;760	(Zhang 等,2019a)
SIFmotor	QE pro	650—800	0.3	687;760	(Zhang 等,2022c)
4S-SIF	Photodiode (LA1540-ML;Thorlabs, USA)	757 nm, 761 nm,770 nm	<1.3 nm	远红光	(Kim 等,2022)
HyScreen	FLUO	670—780 nm	0.31 nm	687;760	(Peng 等,2022)

3.2 航空航天平台 SIF 反演

近地面 SIF 精度较高, 而且不易受到大气干扰, 但地面观测通常需要耗费大量的人力物力, 而且往往受限于站点位置, 覆盖区域有限, 难以实现大尺度的 SIF 观测 (Zhang 等, 2022b), 随着航空航天技术的发展, 大范围, 长时序的机载及卫星数据, 为 SIF 的大区域乃至全球反演提供了新的机遇 (Zhang 等, 2018a)。但与地面平台的 SIF 观测相比, 航空航天平台反演 SIF 的过程更复杂, 由于 SIF 信号在达到传感器的途中会被大气吸收, SIF 信号与大气反射或散射的信号耦合, 影响 SIF 的反演精度, 因此, 往往需要精确的大气校正过程 (Meroni 等, 2009), 以去除大气干扰。

光从太阳发射经大气传输, 在地表反射后, 经过大气作用传输至卫星传感器上, 辐射传输过程如图9, 传感器接收到的入射能量分为: (1) 太阳辐射能量直接经大气反射至传感器的能量; (2) 太阳辐射经大气作用照射至目标而后反射至传感器的能量, 包括目标发射的荧光经由大气作用后抵达传感器, 2a代表太阳辐射直接入射到目

标, 2b代表被大气散射后入射至目标的太阳辐射; (3) 太阳辐射经大气散射后照射到背景地物而后反射至传感器的能量, 3a代表太阳辐射直接入射到背景地物, 3b代表被大气散射后入射至背景地物的太阳辐射。

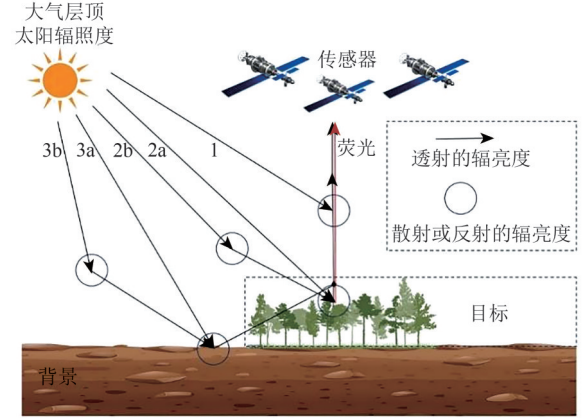


图9 辐射传输过程

Fig 9 Radiation Transfer Process

基于大气辐射传输过程, 大气顶层的辐亮度信号为

$$L_{TOA} = \frac{ECOS\theta_s}{\pi} \left(\frac{T_{\downarrow}^S r_{hd} T_{\downarrow}^d + T_{\downarrow}^d r_{dh} \rho_d r_{hd} T_{\downarrow}^d + T_{\downarrow}^d r_{dh} T_{\downarrow}^S + T_{\downarrow}^S r_{hh} T_{\downarrow}^S}{1 - \rho_d} \right) + \frac{ECOS\theta_s}{\pi} (T_{\downarrow}^d r_{dd} T_{\downarrow}^d + \rho_0) + SIF_s T_{\downarrow}^d + \frac{SIF_d (T_{\downarrow}^S + \rho_d r_{hd} T_{\downarrow}^d)}{1 - r_{hh} \rho_d} \quad (18)$$

式中, E 为太阳辐照度, θ_s 为太阳天顶角, $T_{\downarrow}^d$ 和 $T_{\downarrow}^S$ 分别为大气上行直射透过率与下行直射透过率, ρ_0 为大气二向反射率, $T_{\downarrow}^S$ 和 $T_{\downarrow}^d$ 分别为大气上行散射透过率与下行散射透过率, ρ_d 为大气球面反射率, r_{hd} 和 r_{dh} 分别为半球一方向反射率因子与方向一半球反射率因子, r_{dd} 和 r_{hh} 分别为双向反射率因子与半球一半球反射率因子, SIF_d 为环境中的 SIF 通量信号, SIF_s 为目标地物的 SIF 信号。

而地表接收的辐亮度信号为

$$L_{TOC} = \frac{ECOS\theta_s}{\pi} \left(T_{\downarrow}^d r_{dd} + \frac{T_{\downarrow}^S r_{hd} + T_{\downarrow}^d \rho_d r_{dh} r_{hd}}{1 - S\rho_d} \right) + SIF_s + \frac{SIF_d \rho_d r_{hd}}{1 - S\rho_d} \quad (19)$$

假设地表为朗伯体, 则卫星传感器在地表接收到的大气层的辐亮度信号可简化为

$$L_{TOA} = L_0 + \frac{(E_t^{\text{dir}} \mu_s + E_t^{\text{diff}}) \rho_s T_{\downarrow}}{\pi(1 - S\rho_s)} + \frac{F_s T_{\downarrow}}{1 - S\rho_s} \quad (20)$$

式中, L_0 为大气层顶接收到的辐亮度, μ_s 为天顶角余弦, E_t^{diff} 和 E_t^{dir} 分别表示到达地表的太阳辐射

的散射与直射部分, S 为大气半球反照率, ρ_s 为地表反射率, F_s 是冠层 SIF 信号。式中的大气参数 (L_0 、 E_t^{diff} 、 E_t^{dir} 、 $T_{\downarrow}$ 、 S) 受大气气溶胶、大气模式、太阳观测角度、水汽含量等因素的影响。

目前, 多种搭载传感器的机载观测系统与无人机 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 成为 SIF 观测的有力工具 (表5), 相较地面观测, 航空平台的观测能够根据观测需要动态调整飞行参数 (如观测角度、高度等), 从而弥补地基观测空间位置固定的问题。机载 SIF 的反演研究起源于 1990 年, Gower 和 Borstad (1990) 利用 8 通道成像光谱仪 FLI (Fluorescence Line Imager) 首次实现了海洋浮游生物 SIF 的观测, 与机载系统相比, UAV 观测系统更灵活机动, 经济高效, 而且飞行参数可以根据需求动态调整。已有研究发展了一系列观测 SIF 的 UAV 观测系统 (表5), 通常由 QE Pro 光谱仪与 FLAME 光谱仪组成, 除此之外, 还配备 RGB 相机记录观测地物的位置 (吴霖升 等, 2022), 相较成像传感器系统, 非成像传感器系统往往具有更高

的光谱分辨率与信噪比，而且具有体积小，重量轻，耗电少的特点，能够提供更多的观测数据 (Mac Arthur 和 Robinson, 2015)，非成像传感器系统获取的观测数据更多需要大气校正，而成像系统同时需要大气校正与几何校正。UAV 与机载观

测已被用于 CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager)、ROSIS (Reflective Optics System Imaging Spectrometer) 等传感器中。其中，HyPlant、FIREFLY 与 CFIS 是专门用于观测 SIF 而设计的传感器，光谱分辨率达到亚纳米级。

表 5 主要航空平台 SIF 观测系统

Table 5 Major airborne platform SIF observation systems							
观测系统	光谱仪	波段范围/nm	光谱分辨率/nm	搭载平台	飞行高度/km	成像或非成像	参考文献
ROSIS	ROSIS	430—860	~7.00	机载	3.5	成像	(Maier 等, 2004)
CASI	CASI	408—947	7.5	机载	1	成像	(Zarco-Tejada 等, 2003)
AISA	AISA	520—884	1.6	机载	2.5	成像	(Corp 等, 2006)
AIRFLEX	AIRFLEX	687.3	0.5	机载	0.3—3	非成像	(Moya 等, 2006)
		760.7	1				
MCA-6	MCA-6	757.42	1.6	无人机	0.15	成像	(Zarco-Tejada 等, 2009)
		760.47	1.57				
Micro-Hyperspec	VNIR	400—885	6.4	无人机	0.575	成像	(Zarco-Tejada 等, 2012)
Piccolo Doppio	QE pro	650—800	0.31	无人机	<0.5	非成像	(Atherton 等, 2018)
	FLAME	400—950	1.3				
APEX	APEX	400—2500	5.7	机载	4—10	成像	(Damm 等, 2015a)
HyPlant	FLUO	670—800	0.25	机载	0.6; 1.78	成像	(Rascher 等, 2015)
	DUAL	370—2500	3.00/10.00				
AisaEAGLE	AisaEAGLE	400—970	3.3	飞艇	0.4	成像	(Ni 等, 2016)
HyUAS	USB4000	350—1000	1.5	无人机	0.01; 0.02	非成像	(Garzonio 等, 2017)
CFIS	CSIF	737—772	< 0.10	机载	3	成像	(Frankenberg 等, 2018)
AirSIF	QE pro	498—877	0.8	无人机	0.01	非成像	(Bendig 等, 2020)
FAME-UAV	QE pro	730—784	0.15	无人机	0.01	非成像	(Chang 等, 2020b)
	FLAME	350—1000	1.3				
Nano-Hyperspec	VNIR	400—1000	6	无人机	0.08	成像	(Maimaitiyiming 等, 2020)
FIREFLY	Fluorescence	670—780	0.10—0.20	机载	0.335	成像	(Paynter 等, 2020)
FluorSpec	QE pro	630—800	0.3	无人机	0.06	非成像	(Wang 等, 2021)
VNIR E-Series	VNIR	400—1000	5.8	机载	0.9; 1.2; 2.2	成像	(Belwalkar 等, 2022)

与由于机载观测的传感器与观测目标存在距离，需要考虑大气散射和吸收的影响 (Maier, 2001)。为了减弱受大气吸收和散射影响带来的误差，UAV 系统往往飞行高度位于 5—20 m (Wang 等, 2022)。除此之外，航空平台的 SIF 反演精度还受到成像仪参数 FWHM (如 Full-Width at Half-Maximum) 的影响。Belwalkar 等 (2021) 发现使用窄波段 0.1—0.2 nm 高光谱成像仪进行 SIF 反演的精度更优 ($R^2=0.65$)。

航空平台的传感器相较于星载传感器往往具有更高的时空分辨率，相较于地面观测系统覆盖范围更广，能够作为验证卫星 SIF 产品的有效工具

(Bandopadhyay 等, 2020)，主要问题在于飞行成本昂贵，数据量较大，限制了 SIF 的大区域制图，而且相较卫星的连续观测飞行时间短，研发与应用还需要进一步的探索。

与其他植被指数 (如 NDVI) 产品相比，由于土壤和云不会产生 SIF 信号，因此卫星反演的 SIF 产品 (表 6) 受到土壤或云干扰的影响较少 (章钊颖等, 2019)。基于卫星观测 SIF 的研究起源于 2002 年，Theisen (2002) 和 Sioris 等 (2003) 首先评估了从太空观测 SIF 的潜力。真正基于卫星数据实现反演 SIF 的研究始于 2007 年，Guanter 等 (2007) 利用环境卫星 ENVISAT (Environmental Satellite) 上的

中分辨率成像光谱仪 MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) 进行了第一次星载传感器的 SIF 反演。ENVISAT 是欧洲于 2002 年发射的新一代卫星遥感探测传感器, 其上搭载着大气制图扫

描成像吸收光谱仪 SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography)。Guanter 等 (2007) 采用了 FLD 算法获得了 O₂-A 波段的 SIF。

表 6 主要卫星反演 SIF 产品信息
Table 6 Major satellite retrieval SIF product information

卫星/传感器	重访 周期/d	反演 算法	反演窗口/ nm	反演 波段/nm	时间 范围	空间分辨率	参考文献	产品链接
GOME	3	PCA	712—747	740	1995—07— 2003—06	1°×1°	(Joiner 等, 2019)	https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/MetOp/GOME_F/
SCIAMACHY	35	PCA	734—758	740	2003—01— 2012—04	2°×2°	(Joiner 等, 2016)	ftp://doidata.gfz-potsdam.de/open/GlobFluo/SCIAMACHY
			735—758	740	2002—08— 2012—03	1.5°×1.5°	(Köhler 等, 2015b)	ftp://ftp.gfz-potsdam.de/home/mefe/GlobFluo/
GOME-2	1.5	PCA	712—747	740	2007—01— 2019—03	0.5°×0.5°	(Joiner 等, 2016)	https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/MetOp/GOME_F/
			735—758	740	2007—01— 2016—01	0.5°×0.5°	(Köhler 等, 2015b)	ftp://doidata.gfz-potsdam.de/open/GlobFluo/GOME-2
			712—783	737	2007—01— 2018—12	0.5°×0.5°	(Kooreman 等, 2020)	http://www.temis.nl/surface/sif.html
			712—747	740	2013—03— 2019—03	0.5°×0.5°	(Joiner 等, 2013, 2016)	https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/MetOp/GOME_F/
OCO-2	16	DOAS	758—759; 769.8—770.4	757; 771	2014—09— 2022—02	—	(OCO-2 Science Team 等, 2020)	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OCO2_L2_Lite_SIF_10r/summary?keywords=OCO-2%20SIF
OCO-3	16	SFM	758.1—759.2; 769.6—770.3	757; 771	2019—08— 2022—02	—	(OCO Science Team 等, 2021)	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OCO3_L2_Lite_SIF_10r/summary?keywords=OCO-3%20SIF
Tansat	16	SVD	757.4—759.3; 769.5—770.3	758; 771	2017—03— 2019—10	—	(Du 等, 2018)	https://zenodo.org/records/3883434
TROPOMI	1	SVD	663—685.3; 743—758	683; 740	2017—12— 2022—12	Gridded: 0.05°×0.05°; 0.2°×0.2°; 1°×1° Ungridded: 3.5 km× 7 km (星下点)	(Köhler 等, 2018)	ftp://fluo.gps.caltech.edu/data/tropomi/
		PCA	743—758; 735—758	743; 735	2018—05— 2025—03	—	(Guanter 等, 2021)	https://eo4society.esa.int/projects/sentinel-5p-innovation-solar-induced-chlorophyll-fluorescence-sif/
		ANN	743—758	740	2018—05— 2025—07	—	(Li 等, 2025)	https://github.com/lidongmath/Sentinel-5P-TROPOMI-ANNSIF
Goumang	60	SVD	743—758	740	2023—2024	370 m×800 m	(Zhang 等, 2025)	https://www.nesdc.org.cn/sdo/detail?id=6891d1fb7e28174acd1b640f

欧洲航天局 (ESA) 于 1995 年发射了第一颗全球臭氧监测实验仪 GOME (Global Ozone Monitoring Experimental) 卫星, 覆盖了荧光反演必备的光谱波段, GOME 是目前反演数据起始时间最长的传感器, 但可利用数据截止于 2011 年 (马彦, 2022)。Joiner 等 (2019) 反演了 GOME 卫星 1995 年—2003 年 740 nm 的 SIF 产品。随后 ESA 于 2006 年又发射了第一颗 GOME-2 MetOp-A 卫星,

进入极地轨道, 赤道交叉时间为 9:30。第二颗卫星于 2012 年 9 月 17 日搭载 MetOp-B 发射升空, 也处于晨间轨道, 但与第一颗卫星相位相差 180°。Joiner 等 (2013) 反演了 GOME-2 卫星的远红外 SIF, 产品的空间分辨率为 0.5°×0.5°。Köhler 等 (2015b) 反演了 GOME-2 与 SCIAMACHY 的 740 nm 的 SIF。随后 Kooreman 等 (2020) 反演了 GOME-2 卫星 2007 年—2018 年的 SIF。GOME-2 卫星 SIF 拥

有历史时间最长的数据资料(2007年至今),为长时序大尺度的生态系统观测提供了宝贵资料,但空间分辨率低,同样不适用于小区域精细尺度的应用分析(Kooreman等,2020)。上述研究主要针对远红光波段的反演,红光波段SIF能够为远红光的SIF提供更多监测陆地植被的补充信息。Joiner等(2016)基于 $O_2\ \gamma$ 波段信息反演了8年(2007年—2014年)的GOME-2与SCIAMACHY的红光波段的SIF,结果显示红光SIF与远红光SIF表现出相似的时空分布模式。

Joiner等(2011)利用温室气体观测卫星GOSAT(Greenhouse Gases Observing Satellite)数据基于近770 nm的FLs反演了SIF,并绘制了首幅全球SIF制图。GOSAT的离散观测模式和稀疏空间采样特点,使得难以利用其进行连续的全球制图。随后Frankenberg等(2011b)基于迭代最小二乘法反演了GOSAT卫星 $O_2\text{-A}$ 的SIF。Guanter等(2012)反演了22个月的GOSAT SIF,结果与Frankenberg等(2011b)的结果一致。Köhler等(2015a)应用GOSAT卫星数据反演了755 nm左右的SIF,反演结果对云的敏感度较低。2018年,日本发射了用于碳监测的温室气体观测卫星-2(GOSAT-2),与GOSAT相比,GOSAT-2的性能和信噪比有所提高(Imasu等,2023)。

2014年,美国航天局(NASA)发射了第二颗能够提供全球高精度二氧化碳观测科学实验数据的卫星OCO-2。Frankenberg等(2014)利用OCO-2模拟数据评估了使用该卫星反演SIF的潜力。2019年,NASA再次发射了配合OCO-2进行协同观测提供全球碳数据的卫星OCO-3,该卫星首次为南美洲、非洲和东南亚主要热带雨林地区提供数据。OCO-3能够在一天内的不同时间提供SIF数据,但无法在同一地区的同一天内提供不同时间点的SIF数据,如果忽略冠层结构的季节性差异,则可以合成一天内不同时间点的SIF数据,从而用于研究光合作用的日变化(Zhang等,2023b; Zhang和Zhang,2023)。OCO-2 Science Team等(2020)提供了OCO-2卫星与OCO-3的SIF反演产品。尽管OCO系列在空间分辨率上具有优势,但这一系列卫星的空间覆盖仍然有限,影像中往往存在大量空隙,基于此,诸多时空尺度拓展方法(如机器学习)被应用至SIF数据的重构中(Li和Xiao,2019; Yu等,2019)。

2017年,搭载在Sentinel-5P卫星上的TROPOMI传感器成功发射,该卫星同时具有高空间分辨率和高覆盖能力。Guanter等(2015)利用模拟数据的结果显示,与GOME-2产品相比,TROPOMI拥有更优越的空间解释能力。Köhler等(2018)首次基于SVD的算法反演了TROPOMI远红外波段(743—758 nm)的SIF,反演结果与OCO-2的SIF表现出较好的一致性。随后Guanter等(2021)反演了2018年—2021年的TROPOMI卫星735—758 nm的SIF。Köhler等(2020)基于TROPOMI卫星的观测数据首次反演了红光波段的SIF。现有的卫星SIF反演产品大多只针对单波段,全波段耦合的SIF反演结果能够提供更充分的量化植被光合作用的指示信息。Zhao等(2024a)构造了大气层顶辐亮度的前向模型,使用最小二乘法,基于TROPOMI数据首次实现了星载数据全球陆地SIF全谱段光谱(640—850 nm)的SIF重构,与已有的TROPOMI SIF和OCO-2 SIF相比,其反演结果具有更优的精度与更合理的空间分布。

随着中国卫星技术的发展,国产卫星也同样具有观测SIF的潜力。TanSat是中国第一颗独立开发的全球二氧化碳观测科学实验卫星,发射于2017年,具有高光谱分辨率(0.044 nm)和高信噪比。卫星上的 $O_2\text{-A}$ 波段传感器稳定运行,为SIF反演提供可靠的长期观测数据。Du等(2018)首次反演了Tansat卫星758.8 nm处的SIF,该产品与OCO-2 SIF表现出较好的一致性($R^2 = 0.86$)。Ma等(2020)通过考虑太阳辐射强度的影响生成了全球空间连续的TanSat SIF产品。随后Yao等(2021)基于DOAS算法生成了2017年—2018年的Tansat SIF产品,并与基于SVD生成的Tansat SIF进行对比,二者的相关系数在所有季节都大于0.73。其他卫星如风云3D(FY-3D)(2017年发射)和高分五号(GF-5)(2018年发射)也具有观测SIF的能力,但目前对利用这些卫星进行SIF的研究较少。

现有用于SIF反演的卫星传感器(表7)设计大多并非专门为观测SIF设计的。FLEX(Fluorescence Explorer)是ESA设计的专用于观测SIF的卫星,计划于2026年左右发射,具有300 m的空间分辨率和150 km的幅宽(Coppo等,2017; Drusch等,2017)。2022年8月,中国成功发射了句芒号卫星,该卫星配备了专门用于SIF反演的SIFIS

传感器，其空间分辨率为 2 km，幅宽为 30 km。Du 等（2022）利用 QE Pro 地面光谱仪和 SIFIS 原型进行了同步野外实验，确认了 SIFIS 在室外光谱观测和 SIF 反演的可靠性。将要发射的卫星包括中

国的 Tansat-2、欧盟的 MicroCarb 和 FLORIS 以及 CO₂-M 同样具备反演 SIF 的潜力，能够促进 SIF 的分析和应用（Wu 等，2023；Yao 等，2022）。

表 7 具有太阳诱导荧光检测潜力的主要卫星传感器及相关性能指标
Table 7 Major satellite sensors with potential for SIF detection and related performance metrics

传感器	数据起止时间	足迹范围/km	时间分辨率	过境时间	光谱范围/nm	光谱分辨率/nm	幅宽/km
GOME	1995-06—2011-07	40×320	3 d	10:30 am	595—793	0.33	960
SCIAMACHY	2003-01—2012-07	30×240	3 d	10:00 am	650—790	0.5	240
GOME-2	2007-01 至今	40×80(40×40 after the year 2013)	1.5 d	9:30 am	650—790	0.5	1920
GOSAT	2009-12 至今	10.5 diameter	3 d	1:00 pm	757—775	0.025	750
OCO-2	2014-07 至今	1.3×2.3	16 d	1:30 pm	757—775	0.042	10.3
TanSat	2016-12-至今	2.0×2.0	16 d	1:30 pm	758—778	0.044	20
TROPOMI	2017-10 至今	7.0×3.5 (5.0×3.5 after the year 2019)	1 d	1:30 pm	758—778	0.5	2600
FY-3D	2017-11 至今	10 diameter	6 d	2:00 pm	750—771	0.05	2250
GF-5	2018-05 至今	10.3 diameter	2 d	1:30 pm	759—769	0.035	1850
GOSAT-2	2018-11 至今	9.7 diameter	6 d	1:00 pm	755—772	0.025	903
OCO-3	2019-05 至今	1.6×2.2	16 d	1:30 pm	757—775	0.025	11
SIFIS	2022-08 至今	2.0×2.0	59 d	10:30 am	670—780	0.3	34
TEMPO	2023-04 至今	2×4.5	逐时	—	540—740	0.6	—
FLEX*	~2026	0.3×0.3	~27 d	10:00 am	500—780	0.3-2.0	150
MicroCarb	2025-07 至今	4.5×9	25 d	10:30 am	758—769	0.03	13.5
Sentinel 4	2025-07 至今	8×8	逐时	—	750—775	0.12	—
CO ₂ -M*	~2027	2×2	—	11:30 am	747—773	0.12	>250
Tansat-2*	~2026	1×1	—	—	747—773	0.12	1000

注：*代表未发射的卫星。

未来，即将发射的地球静止卫星能够为反演 SIF 提供更多的观测数据。如 2023 年 4 月发射的 TEMPO 卫星，该卫星位于静止轨道上，用于在白天逐时观测整个北美地区的大气状况（Van der Tol 等，2023）。在欧洲和北非地区，定位于静止轨道上的 Sentinel-4 MTC-S 卫星上搭载的 UVN 传感器被设计用于连续监测大气组成和空气质量，具有高时空分辨率，于 2025 年发射（Gaztelumendi 等，2021）。日后，来自 TEMPO、和 Sentinel-4 卫星的组合监测数据将能够提供小时级的日变化监测数据，服务于北美、欧洲、北非等地区的光合作用日变化监测（Gaztelumendi 等，2021）。

总体而言，与地面和航空平台的观测相比，基于卫星的 SIF 反演往往具有大尺度，连续观测等

优点，反演产品能够实现全球覆盖，但观测结果需要进行精确的大气校正，且现有的卫星传感器的空间分辨率较低，缺乏高时空分辨率，长时序的 SIF 产品，限制了卫星 SIF 产品在精细尺度的进一步应用（Haddad 等，2015；Turner 等，2020）。需要结合 FLEX，SIFIS 等新型传感器的观测结果，或在现有卫星产品的基础上进行时空降尺度，构建更高时空分辨率的 SIF 产品（Coppo 等，2017；Drusch 等，2017）。

4 SIF 反演不确定性评估

4.1 与地面塔基观测数据的对比验证

在 SIF 反演的精度评估方面，基于卫星数据反演的 SIF 评估存在足迹尺寸大，仪器误差等问题。

一种评估卫星 SIF 反演精度的方法是基于地面通量观测数据，地面实测数据精确度高，而且可以忽略大气的影响（Du 等，2023）。然而，在验证的过程中，由于地面采样（如通量塔）的足迹只有几平方米，与卫星观测的 SIF 存在尺寸差异，为中等以及粗分辨率的卫星数据验证带来了困难，基于反射率计算的植被指数可以作为消除地面和卫星观测 SIF 之间足迹空间尺度差异的桥梁（式（21））。Du 等（2023）基于近红外植被指数 NIRv（Near-Infrared Vegetation Index）数据在通量塔实测 SIF（1—10 m）和 TROPOMI SIF 之间进行了尺度匹配，验证了卫星反演 SIF 的精度。马彦（2022）使用 NDVI 与 NIRv 数据进行 TanSat SIF 数据和地面/塔基 SIF 数据的足迹匹配，以验证 SIF 空间尺度扩展产品精度。

$$\text{SIF}_{\text{in-situNIRv}} = \frac{\text{NIRv}_{\text{satellite}}}{\text{NIRv}_{\text{in-situ}}} \text{SIF}_{\text{satellite}} \quad (21)$$

式中， $\text{SIF}_{\text{in-situNIRv}}$ 是基于 NIRv 匹配的 SIF 值， $\text{NIRv}_{\text{satellite}}$ 表示每个匹配样本的卫星 NIRv 值，而 $\text{NIRv}_{\text{in-situ}}$ 则表示塔基尺度上的 NIRv 值， $\text{SIF}_{\text{satellite}}$ 表示卫星反演 SIF 值。

4.2 与辐射传输模型结果的对比验证

为了评估 SIF 反演结果的可靠性，通常采用辐射传输模型（如 SCOPE）在拟合窗口范围内的均值作为真实值，采用数学统计指标包括拟合优度 R^2 （Coefficient of Determination），均方根误差 RMSE（Root Mean Square Error），偏差（Bias），相关系数 r （Correlation Index）来度量反演值与真实值的误差（Li 等，2021）。计算公式分别为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{SIF}_i - \widehat{\text{SIF}}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\text{SIF}_i - \overline{\text{SIF}})^2} \quad (22)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{SIF}_i - \widehat{\text{SIF}}_i)^2}{n}} \quad (23)$$

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{abs}(\text{SIF}_i - \widehat{\text{SIF}}_i)}{n} \quad (24)$$

$$r = \frac{E(\text{SIF}_i \widehat{\text{SIF}}_i) - E(\text{SIF}_i)E(\widehat{\text{SIF}}_i)}{\sqrt{E(\text{SIF}_i^2) - E^2(\text{SIF}_i)} \sqrt{E(\widehat{\text{SIF}}_i^2) - E^2(\widehat{\text{SIF}}_i)}} \quad (25)$$

式中， SIF_i 、 $\widehat{\text{SIF}}_i$ 和 $\overline{\text{SIF}}$ 分别为 SIF 反演值、真实值和反演值的平均值， E 代表期望， abs 代表绝对值， i 代表序号， n 代表样本数。

4.3 与生态系统 GPP 数据的对比验证

除了上述两种验证方式以外，GPP 也常被用作 SIF 反演产品验证的参考指标（Chen 等，2022b；Gentine 和 Alemohammad，2018；Jin 等，2024）。以 GPP 作为验证基准有助于将 SIF 融入现有的生态系统模型，从而深化对生态系统碳循环与植被生产力的理解。这对于区域及全球尺度的环境监测和气候变化研究具有重要价值（Li 等，2018；Xie 等，2025）。GPP 表征植被的总初级生产力，而 SIF 则用于探测植被的光合作用过程（Damm 等，2015a；Li 等，2018，2020b）。作为 GPP 的有效代理，SIF 在时空变化上与 GPP 表现出高度一致性。在 16 d 的时间分辨率下，二者之间呈现显著的线性关系（Li 等，2020b；Zhang 等，2016b），这一关系适用于所有植被类型，并已在多个研究中得到验证（Li 等，2018）。目前已有多个公开的 GPP 通量站点数据集可供使用，如全球尺度的 FLUXNET 数据集（[https://fluxnet.org/\[2025-05-27\]](https://fluxnet.org/[2025-05-27])），包含来自全球 250 多个站点的涡度协方差观测数据；以及中国区域的 ChinaFLUX 数据集（[http://www.chinaflux.org/\[2025-05-27\]](http://www.chinaflux.org/[2025-05-27])），专注于中国典型生态系统的碳通量观测。

5 SIF 反演存在问题

SIF 在非生物胁迫的早期监测、植被蒸腾、作物产量、生产力以及陆地生态系统生理生化参数反演（Chen 等，2024；Mohammadi 等，2022；Wang 等，2020b）等方面具有广泛应用，已有研究表明，SIF 在不同植被类型中与 GPP 密切相关，并能快速响应环境胁迫（Lee 等，2013；Wang 等，2019）。相比之下，传统绿度植被指数 VIs（Vegetation Indices）主要基于植被反射特性计算，与植物光合作用的联系较为间接，因此对水分或温度变化的敏感性较低（Guan 等，2016；Yoshida 等，2015）。在水分胁迫监测方面，Lee 等（2013）研究表明，卫星 SIF 数据能够有效捕捉热带雨林的水分亏缺信号，而传统 VIs（如 NDVI）未能充分反映该胁迫特征。这一结论在后续的地面观测研究中得到了进一步验证（Damm 等，2022；Wu 等，2024b）。Moya 等（2023）研究表明水分胁迫对荧光发射有抑制作用。Wang 等（2019）的研究表明，相较于传统 VIs，卫星 SIF 对降水亏缺和高温的响应更明显，而传统 VIs 低估了约 50% 的损

失。在热胁迫响应方面, Song等(2018)发现, SIF水平在高温胁迫下明显下降, 并且对胁迫的响应时间更早, 而传统VIs约滞后一个月才捕捉到相应信号。Wieneke等(2024)通过比利时马铃薯田间观测实验, 进一步证实了SIF在评估植物对于旱和高温胁迫响应方面的潜力。Zeng等(2022)通过HyPlant机载遥感影像数据提取的荧光效率(ΦF)表现出对光照、温度和水分可利用性变化的高度敏感性。研究特别强调了SIF在动态光照环境(如阴影效应)下的响应能力, 而VIs未能有效反映这一现象。SIF作为一种直接表征光合作用的遥感指标, 在环境胁迫监测方面更为敏感, 能提供更准确的植被胁迫(如光照、温度、水分)信息。

SIF反演精度直接影响SIF产品的实际应用效果。近年来, SIF反演在算法优化、仪器设备等方面取得了诸多进展。然而, SIF反演仍面临挑战与不确定性, 其反演精度受多种因素(如大气效应等)的制约。此外, 红光波段SIF的反演方法仍不够成熟。综合来看, 当前SIF反演主要存在以下问题:

5.1 大气效应的影响

SIF反演的大气效应取决于SIF的观测尺度。在近距离反演(如地面观测)时, 由于较近距离观测, 受到大气散射和吸收的影响较小, 地面测量通常不需要考虑大气干扰, 但Liu等(2019b)认为当观测塔高度高于一定范围(10 m)时, 观测数据也需要进行大气校正。基于航空航天平台(如基于无人机、飞机或卫星进行观测)的数据反演SIF时, 由于大气的重吸收, 必须考虑云层及气溶胶的影响(Alonso等, 2018)。Corp等(2006)发现, 没有进行大气校正可能会导致机载观测的红光/远红荧光比(SIF_{688}/SIF_{760})会比地面观测结果低十倍。

不同的反演吸收带(如FLs或 O_2 吸收带)受大气效应的影响不同。基于地球大气吸收波段(如 O_2 -A和 O_2 -B)的SIF反演受大气效应的影响更严重, 这可能是由于 O_2 吸收波段的形状和宽度会随着大气的变化而变化, 导致大气重吸收效应影响较大, 从而降低反演精度(Sabater等, 2018), 且现有的大气参数精度难以满足SIF在 O_2 吸收波段高精度反演的需求(Liu和Liu, 2014)。因此, 基于 O_2 吸收波段(如 O_2 -A [约760 nm]和 O_2 -B [约

687 nm])的SIF反演常用于地面平台, 而当应用于较高平台或航空航天平台时, 必须进行大气校正以确保反演结果的准确性(Marrs等, 2021; Meroni等, 2009)。相较而言, 基于FLs的反演较少受到大气效应的干扰, 因此更适用于航空航天平台。然而, 基于FLs波段的反演通常伴随更多噪声, 且反演结果对SIF的光谱形状较为敏感(Chang等, 2020a)。研究表明, 通过利用卫星数据中757—771 nm范围内的FLs, 可以可靠地反演SIF(Mohammed等, 2019)。

为了减弱大气效应对SIF反演的影响, 通常有一步法和两步法两类方法进行校正: 一步法是在反演算法设计中明确包含大气校正, 将透射函数引入FLD或SFM公式中进行大气效应补偿(Sabater等, 2018), 基于卫星平台的SIF反演通常采用一步法进行校正, 而两步法为在获取光谱实测数据前进行大气校正(Mohammed等, 2019)。两步法的优势在于估算SIF前能够提供其他的衍生产品(如表观反射率), 被应用于地面和航空SIF反演(Belwalkar等, 2022)。

5.2 仪器属性的影响

测量SIF仪器传感器的属性(空间分辨率, 光谱范围, 信噪比等)都会对SIF反演精度产生影响。Damm等(2011)应用FLD、3FLD、iFLD算法反演SIF, 结果表明SNR是影响SIF反演算法精度最重要的因素。反演SIF的光谱特征吸收带(O_2 -A, O_2 -B, FLs等)通常较窄, 需要使用高光谱分辨率的光谱仪(光谱采样间隔在0.05—2 nm之间), 从而更好地反演SIF。然而, 高光谱分辨率的光谱仪需要准确表征仪器的光谱响应函数ISRF (Instrumental Spectral Response Function), 以及在高空间分辨率下准确表征仪器的点扩散函数PSF (Point Spread Function), 否则可能会导致带填充效应(图像中的一个像素可能会接收来自周围更亮像素的额外光), 从而影响SIF反演精度(Alonso等, 2018)。不同类型的算法受仪器属性的影响不同, Liu和Liu(2014)评估了3种FLD衍生算法(FLD、3FLD、iFLD)在卫星遥感反演SIF的效果。结果显示iFLD算法对于仪器的SNR最为敏感。Cendrero-Mateo等(2019)对比了FLD衍生算法与SFM算法反演SIF的精度, 发现SFM算法对于仪器噪声不敏感, 对SIF建模的函数更敏感。在

FLs 对应的波段, 吸收带的深度在非常狭窄的范围内变化很大, 因此, 传感器具备的光谱分辨率与信噪比性能至关重要, 以确保能够准确监测辐射的变化。

在实际观测 SIF 的过程中, 温度会影响传感器的性能。具体表现为: 高温环境会降低光电探测器的量子效率, 削弱对弱 SIF 信号的探测能力 (John 等, 2021; Rogalski, 2003); 同时, 暗电流噪声的增加会干扰荧光信号的检测, 降低信噪比 (Cogliati 等, 2015a; Jeftenić 等, 2020)。此外, 温度波动会引起光学元件的热膨胀或折射率变化, 导致光谱波段中心位置偏移, 影响 SIF 精细光谱特征的观测精度 (Bang 等, 2019)。电子系统方面, 温度变化可能导致放大器和模数转换器等组件增益和偏移的变化, 从而引入系统误差 (Liu 等, 2024; Zhang 等, 2016a)。同时, 传感器的机械结构可能发生变形, 改变光轴对准和焦距, 进一步降低测量稳定性。针对这些问题, 可通过热电冷却或辐射散热系统维持稳定工作温度 (Huang 等, 2023), 并结合温度依赖校正模型补偿因温度变化引起的漂移 (Aggarwal 等, 2008; Luo 等, 2021); 此外, 定期进行辐射定标以及优化光学材料与设计也是提高 SIF 观测数据可靠性的有效手段 (Berthold 等, 1977; Jing 等, 2023)。

5.3 角度效应的影响

SIF 反演的精度除了受大气, 仪器影响, 还可能与太阳光照角度效应 (直接辐射、漫反射辐射) 相关 (Zhang 和 Zhang, 2023)。基于 FLs 的反演算法假设在没有 SIF 填充时, 表观反射光谱在吸收波段是平滑的 (Liu 和 Liu, 2018), 但由于漫反射光穿过更长的光程到达传感器, 因此吸收带的深度对漫射光的比例很敏感, 引起反射光谱的凸起或凹陷, 可能会导致与荧光的填充效应相混淆, 从而导致对 SIF 的估算偏差 (Fournier 等, 2014)。研究表明, 太阳天顶角和传感器高度这两个参数的变化导致了 O_2 吸收波段中吸收深度的大幅变化 (Ni 等, 2016)。

Fournier 等 (2014) 基于小麦在不同照明条件下的观测实验, 首次观测了由植被对直射和漫反射的不同反射响应带来的 SIF 反演偏差, 当直射与漫反射达到平衡时这种偏差最大。Damm 等 (2015b) 进一步研究表明, 如果不考虑直接入射

与漫反射辐射的分布情况, SIF 反演的不确定性将高达 58%。Albert 等 (2023) 基于 4 种 SIF 反演算法 (FLD, 3FLD, SFM, SVD) 反演了红光和远红外波段的 SIF, 结果表明当杂散光 (包括散射光或衍射光) 比辐射信号小 3 个数量级时, 所有反演算法的平均偏差都 $< \pm 2\%$, 应量化杂散光的比例以确定是否需要校正角度效应的偏差。而不同反演波段受角度效应的影响不同, Cogliati 等 (2015b) 发现相较 O_2 -B 波段, 在 O_2 -A 波段进行的 SIF 反演误差受角度效应的影响更大。为了减小角度效应带来的反演误差, Liu 和 Liu (2018) 考虑了直接辐射对 O_2 -A 波段的填充效应 (误差达 20%), 并建立了一个简单的校正模型校正该效应, 取得了较好的验证效果。

除了太阳光照角度的影响外, 传感器的观测角度同样会对 SIF 反演结果产生影响 (Guanter 等, 2012)。由于卫星获取的 SIF 通常为具有方向性的瞬时观测值, 受观测角度变化影响明显, 因此, 在分析 SIF 与 GPP 的关系时, 有必要进行方向性校正 (Zhang 等, 2018b)。为减少这一影响, 已有研究提出了多种校正方向性效应的方法, 主要包括将 SIF 归一化至正下方观测方向 (SIF_{nadir} , 即 $VZA = 0^\circ$) 以及转化为表示冠层发射总量的 SIF_{total} 。其中, Liu 等 (2016) 基于半经验参数化模型, 将卫星观测 SIF 标准化至 nadir 方向, 结果显示, SIF 在 O_2 -B 和 O_2 -A 波段下的平均校正比例分别达 84% 和 72%。Hao 等 (2021) 在 Liu 等 (2016) 的研究基础上进一步提出了两种归一化算法: 一种是基于 NIRv 和红光反射率的简化方法, 另一种是采用核驱动模型将 SIF_{obs} 标准化至 nadir 方向。另一方面, He 等 (2017) 从物理机制出发, 基于几何光学模型将 SIF 分解为光照荧光和阴影荧光。Zhang 等 (2021) 基于该模型进行改进, 引入了散射相函数和热点函数, 使校正模型更加准确地反映冠层的实际发射情况。在上述研究的基础上, Zhang 等 (2019b) 将角度校正拓展至总冠层尺度, 结果表明与 TROPOMI 卫星观测到的方向性瞬时 SIF_{obs} 相比, 通过角度校正得到的总冠层 SIF_{total} 能够更有效地提升与 GPP 的相关性。Hao 等 (2022) 进一步系统评估了 SIF_{nadir} 与 SIF_{total} 在 GPP 估算中的表现, 结果表明两者均明显优于 SIF_{obs} 。

为了减小角度效应带来的反演误差, 在地面观测方面, 太阳角度的变化导致白天日照和阴影

冠层的比例不断变化,可以进一步使用安装在塔上的仪器,或者使用双半球系统等具有更宽的视场的设备,从而更准确地表示冠层顶部的SIF,或采用校正模型提升反演精度。在基于模型模拟SIF方面,需要对阴影和光照下的冠层SIF进行分类,或直接使用基于三维SIF的辐射传输模型,直接将太阳光照角度效应作为考虑要素(Parazoo等,2020)。在卫星观测方面,可以将 SIF_{obs} 转化为 SIF_{nadir} 或 SIF_{total} ,以减弱太阳光照角度效应带来的影响。

5.4 冠层结构的影响

植被各向异性是指在不同的方向上,植被对光的反射、散射和吸收特性可能会有所不同,而这种差异主要是受到植被冠层结构(如叶片结构参数和叶绿素含量)的影响(Van der Tol等,2019),冠层结构的变化对SIF的影响程度超过了叶片光合效率的差异(Malenovský等,2021;Tong等,2021),Dechant等(2022)研究发现,与冠层结构和光照辐射组分相比,叶片生理对SIF变异的贡献较小。Verrelst等(2015)基于SCOPE模型的敏感性分析结果表明,叶绿素含量、叶片倾斜度分布因子和叶面积指数是影响SIF反演的关键参数。三维辐射传输模型能够量化植被冠层结构对SIF的影响,Regaieg等(2021)基于三维DART模型对一个温带落叶林中的8个不同样地进行了测试,结果显示,树冠结构的水平异质性对森林SIF产生很大影响,尤其是在早晨8:00和傍晚18:00,当太阳光的方向比较斜时影响更大,与一维模型的结果相对误差达55%。此外,植被的排列方式可能会改变被光照射和阴影覆盖的叶片的实际比例,Zeng等(2020)研究表明植被覆盖度和聚集效应是影响三维异质冠层的SIF分布的重要因素。因此,需要考虑植被冠层结构的影响,可以通过三维辐射传输模型,将冠层结构作为要素,以确保反演结果的准确性(Mohammed等,2019;Verhoef等,2018)。

5.5 红光波段SIF反演

由于冠层反射辐亮度非常低,红光波长对应的SIF对总TOC辐射的贡献比例较大。相反,在远红外波段内,由于冠层的散射占主导,SIF在总体的贡献比例较低(Zhang和Zhang,2025)。植被冠

层发射的红光波段的SIF可以视作远红光波段的补充,而且红光与远红光波段的SIF比值随叶绿素含量增加而呈曲线减少的趋势(Buschmann,2007),该比值能够反映植被光能利用率的日变化特征,以及其在应对环境胁迫时的时空适应性(Middleton等,2017;Wieneke等,2016)。Buareal等(2023)研究表明,在水稻的生长季节中后期,相较于远红光波段,红光波段的SIF可能是一个更好的生态系统级的光合作用代理。

基于FLs反演红光波段(670—732 nm)的SIF比远红外波段的SIF更加复杂,因此在红光波段的反演研究较少,亟需进一步的研究(Joiner等,2016),红光波段的FLs相较于远红外波段更浅,而且由于植被叶绿素的再吸收(Qiu等,2019),植被发出的红光SIF信号会弱于远红外波段的SIF,同时红边波段的急剧上升增加了红光波段SIF的反演难度,在反演红光波段SIF时可能需要设置更窄的拟合窗口(Mohammed等,2019),而且需要考虑传感器与冠层接收的辐照度不匹配所导致的方向性误差(Zhang和Zhang,2025)。

5.6 零值偏移校正

理论上,非植被区域(例如撒哈拉沙漠)的太阳诱发荧光(SIF)数值应为零。然而,在实际应用中,由于光照角度效应以及反演算法本身的精度限制,非植被区域的SIF数值并非为零,而存在一定的荧光偏差。Köhler等(2015b)发现GOME-2和SCIAMACHY在远红波段的SIF反演存在偏差,因此在PCA训练数据集中(预期平均值接近0)的量级为数十 $mW/m^2/nm/sr$,并且该偏差与纬度相关,这可能由温度变化导致(Munro等,2016)。不同传感器的零级偏差有所差异,与SCIAMACHY相比,GOME-2的偏差更高,相差两倍以上。这一结果在Joiner等(2012)基于SCIAMACHY在866 nm处的反演中得到佐证。Khosravi等(2015)表明,对于SCIAMACHY反演的远红波长SIF,零级偏差随时间变化保持稳定,并且与辐射存在线性函数关系。为了纠正该误差,Frankenberg等(2011a)提出了一种基于 O_2-A 波段的最小二乘算法,将荧光与大气散射效应区分开来。随后的研究使用了无植被地物作为参考光谱,并根据荧光值范围、太阳辐射度等标准筛选参考光谱(Joiner等,2012),通过建立平均辐射

度与荧光偏差之间的关系估算了偏差。Joiner 等 (2016) 在现有的校正方案基础上, 考虑了暗电流、杂散光和非线性响应等因素的影响, 并进一步开发了新的经验校正方案, 结果表明, 陆地荧光反演的零级偏移会比海洋反演更明显。Van Schaik 等 (2020) 根据纬度信息, 基于反射率和荧光的线性回归校正了 GOME-2A 卫星反演 SIF 存在的零级偏差, 经校正以后南大洋的 SIF 值接近 0。总体而言, 影响荧光偏差的因素复杂多样, 可以通过经验方程等方法进行校正, 从而减小 SIF 反演的误差。

6 结 语

SIF 被誉为“植被光合作用的探针”, SIF 遥感作为近 10 年来植被遥感领域最具突破性的前沿技术 (章钊颖 等, 2019), 为监测陆地生态系统碳水循环及实现碳中和目标提供了新的思路。本文以 SIF 反演的研究进展为主题, 主要介绍了 SIF 反演算法、反演特征、反演平台、仪器设备等方面的优缺点与适用性, 并重点总结了引起反演误差的可能原因。随着遥感技术的发展, 遥感数据源的丰富, 以及植被辐射传输模型的发展, SIF 高精度、大尺度的反演将得到有力支持。在未来的 SIF 反演方面主要有以下几点展望:

(1) 反演特征的变化。以往的 SIF 反演研究主要采用 O_2 波段, 但近年来由于卫星数据的可获取性, 趋势是更多地仅使用 FLs 反演 SIF, 或者采用两种特征协同反演 SIF, 然而, 针对不同特征中的反演窗口间隔进行标准化的方法仍需要深入研究。

(2) 反演算法的优化。目前红光波段的 SIF 反演算法不够成熟, 而现有算法的精度需要提升, 统计反演算法的参数选择方面还需要深入研究。未来 SIF 反演算法将会进一步地与新兴技术 (如机器学习) 结合, 如结合基于物理约束的深度学习 PINN (Physics-Informed Machine Learning) 来优化 SIF 反演, 将植物光合过程的生理机制等先验知识融入神经网络结构中, 实现在复杂地表环境下 SIF 的高鲁棒性、高精度建模。随着三维辐射传输模型的发展, 未来的 SIF 反演将更多地考虑植被的冠层结构等要素。

(3) 由单波段转向全波段反演。以往的大多数研究侧重于基于特定波段 (红光或远红光) 来反演 SIF, 但忽略了红光与远红光荧光波谱之间可

能存在的差异, 耦合多波段的 SIF 可以更好地指示植被受到的温度、水分等胁迫信息, 未来的研究将侧重于全波段的 SIF 反演。

(4) 遥感数据源的丰富。现有的用于反演 SIF 的卫星绝大多数并非为专门反演 SIF 设计, 时空分辨率往往相互制约。随着 SIFIS、FLEX、Tansat-2、MicroCarb、FLORIS、 CO_2 -M 等一系列卫星的发射和数据积累, 利用不同卫星平台 (如 OCO-2、TROPOMI、TECIS 等) 进行数据融合, 并引入数据同化技术, 将能够弥补单一传感器在观测范围、时空分辨率上的不足, 实现大尺度、高时空分辨率以及高精度的 SIF 反演将成为未来发展的主要趋势。

志 谢 本研究得到中国国家留学基金委的资助。作者感谢南京大学国际地球系统科学研究所论文撰写过程中提供的平台与支持。

参考文献 (References)

- Aggarwal P, Syed Z, Niu X J and El-Sheimy N. 2008. A standard testing and calibration procedure for low cost MEMS inertial sensors and units. *The Journal of Navigation*, 61(2): 323-336 [DOI: 10.1017/S0373463307004560]
- Albert L P, Cushman K C, Zong Y Q, Allen D W, Alonso L and Kellner J R. 2023. Sensitivity of solar-induced fluorescence to spectral stray light in high resolution imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 285: 113313 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113313]
- Alonso L, Sabater N, Vicent J, Cogliati S, Rossini M and Moreno J. 2014. Novel algorithm for the retrieval of solar-induced fluorescence from hyperspectral data based on peak height of apparent reflectance at absorption features//*Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence*. Paris: ESA: 53-54
- Alonso L, Sabater N, Vicent J, Cogliati S, Rossini M and Moreno J. 2014. Novel algorithm for the retrieval of solar-induced fluorescence from hyperspectral data based on peak height of apparent reflectance at absorption features//*Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence*. Paris: CNES: 22
- Alonso L, Sabater N, Vicent J, Mihai L and Moreno J. 2018. Atmospheric and instrumental effects on the fluorescence remote sensing retrieval//*IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Valencia: IEEE: 3939-3942 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517895]
- Amoros-Lopez J, Gomez-Chova L, Vila-Frances J, Alonso L, Calpe J, Moreno J and del Valle-Tascon S. 2008. Evaluation of remote

- sensing of vegetation fluorescence by the analysis of diurnal cycles. *International Journal of Remote Sensing*, 29(17/18): 5423-5436 [DOI: 10.1080/01431160802036391]
- Atherton J, MacArthur A, Hakala T, Maseyk K, Robinson I, Liu W, Honkavaara E and Porcar-Castell A. 2018. Drone measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence acquired with a low-weight DFOV spectrometer system//IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE: 8834-8836 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517474]
- Baker N R. 2008. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59: 89-113 [DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759]
- Bandopadhyay S, Rastogi A and Juszczak R. 2020. Review of top-of-canopy sun-induced fluorescence (SIF) studies from ground, UAV, airborne to spaceborne observations. *Sensors*, 20(4): 1144 [DOI: 10.3390/s20041144]
- Bang J, Lee W S, Park B, Joh H, Woo H K, Jeon S, Ahn J, Jeong C, Kim T I and Oh S J. 2019. Highly sensitive temperature sensor: ligand-treated Ag nanocrystal thin films on PDMS with thermal expansion strategy. *Advanced Functional Materials*, 29(32): 1903047 [DOI: 10.1002/adfm.201903047]
- Belwalkar A, Poblete T, Longmire A, Hornero A, Hernández-Clemente R and Zarco-Tejada P J. 2022. Evaluation of SIF retrievals from narrow-band and sub-nanometer airborne hyperspectral imagers flown in tandem: modelling and validation in the context of plant phenotyping. *Remote Sensing of Environment*, 273: 112986 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.112986]
- Belwalkar A, Poblete T, Longmire A, Hornero A and Zarco-Tejada P J. 2021. Comparing the retrieval of chlorophyll fluorescence from two airborne hyperspectral imagers with different spectral resolutions for plant phenotyping studies//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. Brussels: IEEE: 5845-5848 [DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553265]
- Bendig J, Malenovsky Z, Gautam D and Lucieer A. 2020. Solar-induced chlorophyll fluorescence measured from an unmanned aircraft system: sensor etaloning and platform motion correction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(5): 3437-3444 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2956194]
- Berthold J W, Jacobs S F and Norton M A. 1977. Dimensional stability of fused silica, invar, and several ultra-low thermal expansion materials. *Metrologia*, 13(1): 9-16 [DOI: 10.1088/0026-1394/13/1/004]
- Borel C C, Gerstl S A W and Powers B J. 1991. The radiosity method in optical remote sensing of structured 3-D surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 36(1): 13-44 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90028-5]
- Buareal K, Kato T, Morozumi T, Ono K and Nakashima N. 2023. Red solar-induced chlorophyll fluorescence as a robust proxy for ecosystem-level photosynthesis in a rice field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 336: 109473 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109473]
- Buffat J, Pato M, Alonso K, Auer S, Carmona E, Maier S, Müller R, Rademske P, Rascher U and Scharr H. 2025. Retrieval of sun-induced plant fluorescence in the O₂-A absorption band from DESIS imagery//Computer Vision - ECCV 2024 Workshops. Milan: Springer: 81-100 [DOI: 10.1007/978-3-031-91835-3_6]
- Burkart A, Schickling A, Mateo M P C, Wrobel T J, Rossini M, Cogliati S, Julitta T and Rascher U. 2015. A method for uncertainty assessment of passive sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval using an infrared reference light. *IEEE Sensors Journal*, 15(8): 4603-4611 [DOI: 10.1109/JSEN.2015.2422894]
- Buschmann C. 2007. Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red/far-red of leaves. *Photosynthesis Research*, 92(2): 261-271 [DOI: 10.1007/s11120-007-9187-8]
- Celesti M, Van der Tol C, Cogliati S, Panigada C, Yang P Q, Pinto F, Rascher U, Miglietta F, Colombo R and Rossini M. 2018. Exploring the physiological information of Sun-induced chlorophyll fluorescence through radiative transfer model inversion. *Remote Sensing of Environment*, 215: 97-108 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.05.013]
- Cendrero-Mateo M P, Wieneke S, Damm A, Alonso L, Pinto F, Moreno J, Guanter L, Celesti M, Rossini M, Sabater N, Sabater N, Cogliati S, Julitta T, Rascher U, Goulas Y, Aasen H, Pacheco-Labrador J and Mac Arthur A. 2019. Sun-induced chlorophyll fluorescence III: benchmarking retrieval methods and sensor characteristics for proximal sensing. *Remote Sensing*, 11(8): 962 [DOI: 10.3390/rs11080962]
- Chang C Y, Guanter L, Frankenberg C, Köhler P, Gu L H, Magney T S, Grossmann K and Sun Y. 2020a. Systematic assessment of retrieval methods for canopy far-red solar-induced chlorophyll fluorescence using high-frequency automated field spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(7): e2019JG005533 [DOI: 10.1029/2019JG005533]
- Chang C Y, Zhou R Q, Kira O, Marri S, Skovira J, Gu L H and Sun Y. 2020b. An Unmanned Aerial System (UAS) for concurrent measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence and hyperspectral reflectance toward improving crop monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 294: 108145 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108145]
- Chen R N, Liu L Y and Liu X J. 2022a. Leaf chlorophyll contents dominates the seasonal dynamics of SIF/GPP ratio: evidence from continuous measurements in a maize field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323: 109070 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.109070]
- Chen S L, Stark S C, Nobre A D, Cuartas L A, de Jesus Amore D, Restrepo-Coupe N, Smith M N, Chitra-Tarak R, Ko H, Nelson B W and Saleska S R. 2024. Amazon forest biogeography predicts resilience and vulnerability to drought. *Nature*, 631(8019): 111-117 [DOI: 10.1038/s41586-024-07568-w]
- Chen X G, Huang Y F, Nie C, Zhang S, Wang G Q, Chen S L and Chen Z C. 2022b. A long-term reconstructed TROPOMI solar-induced fluorescence dataset using machine learning algorithms. *Scientific Data*, 9(1): 427 [DOI: 10.1038/s41597-022-01520-1]
- Cogliati S, Rossini M, Julitta T, Meroni M, Schickling A, Burkart A,

- Pinto F, Rascher U and Colombo R. 2015a. Continuous and long-term measurements of reflectance and sun-induced chlorophyll fluorescence by using novel automated field spectroscopy systems. *Remote Sensing of Environment*, 164: 270-281 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.027]
- Cogliati S, Verhoef W, Kraft S, Sabater N, Alonso L, Vicent J, Moreno J, Drusch M and Colombo R. 2015b. Retrieval of sun-induced fluorescence using advanced spectral fitting methods. *Remote Sensing of Environment*, 169: 344-357 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.022]
- Coppo P, Taiti A, Pettinato L, Francois M, Taccola M and Drusch M. 2017. Fluorescence imaging spectrometer (FLORIS) for ESA FLEX mission. *Remote Sensing*, 9(7): 649 [DOI: 10.3390/rs9070649]
- Corp L, Middleton E, Daughtry C and Campbell P. 2006. Solar induced fluorescence and reflectance sensing techniques for monitoring nitrogen utilization in corn//2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. Denver: IEEE: 2267-2270 [DOI: 10.1109/IGARSS.2006.586]
- Cui T X, Sun R, Xiao Z Q, Liang Z Y and Wang J. 2020. Simulating spatially distributed solar-induced chlorophyll fluorescence using a BEPS-SCOPE coupling framework. *Agricultural and Forest Meteorology*, 295: 108169 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108169]
- Damm A, Cogliati S, Colombo R, Fritsche L, Genangeli A, Genesio L, Hanus J, Peressotti A, Rademske P, Rascher U, Schuettemeyer D, Siegmann B, Sturm J and Miglietta F. 2022. Response times of remote sensing measured sun-induced chlorophyll fluorescence, surface temperature and vegetation indices to evolving soil water limitation in a crop canopy. *Remote Sensing of Environment*, 273: 112957 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.112957]
- Damm A, Erler A, Hillen W, Meroni M, Schaepman M E, Verhoef W and Rascher U. 2011. Modeling the impact of spectral sensor configurations on the FLD retrieval accuracy of sun-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 1882-1892 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.011]
- Damm A, Guanter L, Paul-Limoges E, Van der Tol C, Hueni A, Buchmann N, Eugster W, Ammann C and Schaepman M E. 2015a. Far-red sun-induced chlorophyll fluorescence shows ecosystem-specific relationships to gross primary production: an assessment based on observational and modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 166: 91-105 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.06.004]
- Damm A, Guanter L, Verhoef W, Schl pfer D, Garbari S and Schaepman M E. 2015b. Impact of varying irradiance on vegetation indices and chlorophyll fluorescence derived from spectroscopy data. *Remote Sensing of Environment*, 156: 202-215 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.031]
- Daumard F, Champagne S, Fournier A, Goulas Y, Ounis A, Hanocq J F and Moya I. 2010. A field platform for continuous measurement of canopy fluorescence. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(9): 3358-3368 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2046420]
- Dechant B, Ryu Y, Badgley G, Köhler P, Rascher U, Migliavacca M, Zhang Y G, Tagliabue G, Guan K Y, Rossini M, Goulas Y, Zeng Y L, Frankenberg C and Berry J A. 2022. NIRVP: a robust structural proxy for sun-induced chlorophyll fluorescence and photosynthesis across scales. *Remote Sensing of Environment*, 268: 112763 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112763]
- Ding Y B, He X F, Zhou Z Q, Hu J, Cai H J, Wang X Y, Li L S, Xu J T and Shi H Y. 2022. Response of vegetation to drought and yield monitoring based on NDVI and SIF. *Catena*, 219: 106328 [DOI: 10.1016/j.catena.2022.106328]
- Drusch M, Moreno J, Del Bello U, Franco R, Goulas Y, Huth A, Kraft S, Middleton E M, Miglietta F, Mohammed G, Nedbal L, Rascher U, Schuttemeyer D and Verhoef W. 2017. The fluorescence explorer mission concept—ESA's earth explorer 8. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(3): 1273-1284 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2621820]
- Du S S. 2020. Retrieval of Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Based on Domestic Satellites. Beijing: Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences (杜珊珊. 2020. 国产卫星的日光诱导叶绿素荧光反演研究. 北京: 中国科学院空天信息创新研究院) [DOI: 10.44231/d.cnki.gktxc.2020.000007]
- Du S S, Liu L Y, Liu X J, Guo J, Hu J C, Wang S Q and Zhang Y G. 2019. SIFSpec: measuring solar-induced chlorophyll fluorescence observations for remote sensing of photosynthesis. *Sensors*, 19 (13): 3009 [DOI: 10.3390/s19133009]
- Du S S, Liu L Y, Liu X J, Zhang X, Zhang X Y, Bi Y M and Zhang L C. 2018. Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from TanSat satellite. *Science Bulletin*, 63(22): 1502-1512 [DOI: 10.1016/j.scib.2018.10.003]
- Du S S, Liu X J, Chen J D, Duan W N and Liu L Y. 2023. Addressing validation challenges for TROPOMI solar-induced chlorophyll fluorescence products using tower-based measurements and an NIRv-scaled approach. *Remote Sensing of Environment*, 290: 113547 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113547]
- Du S S, Liu X J, Chen J D and Liu L Y. 2022. Prospects for solar-induced chlorophyll fluorescence remote sensing from the SIFIS payload onboard the TECIS-1 satellite. *Journal of Remote Sensing*, 2022: 9845432 [DOI: 10.34133/2022/9845432]
- Du S S, Zhao D R, Guan L L, Liu X J and Liu L Y. 2024. Improving red solar-induced chlorophyll fluorescence retrieval using a data-driven reflectance reconstruction method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4415514 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3478248]
- Evain S, Camenen L and Moya I. 2001. Three channels detector for remote sensing of chlorophyll fluorescence and reflectance from vegetation// 8th international symposium: Physical measurements and signatures in remote sensing, Aussois, CNES, 395-400
- Evain S, Ounis A, Baret F, Goulas Y, Louis J, Ducruet J M, Cerovic Z G and Moya I. 2002. Passive vegetation fluorosensing using atmospheric oxygen absorption bands Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Valencia, Universitat de València Press: 16-20
- Farquhar G D, von Caemmerer S and Berry J A. 1980. A biochemical

- model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149(1): 78-90 [DOI: 10.1007/BF00386231]
- Fereidouni F, Bader A N and Gerritsen H C. 2012. Spectral phasor analysis allows rapid and reliable unmixing of fluorescence microscopy spectral images. *Optics Express*, 20(12): 12729-12741 [DOI: 10.1364/OE.20.012729]
- Fischler M A and Bolles R C. 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6): 381-395 [DOI: 10.1145/358669.358692]
- Fournier A, Daumard F, Champagne S, Ounis A, Goulas Y and Moya I. 2012. Effect of canopy structure on sun-induced chlorophyll fluorescence. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68: 112-120 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.01.003]
- Fournier A, Goulas Y, Daumard F, Ounis A, Champagne S and Moya I. 2014. Effects of vegetation directional reflectance on sun-induced fluorescence retrieval in the oxygen absorption bands//Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescence. Paris: 1-5
- Frankenberg C, Butz A and Toon G C. 2011a. Disentangling chlorophyll fluorescence from atmospheric scattering effects in O₂ A-band spectra of reflected sun-light. *Geophysical Research Letters*, 38(3): L03801 [DOI: 10.1029/2010GL045896]
- Frankenberg C, Drewry D, Geier S, Verma M, Lawson P, Stutz J and Grossmann K. 2016. Remote sensing of solar induced chlorophyll fluorescence from satellites, airplanes and ground-based stations//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing: IEEE: 1707-1710 [DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729436]
- Frankenberg C, Fisher J B, Worden J, Badgley G, Saatchi S S, Lee J E, Toon G C, Butz A, Jung M, Kuze A and Yokota T. 2011b. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophysical Research Letters*, 38(17): L17706 [DOI: 10.1029/2011GL048738]
- Frankenberg C, Köhler P, Magney T S, Geier S, Lawson P, Schwuchert M, McDuffie J, Drewry D T, Pavlick R and Kuhnert A. 2018. The Chlorophyll Fluorescence Imaging Spectrometer (CFIS), mapping far red fluorescence from aircraft. *Remote Sensing of Environment*, 217: 523-536 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.032]
- Frankenberg C, O'Dell C, Berry J, Guanter L, Joiner J, Köhler P, Pollock R and Taylor T E. 2014. Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. *Remote Sensing of Environment*, 147: 1-12 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.007]
- Garzonio R, Di Mauro B, Colombo R and Cogliati S. 2017. Surface reflectance and sun-induced fluorescence spectroscopy measurements using a small hyperspectral UAS. *Remote Sensing*, 9(5): 472 [DOI: 10.3390/rs9050472]
- Gastellu-Etchegorry J P, Demarez V, Pinel V and Zagolski F. 1996. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 58(2): 131-156 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00253-7]
- Gatzelumendi S, de Segura J D G, Gelpi I R, Hernandez R, Egaña J and De Alda K O. 2021. An analysis of new opportunities for operational meteorology in Basque Country based on MTG products and services//EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. Virtual: [s.n.]: 417
- Gentine P and Alemohammad S H. 2018. Reconstructed solar-induced fluorescence: a machine learning vegetation product based on MODIS surface reflectance to reproduce GOME-2 solar-induced fluorescence. *Geophysical Research Letters*, 45(7): 3136-3146 [DOI: 10.1002/2017GL076294]
- GomezChova L, AlonsoChorda L, Lopez J A, Frances J V, Del Valle-Tascon S, Calpe J and Moreno J. 2006. Solar induced fluorescence measurements using a field spectroradiometer. *AIP Conference Proceedings*, 852(1): 274-281 [DOI: 10.1063/1.2349354]
- Goulas Y, Fournier A, Daumard F, Champagne S, Ounis A, Marloie O and Moya I. 2017. Gross primary production of a wheat canopy relates stronger to far red than to red solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing*, 9(1): 97 [DOI: 10.3390/rs9010097]
- Gower J F R and Borstad G A. 1990. Mapping of phytoplankton by solar-stimulated fluorescence using an imaging spectrometer. *International Journal of Remote Sensing*, 11(2): 313-320 [DOI: 10.1080/01431169008955022]
- Grossmann K, Frankenberg C, Magney T S, Hurlock S C, Seibt U and Stutz J. 2018. PhotoSpec: a new instrument to measure spatially distributed red and far-red Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 216: 311-327 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.07.002]
- Gu L, Wood J D, Chang C Y Y, Sun Y and Riggs J S. 2019. Advancing terrestrial ecosystem science with a novel automated measurement system for sun-induced chlorophyll fluorescence for integration with eddy covariance flux networks. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(1): 127-146 [DOI: 10.1029/2018JG004742]
- Guan K Y, Berry J A, Zhang Y G, Joiner J, Guanter L, Badgley G and Lobell D B. 2016. Improving the monitoring of crop productivity using spaceborne solar-induced fluorescence. *Global Change Biology*, 22(2): 716-726 [DOI: 10.1111/gcb.13136]
- Guanter L, Aben I, Tol P, Krijger J M, Hollstein A, Köhler P, Damm A, Joiner J, Frankenberg C and Landgraf J. 2015. Potential of the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard the Sentinel-5 Precursor for the monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3): 1337-1352 [DOI: 10.5194/amt-8-1337-2015]
- Guanter L, Alonso L, Gómez-Chova L, Amorós-López J, Vila J and Moreno J. 2007. Estimation of solar-induced vegetation fluorescence from space measurements. *Geophysical Research Letters*, 34(8): L08401 [DOI: 10.1029/2007GL029289]
- Guanter L, Alonso L, Gómez-Chova L, Meroni M, Preusker R, Fischer J and Moreno J. 2010. Developments for vegetation fluorescence retrieval from spaceborne high-resolution spectrometry in the O₂-A and O₂-B absorption bands. *Journal of Geophysical Research*:

- Atmospheres, 115(D19): D19303 [DOI: 10.1029/2009JD013716]
- Guanter L, Bacour C, Schneider A, Aben I, van Kempen T A, Maignan F, Retscher C, Köhler P, Frankenberg C, Joiner J and Zhang Y G. 2021. The TROPISIF global sun-induced fluorescence dataset from the Sentinel-5P TROPOMI mission. *Earth System Science Data*, 13(11): 5423-5440 [DOI: 10.5194/essd-13-5423-2021]
- Guanter L, Frankenberg C, Dudhia A, Lewis P E, Gómez-Dans J, Kuze A, Suto H and Grainger R G. 2012. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements. *Remote Sensing of Environment*, 121: 236-251 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.006]
- Guanter L, Rossini M, Colombo R, Meroni M, Frankenberg C, Lee J E and Joiner J. 2013. Using field spectroscopy to assess the potential of statistical approaches for the retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from ground and space. *Remote Sensing of Environment*, 133: 52-61 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.01.017]
- Haddad N M, Brudvig L A, Clobert J, Davies K F, Gonzalez A, Holt R D, Lovejoy T E, Sexton J O, Austin M P, Collins C D, Cook W M, Damschen E I, Ewers R M, Foster B L, Jenkins C N, King A J, Laurance W F, Levey D J, Margules C R, Melbourne B A, Nicholls A O, Orrock J L, Song D X and Townshend J R. 2015. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2): e1500052 [DOI: 10.1126/sciadv.1500052]
- Hao D L, Zeng Y L, Qiu H, Biriukova K, Celesti M, Migliavacca M, Rossini M, Asrar G R and Chen M. 2021. Practical approaches for normalizing directional solar-induced fluorescence to a standard viewing geometry. *Remote Sensing of Environment*, 255: 112171 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112171]
- Hao D L, Zeng Y L, Zhang Z Y, Zhang Y G, Qiu H, Biriukova K, Celesti M, Rossini M, Zhu P, Asrar G R and Chen M. 2022. Adjusting solar-induced fluorescence to nadir-viewing provides a better proxy for GPP. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 186: 157-169 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.01.016]
- He L M, Chen J M, Liu J, Mo G and Joiner J. 2017. Angular normalization of GOME-2 Sun-induced chlorophyll fluorescence observation as a better proxy of vegetation productivity. *Geophysical Research Letters*, 44(11): 5691-5699 [DOI: 10.1002/2017GL073708]
- Hernández-Clemente R, North P R J, Hornero A and Zarco-Tejada P J. 2017. Assessing the effects of forest health on sun-induced chlorophyll fluorescence using the FluorFLIGHT 3-D radiative transfer model to account for forest structure. *Remote Sensing of Environment*, 193: 165-179 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.02.012]
- Hornero A, North P R J, Zarco-Tejada P J, Rascher U, Martín M P, Migliavacca M and Hernández-Clemente R. 2021. Assessing the contribution of understory sun-induced chlorophyll fluorescence through 3-D radiative transfer modelling and field data. *Remote Sensing of Environment*, 253: 112195 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112195]
- Hu J C, Liu L Y, Guo J, Du S S and Liu X J. 2018a. Upscaling solar-induced chlorophyll fluorescence from an instantaneous to daily scale gives an improved estimation of the gross primary productivity. *Remote Sensing*, 10(10): 1663 [DOI: 10.3390/rs10101663]
- Hu J C, Liu X J, Liu L Y and Guan L L. 2018b. Evaluating the performance of the SCOPE model in simulating canopy solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing*, 10(2): 250 [DOI: 10.3390/rs10020250]
- Huang L Y J, Zheng Y H, Xing L Y and Hou B Z. 2023. Recent progress of thermoelectric applications for cooling/heating, power generation, heat flux sensor and potential prospect of their integrated applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 45: 102064 [DOI: 10.1016/j.tsep.2023.102064]
- Huemmrich K F, Campbell P, Vargas Z S A, Sackett S, Unger S, May J, Tweedie C and Middleton E. 2022. Leaf-level chlorophyll fluorescence and reflectance spectra of high latitude plants. *Environmental Research Communications*, 4(3): 035001 [DOI: 10.1088/2515-7620/ac5365]
- Imasu R, Matsunaga T, Nakajima M, Yoshida Y, Shiomi K, Morino I, Saitoh N, Niwa Y, Someya Y, Oishi Y, Hashimoto M, Noda H, Hikosaka K, Uchino O, Maksyutov S, Takagi H, Ishida H, Nakajima T Y, Nakajima T and Shi C. 2023. Greenhouse gases Observing SATellite 2 (GOSAT-2): mission overview. *Progress in Earth and Planetary Science*, 10(1): 33 [DOI: 10.1186/s40645-023-00562-2]
- Jacquemoud S and Baret F. 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34(2): 75-91 [DOI: 10.1016/0034-4257(90)90100-Z]
- Jeftenić N, Simić M and Stamenković Z. 2020. Impact of environmental parameters on SNR and RSS in LoRaWAN//2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE). Istanbul: IEEE: 1-6 [DOI: 10.1109/ICECCE49384.2020.9179250]
- Jiang N, Yang Z Q, Luo J and Wang C Y. 2023. Quantifying chilling injury on the photosynthesis system of strawberries: insights from photosynthetic fluorescence characteristics and hyperspectral inversion. *Plants*, 12(17): 3138 [DOI: 10.3390/plants12173138]
- Jin Y, Ge Y, Fan H Y, Li Z S, Jia Y, Liu Y J and Liu H Y. 2024. Downscaling solar-induced chlorophyll fluorescence to a 0.05° monthly product using AVHRR data in East Asia (1995-2003). *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 6379-6393 [DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3369332]
- Jing Z H, Hu X Q, Wang Y, Wu R H, Chen L, Zhang L, Huang Y, Wang S, Li S and Zhang P. 2023. Activities to promote the moon as an absolute calibration reference. *Remote Sensing*, 15(9): 2431 [DOI: 10.3390/rs15092431]
- John J W, Dhyani V, Singh S, Jakhar A, Sarkar A, Das S and Ray S K. 2021. Low-noise, high-detectivity, polarization-sensitive, room-temperature infrared photodetectors based on Ge quantum dot-decorated Si-on-insulator nanowire field-effect transistors. *Nanotechnology*, 32(31): 315205 [DOI: 10.1088/1361-6528/abf6f0]
- Joiner J, Guanter L, Lindstrot R, Voigt M, Vasilkov A P, Middleton E M, Huemmrich K F, Yoshida Y and Frankenberg C. 2013. Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate-

- spectral-resolution near-infrared satellite measurements: methodology, simulations, and application to GOME-2. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(2): 2803-2823 [DOI: 10.5194/amt-6-2803-2013]
- Joiner J, Yoshida Y, Guanter L and Middleton E M. 2016. New methods for the retrieval of chlorophyll red fluorescence from hyperspectral satellite instruments: simulations and application to GOME-2 and SCIAMACHY. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(8): 3939-3967 [DOI: 10.5194/amt-9-3939-2016]
- Joiner J, Yoshida Y, Köhler P, Frankenberg C and Parazoo N C. 2019. L2 Daily Solar-Induced Fluorescence (SIF) from ERS-2 GOME, 1995-2003. The Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center [DOI: 10.3334/ORNLDAAAC/1758]
- Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, Middleton E M, Campbell P K E, Yoshida Y, Kuze A and Corp L A. 2012. Filling-in of near-infrared solar lines by terrestrial fluorescence and other geophysical effects: simulations and space-based observations from SCIAMACHY and GOSAT. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(4): 809-829 [DOI: 10.5194/amt-5-809-2012]
- Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, Yoshida Y, Corp L A and Middleton E M. 2011. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *Biogeosciences*, 8(3): 637-651 [DOI: 10.5194/bg-8-637-2011]
- Julitta T, Burkart A, Colombo R, Rossini M, Schickling A, Migliavacca M, Cogliati S, Wutzler T and Rascher U. 2017. Accurate measurements of fluorescence in the O2A and O2B band using the FloX spectroscopy system—Results and prospects// *Proceedings of the Potsdam GHG flux workshop: from photosystems to ecosystems*. Potsdam: 24-26
- Kallel A. 2020. FluLCVRT: reflectance and fluorescence of leaf and canopy modeling based on Monte Carlo vector radiative transfer simulation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 253: 107183 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.107183]
- Khosravi N, Vountas M, Rozanov V V, Bracher A, Wolanin A and Burrows J P. 2015. Retrieval of terrestrial plant fluorescence based on the in-filling of far-red fraunhofer lines using SCIAMACHY observations. *Frontiers in Environmental Science*, 3: 78 [DOI: 10.3389/fenvs.2015.00078]
- Kim J, Ryu Y and Dechant B. 2022. Development of a filter-based near-surface remote sensing system to retrieve far-red sun-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 283: 113311 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113311]
- Köhler P, Behrenfeld M J, Landgraf J, Joiner J, Magney T S and Frankenberg C. 2020. Global retrievals of solar-induced chlorophyll fluorescence at red wavelengths with TROPOMI. *Geophysical Research Letters*, 47(15): e2020GL087541 [DOI: 10.1029/2020GL087541]
- Köhler P, Frankenberg C, Magney T S, Guanter L, Joiner J and Landgraf J. 2018. Global retrievals of solar-induced chlorophyll fluorescence with TROPOMI: first results and intersensor comparison to OCO-2. *Geophysical Research Letters*, 45(19): 10456-10463 [DOI: 10.1029/2018GL079031]
- Köhler P, Guanter L and Frankenberg C. 2015a. Simplified physically based retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from GOSAT data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(7): 1446-1450 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2407051]
- Köhler P, Guanter L and Joiner J. 2015b. A linear method for the retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from GOME-2 and SCIAMACHY data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(6): 2589-2608 [DOI: 10.5194/amt-8-2589-2015]
- Kooreman M L, Boersma K F, Van Schaik E, Van Versendaal R, Cacciari A and Tuinder O N E. 2020. SIFTER sun-induced vegetation fluorescence data from GOME-2A (Version 2.0). Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) [DOI: 10.21944/gome2a-sifter-v2-sun-induced-fluorescence]
- Kuus A. 1994. A multispectral canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 50(2): 75-82 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)90035-3]
- Lee J E, Frankenberg C, Van der Tol C, Berry J A, Guanter L, Boyce C K, Fisher J B, Morrow E, Worden J R, Asefi S, Badgley G and Saatchi S. 2013. Forest productivity and water stress in Amazonia: observations from GOSAT chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1761): 20130171 [DOI: 10.1098/rspb.2013.0171]
- Li D, Chen J M, Duveiller G, Frankenberg C, Köhler P and Yu K. 2025. A more precise retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from satellite data using artificial neural networks. *Remote Sensing of Environment*, 330: 114987 [DOI: 10.1016/j.rse.2025.114987]
- Li S L, Gao M F, Li Z L, Duan S B and Leng P. 2021. Uncertainty analysis of SVD-based spaceborne far-red sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval using TanSat satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103: 102517 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102517]
- Li S L, Gao M F, Li Z L, Labed J and Verhoef W. 2024. FSM: a reflectance reconstruction method to retrieve full-spectrum sun-induced chlorophyll fluorescence from canopy measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 5540816 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3485576]
- Li X and Xiao J F. 2019. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data. *Remote Sensing*, 11(5): 517 [DOI: 10.3390/rs11050517]
- Li X, Xiao J F and He B B. 2018. Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests. *Remote Sensing of Environment*, 204: 659-671 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.034]
- Li X Y, Huang H G, Shabanov N V, Chen L, Yan K and Shi J. 2020a. Extending the stochastic radiative transfer theory to simulate BRF over forests with heterogeneous distribution of damaged foliage inside of tree crowns. *Remote Sensing of Environment*, 250: 112040 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112040]
- Li X Y, Shabanov N V, Chen L, Zhang Y G and Huang H G. 2022. Modeling solar-induced fluorescence of forest with heterogeneous

- distribution of damaged foliage by extending the stochastic radiative transfer theory. *Remote Sensing of Environment*, 271: 112892 [https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112892]
- Li Z H, Zhang Q, Li J, Yang X, Wu Y F, Zhang Z Y, Wang S H, Wang H Z and Zhang Y G. 2020b. Solar-induced chlorophyll fluorescence and its link to canopy photosynthesis in maize from continuous ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 236: 111420 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111420]
- Liu H, Li Y Y, Shen H Y, Wu B, Jin Y, Yu D L and Sun H M. 2024. An ultra-high linear digitization temperature sensor based on SAR ADC with common-mode temperature drift suppression. *IEEE Transactions on Circuits Systems II: Express Briefs*, 71(3): 1047-1051 [DOI: 10.1109/TCSII.2023.3316013]
- Liu L Y. 2021. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. Wuhan: Hubei Science and Technology Press (刘良云. 2021. 植被高光谱遥感. 武汉: 湖北科学技术出版社)
- Liu L Y, Liu X J and Hu J C. 2015a. Effects of spectral resolution and SNR on the vegetation solar-induced fluorescence retrieval using FLD-based methods at canopy level. *European Journal of Remote Sensing*, 48(1): 743-762 [DOI: 10.5721/EuJRS20154841]
- Liu L Y, Liu X J, Wang Z H and Zhang B. 2016. Measurement and analysis of bidirectional SIF emissions in wheat canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(5): 2640-2651 [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2504089]
- Liu L Y, Zhang Y J, Wang J H and Zhao C J. 2006. Detecting photosynthesis fluorescence under natural sunlight based on fraunhofer line. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 10(1): 130-137 (刘良云, 张永江, 王纪华, 赵春江. 2006. 利用夫琅和费暗线探测自然光条件下的植被光合作用荧光研究. 遥感学报, 10(1): 130-137) [DOI: 10.11834/jrs.20060120]
- Liu W W, Atherton J, Möttöus M, Gastellu-Etchegorry J P, Malenovsky Z, Raunonen P, Åkerblom M, Mäkipää R and Porcar-Castell A. 2019a. Simulating solar-induced chlorophyll fluorescence in a boreal forest stand reconstructed from terrestrial laser scanning measurements. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111274 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111274]
- Liu X J, Guo J, Hu J C and Liu L Y. 2019b. Atmospheric correction for tower-based solar-induced chlorophyll fluorescence observations at O₂-A band. *Remote Sensing*, 11(3): 355 [DOI: 10.3390/rs11030355]
- Liu X J and Liu L Y. 2014. Assessing band sensitivity to atmospheric radiation transfer for space-based retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing*, 6(11): 10656-10675 [DOI: 10.3390/rs6110656]
- Liu X J and Liu L Y. 2015. Improving chlorophyll fluorescence retrieval using reflectance reconstruction based on principal components analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(8): 1645-1649 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2417857]
- Liu X J and Liu L Y. 2018. Influence of the canopy BRDF characteristics and illumination conditions on the retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence. *International Journal of Remote Sensing*, 39(6): 1782-1799 [DOI: 10.1080/01431161.2017.1404165]
- Liu X J, Liu L Y, Zhang S and Zhou X F. 2015b. New spectral fitting method for full-spectrum solar-induced chlorophyll fluorescence retrieval based on principal components analysis. *Remote Sensing*, 7(8): 10626-10645 [DOI: 10.3390/rs70810626]
- Lu W X, Ren H Y, Liang C Y and Li K Q. 2024. Manufacturing PMI forecasting based on wavelet decomposition and a ARMA-GARCH-GRU combination model. *Industrial Engineering Journal*, 27(1): 86-95, 127 (陆文星, 任环宇, 梁昌勇, 李克卿. 2024. 基于小波分解和 ARIMA-GARCH-GRU 组合模型的制造业 PMI 预测. 工业工程, 27(1): 86-95, 127) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-7375.220145]
- Luo H H, Cabot J, Duan M Z and Lee Y K. 2021. An integrated temperature compensation method for thermal expansion-based angular motion sensors//2021 IEEE Sensors. Sydney: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/SENSOR547087.2021.9639602]
- Ma Y. 2022. *Spatial Extension of Satellite Solar-induced Chlorophyll Fluorescence Products*. Beijing: Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences (马彦. 2022. 叶绿素荧光卫星产品的空间尺度扩展研究. 北京: 中国科学院空天信息创新研究院)
- Ma Y, Liu L Y, Chen R N, Du S S and Liu X J. 2020. Generation of a global spatially continuous TanSat solar-induced chlorophyll fluorescence product by considering the impact of the solar radiation intensity. *Remote Sensing*, 12(13): 2167 [DOI: 10.3390/rs12132167]
- Mac Arthur A and Robinson I. 2015. A critique of field spectroscopy and the challenges and opportunities it presents for remote sensing for agriculture, ecosystems, and hydrology//Proceedings Volume 9637, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVII. Toulouse: SPIE: 29-39 [DOI: 10.1117/12.2201046]
- Maier S W. 2001. Method of deriving sunlight induced fluorescence from radiance measurements and devices for executing the method. U.S., No. 6329660
- Maier S W. 2002. Remote sensing and modelling of solar induced fluorescence// Proceedings of the FLEX Workshop. Noordwijk: European Space Agency (ESA) Special Publication: 527
- Mazzoni M, Agati G, Cecchi G, Toci G and Mazzinghi P. 2006. High resolution measurements of solar induced chlorophyll fluorescence in the fraunhofer oxygen bands//Proceedings of the Sixth International Conference on Space Optics. Noordwijk: :ESA: 124
- Maimaitiyiming M, Sagan V, Sidike P, Maimaitijiang M, Miller A J and Kwasniewski M. 2020. Leveraging very-high spatial resolution hyperspectral and thermal UAV imageries for characterizing diurnal indicators of grapevine physiology. *Remote Sensing*, 12(19): 3216 [DOI: 10.3390/rs12193216]
- Malenovsky Z, Regaieg O, Yin T G, Lauret N, Guilleux J, Chavanon E, Duran N, Janoutová R, Delavois A, Meynier J, Medjdoub G, Yang P Q, Van Der Tol C, Morton D, Cook B D and Gastellu-Etchegorry J P. 2021. Discrete anisotropic radiative transfer modeling of solar-induced chlorophyll fluorescence: structural impacts in geometrically explicit vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 263: 112564 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112564]

- Marrs J K, Jones T S, Allen D W and Hutyrá L R. 2021. Instrumentation sensitivities for tower-based solar-induced fluorescence measurements. *Remote Sensing of Environment*, 259: 112413 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112413]
- Mazzoni M, Agati G, Cecchi G, Toci G and Mazzinghi P. 2006. High resolution measurements of solar induced chlorophyll fluorescence in the fraunhofer oxygen bands//*Proceedings of the Sixth International Conference on Space Optics*. Noordwijk: :ESA: 124
- Mazzoni M, Falorni P and Del Bianco S. 2008. Sun-induced leaf fluorescence retrieval in the O_2 -B atmospheric absorption band. *Optics Express*, 16(10): 7014-7022 [DOI: 10.1364/OE.16.007014]
- Mazzoni M, Falorni P and Verhoef W. 2010. High-resolution methods for fluorescence retrieval from space. *Optics Express*, 18(15): 15649-15663 [DOI: 10.1364/OE.18.015649]
- McFarlane J C, Watson R D, Theisen A F, Jackson R D, Ehrler W L, Pinter P J, Idso S B and Reginato R J. 1980. Plant stress detection by remote measurement of fluorescence. *Applied Optics*, 19(19): 3287-3289 [DOI: 10.1364/AO.19.003287]
- Meroni M, Barducci A, Cogliati S, Castagnoli F, Rossini M, Busetto L, Migliavacca M, Cremonese E, Galvagno M, Colombo R and Di Cella U M. 2011. The hyperspectral irradiometer, a new instrument for long-term and unattended field spectroscopy measurements. *Review of Scientific Instruments*, 82(4): 043106 [DOI: 10.1063/1.3574360]
- Meroni M, Busetto L, Colombo R, Guanter L, Moreno J and Verhoef W. 2010. Performance of spectral fitting methods for vegetation fluorescence quantification. *Remote Sensing of Environment*, 114(2): 363-374 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.09.010]
- Meroni M and Colombo R. 2006. Leaf level detection of solar induced chlorophyll fluorescence by means of a subnanometer resolution spectroradiometer. *Remote Sensing of Environment*, 103(4): 438-448 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.016]
- Meroni M, Colombo R and Cogliati S. 2004. High resolution leaf spectral signature for the detection of solar induced chlorophyll fluorescence//*Proceedings of the 2nd ESA Workshop on Remote Sensing of Solar Induced Vegetation*. Montreal: ESA Publications Division: : 5409-5422
- Meroni M, Rossini M, Guanter L, Alonso L, Rascher U, Colombo R and Moreno J. 2009. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: review of methods and applications. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2037-2051 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.003]
- Miao G F, Guan K Y, Yang X, Bernacchi C J, Berry J A, DeLucia E H, Wu J, Moore C E, Meacham K, Cai Y P, Peng B, Kimm H and Masters M D. 2018. Sun-induced chlorophyll fluorescence, photosynthesis, and light use efficiency of a soybean field from seasonally continuous measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(2): 610-623 [DOI: 10.1002/2017JG004180]
- Middleton E M, Cheng Y B, Campbell P E, Huemmrich K F, Corp L A, Bernardes S, Zhang Q Y, Landis D R, Kustas W P, Daughtry C S T, Alfieri J G and Russ A L. 2015. Multi-angle hyperspectral observations using fluorescence and *PRI* to detect plant stress and productivity in a cornfield. *EARSeL eProceedings*, 14(S2): 27-39 [DOI: 10.12760/02-2015-2-03]
- Middleton E M, Rascher U, Corp L A, Huemmrich K F, Cook B D, Noormets A, Schickling A, Pinto F, Alonso L, Damm A, Guanter L, Colombo R, Campbell P K E, Landis D R, Zhang Q Y, Rossini M, Schuettemeyer D and Bianchi R. 2017. The 2013 FLEX—US airborne campaign at the parker tract loblolly pine plantation in North Carolina, USA. *Remote Sensing*, 9(6): 612 [DOI: 10.3390/rs9060612]
- Miller J R, Berger M, Goulas Y, Jacquemoud S, Louis J, Mohammed G, Moise N, Moreno J, Moya I, Pedrós R, Verhoef W and Zarco Tejada P. 2005. Development of a vegetation fluorescence canopy model. ESTEC contract No. 16365/02/NL/FF. Noordwijk, The Netherlands: European Space Research and Technology Centre (ESTEC)
- Mohammadi K, Jiang Y L and Wang G L. 2022. Flash drought early warning based on the trajectory of solar-induced chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(32): e2202767119 [DOI: 10.1073/pnas.2202767119]
- Mohammed G H, Colombo R, Middleton E M, Rascher U, Van der Tol C, Nedbal L, Goulas Y, Pérez-Priego O, Damm A, Meroni M, Joiner J, Cogliati S, Verhoef W, Malenovsky Z, Gastellu-Etcheberry J P, Miller J R, Guanter L, Moreno J, Moya I, Berry J A, Frankenberg C and Zarco-Tejada P J. 2019. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111177 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.04.030]
- Morata M, Siegmann B, Morcillo-Pallares P, Rivera-Caicedo J P and Verrelst J. 2021. Emulation of sun-induced fluorescence from radiance data recorded by the hyplant airborne imaging spectrometer. *Remote Sensing*, 13(21): 4368 [DOI: 10.3390/rs13214368]
- Moya I, Daumard F, Moise N, Ounis A and Goulas Y. 2006. First airborne multiwavelength passive chlorophyll fluorescence measurements over La Mancha (Spain) fields//*Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. Torrent: Universitat de València: 820-825
- Moya I, Loayza H, López M L, Sánchez J M, Goulas Y, Ounis A, Quiroz R and Calera A. 2023. Active in situ and passive airborne fluorescence measurements for water stress detection on a fescue field. *Photosynthesis Research*, 155(2): 159-175 [DOI: 10.1007/s11120-022-00983-y]
- Munro R, Lang R, Klaes D, Poli G, Retscher C, Lindstrot R, Huckle R, Lacan A, Grzegorski M, Holdak A, Kokhanovsky A, Livschitz J and Eisinger M. 2016. The GOME-2 instrument on the Metop series of satellites: instrument design, calibration, and level 1 data processing – an overview. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(3): 1279-1301 [DOI: 10.5194/amt-9-1279-2016]
- Naethe P, Julitta T, Chang C Y Y, Burkart A, Migliavacca M, Guanter L and Rascher U. 2022. A precise method unaffected by atmospheric reabsorption for ground-based retrieval of red and far-red sun-induced chlorophyll fluorescence. *Agricultural and Forest Me-*

- teorology, 325: 109152 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.109152]
- Ni Z Y, Liu Z G, Li Z L, Nerry F, Huo H Y, Sun R, Yang P Q and Zhang W W. 2016. Investigation of atmospheric effects on retrieval of sun-induced fluorescence using hyperspectral imagery. *Sensors*, 16(4): 480 [DOI: 10.3390/s16040480]
- Ni Z Y, Lu Q F, Huo H Y and Zhang H L. 2019. Estimation of chlorophyll fluorescence at different scales: a review. *Sensors*, 19(13): 3000 [DOI: 10.3390/s19133000]
- Ni Z Y, Lu Q F, Wang Z W and Wang F. 2021. A review of retrieving in sun-induced chlorophyll fluorescence. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 11(5): 8-20 (倪卓娅, 陆其峰, 王伟, 王富. 2021. 叶绿素荧光反演方法调研. 气象科技进展, 11(5): 8-20) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.002]
- OCO Science Team, Gunson M and Eldering A. 2021. OCO-3 Level 2 bias-corrected solar-induced fluorescence and other select fields from the IMAP-DOAS algorithm aggregated as daily files, Retrospective processing V10r. Greenbelt: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [DOI: 10.5067/NOD1DPPBCXSO]
- OCO-2 Science Team, Gunson M and Eldering A. 2020. OCO-2 Level 2 bias-corrected solar-induced fluorescence and other select fields from the IMAP-DOAS algorithm aggregated as daily files, Retrospective processing V10r. Greenbelt: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [DOI: 10.5067/XO2LBBNPO010]
- Oehl V and Damm A. 2023. WAFER: a new method to retrieve sun-induced fluorescence based on spectral wavelet decompositions. *Remote Sensing of Environment*, 298: 113786 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113786]
- Papageorgiou G C and Govindjee. 2004. *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis*. Dordrecht: Springer [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9]
- Parazoo N C, Magney T, Norton A, Raczka B, Bacour C, Maignan F, Baker I, Zhang Y G, Qiu B, Shi M J, MacBean N, Bowling D R, Burns S P, Blanken P D, Stutz J, Grossmann K and Frankenberg C. 2020. Wide discrepancies in the magnitude and direction of modeled solar-induced chlorophyll fluorescence in response to light conditions. *Biogeosciences*, 17(13): 3733-3755 [DOI: 10.5194/bg-17-3733-2020]
- Paynter I, Cook B, Corp L, Nagol J and McCorkel J. 2020. Characterization of FIREFLY, an imaging spectrometer designed for remote sensing of solar induced fluorescence. *Sensors*, 20(17): 4682 [DOI: 10.3390/s20174682]
- Peng B, Guan K Y, Zhou W, Jiang C Y, Frankenberg C, Sun Y, He L Y and Köhler P. 2020. Assessing the benefit of satellite-based Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence in crop yield prediction. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 90: 102126 [DOI: 10.1016/j.jag.2020.102126]
- Peng H Y, Cendrero-Mateo M P, Bendig J, Siegmann B, Acebron K, Kneer C, Kataja K, Muller O and Rascher U. 2022. HyScreen: a ground-based imaging system for high-resolution red and far-red solar-induced chlorophyll fluorescence. *Sensors*, 22(23): 9443 [DOI: 10.3390/s22239443]
- Perez-Priego O, Zarco-Tejada P J, Miller J R, Sepulcre-Canto G and Fereres E. 2005. Detection of water stress in orchard trees with a high-resolution spectrometer through chlorophyll fluorescence *in-filling* of the O₂-A band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(12): 2860-2869 [DOI: 10.1109/tgrs.2005.857906]
- Plascyk J A. 1975. The MK II Fraunhofer line discriminator (FLD-II) for airborne and orbital remote sensing of solar-stimulated luminescence. *Optical Engineering*, 14(4): 144339 [DOI: 10.1117/12.7971842]
- Plascyk J A and Gabriel F C. 1975. The Fraunhofer line discriminator MKII-an airborne instrument for precise and standardized ecological luminescence measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 24(4): 306-313 [DOI: 10.1109/TIM.1975.4314448]
- Porcar-Castell A, Tyystjärvi E, Atherton J, Van der Tol C, Flexas J, Pfündel E E, Moreno J, Frankenberg C and Berry J A. 2014. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges. *Journal of Experimental Botany*, 65(15): 4065-4095 [DOI: 10.1093/jxb/eru191]
- Qiu B, Chen J M, Ju W M, Zhang Q and Zhang Y G. 2019. Simulating emission and scattering of solar-induced chlorophyll fluorescence at far-red band in global vegetation with different canopy structures. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111373 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111373]
- Rascher U, Alonso L, Burkart A, Cilia C, Cogliati S, Colombo R, Damm A, Drusch M, Guanter L, Hanus J, Hyvärinen T, Julitta T, Jussila J, Kataja K, Kokkalis P, Kraft S, Kraska T, Matveeva M, Moreno J, Muller O, Panigada C, Piki M, Pinto F, Prey L, Pude R, Rossini M, Schickling A, Schurr U, Schüttemeyer D, Verrelst J and Zemek F. 2015. Sun-induced fluorescence – a new probe of photosynthesis: first maps from the imaging spectrometer *HyPlant*. *Global Change Biology*, 21(12): 4673-4684 [DOI: 10.1111/gcb.13017]
- Regaieg O, Yin T G, Malenovsky Z, Cook B D, Morton D C and Gastellu-Etchegorry J P. 2021. Assessing impacts of canopy 3D structure on chlorophyll fluorescence radiance and radiative budget of deciduous forest stands using DART. *Remote Sensing of Environment*, 265: 112673 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112673]
- Rogalski A. 2003. Infrared detectors: status and trends. *Progress in Quantum Electronics*, 27(2/3): 59-210 [DOI: 10.1016/S0079-6727(02)00024-1]
- Ross J. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Dordrecht: Springer [https://doi.org/10.1007/978-94-009-8647-3]
- Sabater N, Vicent J, Alonso L, Verrelst J, Middleton E M, Porcar-Castell A and Moreno J. 2018. Compensation of oxygen transmittance effects for proximal sensing retrieval of canopy – leaving sun – induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing*, 10(10): 1551 [DOI: 10.3390/rs10101551]
- Sakai Y, Kobayashi H and Kato T. 2020. FLIES-SIF version 1.0: three-dimensional radiative transfer model for estimating solar induced

- fluorescence. *Geoscientific Model Development*, 13(9): 4041-4066 [DOI: 10.5194/gmd-13-4041-2020]
- Sanders A F J, Verstraeten W W, Kooreman M L, Van Leth T C, Beringer J and Joiner J. 2016. Spaceborne sun-induced vegetation fluorescence time series from 2007 to 2015 evaluated with Australian flux tower measurements. *Remote Sensing*, 8(11): 895 [DOI: 10.3390/rs8110895]
- Scodellaro R, Cesana I, D'Alfonso L, Bouzin M, Collini M, Chirico G, Colombo R, Miglietta F, Celesti M, Schuettemeyer D, Cogliati S and Sironi L. 2022. A novel hybrid machine learning phasor-based approach to retrieve a full set of solar-induced fluorescence metrics and biophysical parameters. *Remote Sensing of Environment*, 280: 113196 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113196]
- Shabanov N V, Knyazikhin Y, Baret F and Myneni R B. 2000. Stochastic modeling of radiation regime in discontinuous vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 74(1): 125-144 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00128-0]
- Sioris C E, Bazalgette Courrèges-Lacoste G and Stoll M P. 2003. Filling in of Fraunhofer lines by plant fluorescence: simulations for a nadir-viewing satellite-borne instrument. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D4): 4133 [DOI: 10.1029/2001JD001321]
- Song L, Guanter L, Guan K Y, You L Z, Huete A, Ju W M and Zhang Y G. 2018. Satellite sun-induced chlorophyll fluorescence detects early response of winter wheat to heat stress in the Indian Indo-Gangetic Plains. *Global Change Biology*, 24(9): 4023-4037 [DOI: 10.1111/gcb.14302]
- Sun Y, Frankenberg C, Jung M, Joiner J, Guanter L, Köhler P and Magney T. 2018. Overview of Solar-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF) from the Orbiting Carbon Observatory-2: retrieval, cross-mission comparison, and global monitoring for GPP. *Remote Sensing of Environment*, 209: 808-823 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.016]
- Sun Z Q, Yang S X, Shi S and Yang J. 2021. The effect of principal component analysis parameters on solar-induced chlorophyll fluorescence signal extraction. *Applied Sciences*, 11(11): 4883 [DOI: 10.3390/app11114883]
- Theisen A F. 2002. Detecting chlorophyll fluorescence from orbit: the Fraunhofer line depth model//Muttiah R S, ed. *From Laboratory Spectroscopy to Remotely Sensed Spectra of Terrestrial Ecosystems*. Dordrecht: Springer: 203-232 [DOI: 10.1007/978-94-017-1620-8_10]
- Tong C M, Bao Y F, Zhao F, Fan C R, Li Z J and Huang Q L. 2021. Evaluation of the FluorWPS model and study of the parameter sensitivity for simulating solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing*, 13(6): 1091 [DOI: 10.3390/rs13061091]
- Turner A J, Köhler P, Magney T S, Frankenberg C, Fung I and Cohen R C. 2020. A double peak in the seasonality of California's photosynthesis as observed from space. *Biogeosciences*, 17(2): 405-422 [DOI: 10.5194/bg-17-405-2020]
- Van der Tol C, Julitta T, Yang P Q, Sabater N, Reiter I, Tudoroiu M, Schuettemeyer D and Drusch M. 2023. Retrieval of chlorophyll fluorescence from a large distance using oxygen absorption bands. *Remote Sensing of Environment*, 284: 113304 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113304]
- Van der Tol C, Verhoef W, Timmermans J, Verhoef A and Su Z. 2009. An integrated model of soil-canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences*, 6(12): 3109-3129 [DOI: 10.5194/bg-6-3109-2009]
- Van der Tol C, Vilfan N, Dauwe D, Cendrero-Mateo M P and Yang P Q. 2019. The scattering and re-absorption of red and near-infrared chlorophyll fluorescence in the models Fluspect and SCOPE. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111292 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111292]
- Van Schaik E, Kooreman M L, Stammes P, Tilstra L G, Tuinder O N E, Sanders A F J, Verstraeten W W, Lang R, Cacciari A, Joiner J, Peters W and Boersma K F. 2020. Improved SIFTER v2 algorithm for long-term GOME-2A satellite retrievals of fluorescence with a correction for instrument degradation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(8): 4295-4315 [DOI: 10.5194/amt-13-4295-2020]
- Van Wittenberghe S, Alonso L, Verrelst J, Hermans I, Delegido J, Veroustraete F, Valcke R, Moreno J and Samson R. 2013. Upward and downward solar-induced chlorophyll fluorescence yield indices of four tree species as indicators of traffic pollution in Valencia. *Environmental Pollution*, 173: 29-37 [DOI: 10.1016/j.envpol.2012.10.003]
- Van Wittenberghe S, Alonso L, Verrelst J, Moreno J and Samson R. 2015. Bidirectional sun-induced chlorophyll fluorescence emission is influenced by leaf structure and light scattering properties—A bottom-up approach. *Remote Sensing of Environment*, 158: 169-179 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.012]
- Verhoef W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16(2): 125-141 [DOI: 10.1016/0034-4257(84)90057-9]
- Verhoef W, Van Der Tol C and Middleton E M. 2018. Hyperspectral radiative transfer modeling to explore the combined retrieval of biophysical parameters and canopy fluorescence from FLEX – Sentinel-3 tandem mission multi-sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 204: 942-963 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.006]
- Verrelst J, Rivera J P, Van Der Tol C, Magnani F, Mohammed G, and Moreno J. 2015. Global sensitivity analysis of the SCOPE model: What drives simulated canopy-leaving sun-induced fluorescence? *Remote Sensing of Environment*, 166: 8-21 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.06.002]
- Wang C, Chen Y P, Tong W T, Zhou W, Li J, Xu B D and Hu Q. 2023. Mapping crop phenophases in reproductive growth period by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence: a case study in mid-temperate zone in China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 205: 191-205 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.10.005]
- Wang N, Clevers J G P W, Wieneke S, Bartholomeus H and Kooistra L. 2022. Potential of UAV-based sun-induced chlorophyll fluorescence to detect water stress in sugar beet. *Agricultural and Forest*

- Meteorology, 323: 109033 [DOI: 10.1016/j. agrformet. 2022. 109033]
- Wang N, Suomalainen J, Bartholomeus H, Kooistra L, Masiliūnas D and Clevers J G P W. 2021. Diurnal variation of sun-induced chlorophyll fluorescence of agricultural crops observed from a point-based spectrometer on a UAV. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96: 102276 [DOI: 10. 1016/j. jag. 2020. 102276]
- Wang S H, Yang D, Yang R, Li T and Sun H Z. 2020a. Statistical-based retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence at proximal and airborne scales using (imaging) spectroscopy data//*Proceedings Volume 11566, AOPC 2020: Optical Spectroscopy and Imaging; and Biomedical Optics*. Beijing: SPIE: 48-53 [DOI: 10. 1117/12.2575939]
- Wang S H, Zhang L F, Huang C P and Qiao N. 2017. Ground-based long-term remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: methods, challenges and opportunities//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Fort Worth: IEEE: 3862-3865 [DOI: 10.1109/IGARSS. 2017. 8127845]
- Wang S H, Zhang Y G, Ju W M, Chen J M, Ciais P, Cescatti A, Sardans J, Janssens I A, Wu M S, Berry J A, Campbell E, Fernandez-Martinez M, Alkama R, Sftch S, Friedlingstein P, Smith W K, Yuan W P, He W, Lombardozzi D, Kautz M, Zhu D, Lienert S, Kato E, Poulter B, Sanders T G M, Kruger I, Wang R, Zeng N, Tian H Q, Vuichard N, Jain A K, Wiltshire A, Haverd V, Goll D S and Penuelas J. 2020b. Recent global decline of CO₂ fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science*, 370(6522): 1295-1300 [DOI: 10.1126/science.abb7772]
- Wang S Q, Liu L Y and Zhang Y G. 2020. *Hyperspectral Observation Methods and Applications for Terrestrial Ecosystems*. Beijing: Science Press (王绍强, 刘良云, 张永光. 2020. 陆地生态系统高光谱观测方法与应用. 北京: 科学出版社)
- Wang X R, Qiu B, Li W K and Zhang Q. 2019. Impacts of drought and heatwave on the terrestrial ecosystem in China as revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence. *Science of the Total Environment*, 693: 133627 [DOI: 10.1016/j. scitotenv. 2019. 133627]
- Wieneke S, Ahrends H, Damm A, Pinto F, Stadler A, Rossini M and Rascher U. 2016. Airborne based spectroscopy of red and far-red sun-induced chlorophyll fluorescence: implications for improved estimates of gross primary productivity. *Remote Sensing of Environment*, 184: 654-667 [DOI: 10.1016/j. rse. 2016. 07. 025]
- Wieneke S, Pacheco-Labrador J, Mahecha M D, Poblador S, Vicca S and Janssens I A. 2024. Comparing the quantum use efficiency of red and far-red sun-induced fluorescence at leaf and canopy under heat-drought stress. *Remote Sensing of Environment*, 311: 114294 [DOI: 10.1016/j. rse. 2024. 114294]
- Wolanin A, Rozanov V V, Dinter T, Noël S, Vountas M, Burrows J P and Bracher A. 2015. Global retrieval of marine and terrestrial chlorophyll fluorescence at its red peak using hyperspectral top of atmosphere radiance measurements: feasibility study and first results. *Remote Sensing of Environment*, 166: 243-261 [DOI: 10. 1016/j. rse. 2015. 05. 018]
- Wu G H, Guan K Y, Kimm H, Miao G F, Yang X and Jiang C Y. 2024a. Ground far-red sun-induced chlorophyll fluorescence and vegetation indices in the US Midwestern agroecosystems. *Scientific Data*, 11(1): 228 [DOI: 10.1038/s41597-024-03004-w]
- Wu G H, Jiang C Y, Kimm H, Wang S, Bernacchi C, Moore C E, Suyker A, Yang X, Magney T, Frankenberg C, Ryu Y, Dechant B and Guan K Y. 2022. Difference in seasonal peak timing of soybean far-red SIF and GPP explained by canopy structure and chlorophyll content. *Remote Sensing of Environment*, 279: 113104 [DOI: 10.1016/j. rse. 2022. 113104]
- Wu K, Palmer P I, Wu D E, Jouglet D, Feng L and Oda T. 2023. Theoretical assessment of the ability of the MicroCarb satellite cityscan observing mode to estimate urban CO₂ emissions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(2): 581-602 [DOI: 10.5194/ amt-16-581-2023]
- Wu L S, Zhang Y G, Zhang Z Y, Zhang X K and Wu Y F. 2022. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence and its applications in terrestrial ecosystem monitoring. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46(10): 1167-1199 (吴霖升, 张永光, 章钊颖, 张小康, 吴云飞. 2022. 日光诱导叶绿素荧光遥感及其在陆地生态系统监测中的应用. 植物生态学报, 46(10): 1167-1199) [DOI: 10. 17521/cjpe. 2022. 0233]
- Wu Y F, Zhang Z Y, Wu L S and Zhang Y G. 2024b. Solar-induced chlorophyll fluorescence tracks canopy photosynthesis under dry conditions in a semi-arid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 356: 110174 [DOI: 10.1016/j. agrformet. 2024. 110174]
- Xie X Y, Zhao W, Yin G F, Fu H and Wang X D. 2025. Divergent ecological restoration driven by afforestation along the north and south banks of the Yarlung Zangbo middle reach. *Land Degradation and Development*, 36(2): 521-532 [DOI: 10.1002/ldr. 5376]
- Yan G J, Xie T and Mu X H. 2023. An introduction to radiometric concepts. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(10): 2445-2448 (阎广建, 谢天, 穆西哈. 2023. 辐射物理量概念介绍. 遥感学报, 27(10): 2445-2448) [DOI: 10.11834/jrs. 20233403]
- Yan L S, Liu X J, Chen J D, Zou C, Du K Q and Liu L Y. 2023. Performance of data-driven algorithm for SIF retrieval from tower-based observation. *Remote Sensing Technology and Application*, 38(4): 924-934 (鄢列慎, 刘新杰, 陈冀岱, 邹楚, 杜凯奇, 刘良云. 2023. 数据驱动 SIF 反演算法在塔基观测中的应用效果评价. 遥感技术与应用, 38(4): 924-934) [DOI: 10.11873/j. issn. 1004-0323. 2023. 4. 0924]
- Yang J J, Liu Z Q, Yu Q and Lu X L. 2024. Estimation of global transpiration from remotely sensed solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 303: 113998 [DOI: 10. 1016/j. rse. 2024. 113998]
- Yang P Q, Prikaziuk E, Verhoef W and Van Der Tol C. 2021. SCOPE 2.0: a model to simulate vegetated land surface fluxes and satellite signals. *Geoscientific Model Development*, 14(7): 4697-4712 [DOI: 10.5194/gmd-14-4697-2021]
- Yang P Q, Verhoef W and Van der Tol C. 2017. The mSCOPE model: a

- simple adaptation to the SCOPE model to describe reflectance, fluorescence and photosynthesis of vertically heterogeneous canopies. *Remote Sensing of Environment*, 201: 1-11 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.029]
- Yang X, Shi H Y, Stovall A, Guan K Y, Miao G F, Zhang Y G, Zhang Y, Xiao X M, Ryu Y and Lee J E. 2018. FluoSpec 2—an automated field spectroscopy system to monitor canopy solar-induced fluorescence. *Sensors*, 18(7): 2063 [DOI: 10.3390/s18072063]
- Yang X, Tang J W, Mustard J F, Lee J E, Rossini M, Joiner J, Munger J W, Kornfeld A and Richardson A D. 2015. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest. *Geophysical Research Letters*, 42(8): 2977-2987 [DOI: 10.1002/2015GL063201]
- Yao L, Liu Y, Yang D X, Cai Z N, Wang J, Lin C, Lu N M, Lyu D, Tian L F, Wang M H, Yin Z S, Zheng Y Q and Wang S S. 2022. Retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) from satellite measurements: comparison of SIF between TanSat and OCO-2. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(7): 2125-2137 [DOI: 10.5194/amt-15-2125-2022]
- Yao L, Yang D X, Liu Y, Wang J, Liu L Y, Du S S, Cai Z N, Lu N M, Lyu D, Wang M H, Yin Z S and Zheng Y Q. 2021. A new global solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) data product from TanSat measurements. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(3): 341-345 [DOI: 10.1007/s00376-020-0204-6]
- Yoshida Y, Joiner J, Tucker C, Berry J, Lee J E, Walker G, Reichle R, Koster R, Lyapustin A and Wang Y. 2015. The 2010 Russian drought impact on satellite measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence: insights from modeling and comparisons with parameters derived from satellite reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 166: 163-177 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.06.008]
- Yu L, Wen J, Chang C Y, Frankenberg C and Sun Y. 2019. High-resolution global contiguous SIF of OCO-2. *Geophysical Research Letters*, 46(3): 1449-1458 [DOI: 10.1029/2018GL081109]
- Zarco-Tejada P J, Berni J A J, Suárez L, Sepulcre-Cantó G, Morales F and Miller J R. 2009. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*, 113(6): 1262-1275 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.02.016]
- Zarco-Tejada P J, González-Dugo V and Berni J A J. 2012. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117: 322-337 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.007]
- Zarco-Tajeda P J, Miller J R, Haboudane D, Tremblay N and Apostol S. 2003. Detection of chlorophyll fluorescence in vegetation from airborne hyperspectral CASI imagery in the red edge spectral region//IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse: IEEE: 598-600 [DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1293854]
- Zarco-Tejada P J, Suárez L and Gonzalez-Dugo V. 2013. Spatial resolution effects on chlorophyll fluorescence retrieval in a heterogeneous canopy using hyperspectral imagery and radiative transfer simulation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4): 937-941 [DOI: 10.1109/LGRS.2013.2252877]
- Zeng Y L, Badgley G, Chen M, Li J, Anderegg L D L, Kornfeld A, Liu Q H, Xu B D, Yang B, Yan K and Berry J A. 2020. A radiative transfer model for solar induced fluorescence using spectral invariants theory. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111678 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111678]
- Zeng Y L, Chen M, Hao D L, Damm A, Badgley G, Rascher U, Johnson J E, Dechant B, Siegmann B, Ryu Y, Qiu H, Krieger V, Panigada C, Celesti M, Miglietta F, Yang X and Berry J A. 2022. Combining near-infrared radiance of vegetation and fluorescence spectroscopy to detect effects of abiotic changes and stresses. *Remote Sensing of Environment*, 270: 112856 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112856]
- Zhan C H, Zhang Z Y and Zhang Y G. 2020. Recent advances in the radiative transfer models of sun-induced chlorophyll fluorescence. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(8): 945-957 (詹春晖, 章钊颖, 张永光. 2020. 日光诱导叶绿素荧光辐射传输模型研究进展. *遥感学报*, 24(8): 945-957) [DOI: 10.11834/jrs.20209379]
- Zhang D L, Yan X L, Zhang E C and Pan S M. 2016a. A long time low drift integrator with temperature control. *Review of Scientific Instruments*, 87(10): 105119 [DOI: 10.1063/1.4964806]
- Zhang J, Sun B, Yang C H, Wang C Y, You Y H, Zhou G S, Liu B, Wang C F, Kuai J and Xie J. 2022b. A novel composite vegetation index including solar-induced chlorophyll fluorescence for seedling rapeseed net photosynthesis rate retrieval. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198: 107031 [DOI: 10.1016/j.compag.2022.107031]
- Zhang J R, Xiao J F, Tong X J, Zhang J S, Meng P, Li J, Liu P R and Yu P Y. 2022a. NIRv and SIF better estimate phenology than NDVI and EVI: effects of spring and autumn phenology on ecosystem production of planted forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 315: 108819 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.108819]
- Zhang L F, Wang S H and Huang C P. 2018. Top-of-atmosphere hyperspectral remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: a review of methods. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(1): 1-12 (张立福, 王思恒, 黄长平. 2018. 太阳诱导叶绿素荧光的卫星遥感反演方法. *遥感学报*, 22(1): 1-12) [DOI: 10.11834/jrs.20187211]
- Zhang Q, Chen J M, Ju W M, Zhang Y G, Li Z H, He L M, Pacheco-Labrador J, Li J, Qiu B, Zhang X K, Qiu F, Chen B, Chou S R, Zhang Z Y and Shan N. 2021. Ground-based multiangle solar-induced chlorophyll fluorescence observation and angular normalization for assessing crop productivity. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(5): e2020JG006082 [DOI: 10.1029/2020JG006082]
- Zhang Q, Zhang X K, Li Z H, Wu Y F and Zhang Y G. 2019a. Comparison of Bi-hemispherical and hemispherical-conical configurations for in situ measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing*, 11(22): 2642 [DOI: 10.3390/rs11222642]
- Zhang Y, Fang J N, Smith W K, Wang X, Gentine P, Scott R L, Migliavacca M, Jeong S, Litvak M and Zhou S. 2023a. Satellite solar-in-

- duced chlorophyll fluorescence tracks physiological drought stress development during 2020 southwest US drought. *Global Change Biology*, 29(12): 3395-3408 [DOI: 10.1111/gcb.16683]
- Zhang Y, Joiner J, Alemohammad S H, Zhou S and Gentile P. 2018a. A global spatially contiguous solar-induced fluorescence (CSIF) dataset using neural networks. *Biogeosciences*, 15(19): 5779-5800 [DOI: 10.5194/bg-15-5779-2018]
- Zhang Y G, Guanter L, Berry J A, Van der Tol C, Yang X, Tang J W and Zhang F M. 2016b. Model-based analysis of the relationship between sun-induced chlorophyll fluorescence and gross primary production for remote sensing applications. *Remote Sensing of Environment*, 187: 145-155 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.016]
- Zhang Z Y, Chen J M, Guanter L, He L M and Zhang Y G. 2019b. From canopy-leaving to total canopy far-red fluorescence emission for remote sensing of photosynthesis: first results from TROPOMI. *Geophysical Research Letters*, 46(21): 12030-12040 [DOI: 10.1029/2019GL084832]
- Zhang Z Y, Fu M, Xu J, Lin J, Zhang X W, and Zhang Y G. 2025. First global retrievals of solar induced chlorophyll fluorescence from the SIFIS instrument onboard the Chinese gougong satellite. *Geophysical Research Letters*, 52(21): e2025GL118327 [DOI: 10.1029/2025GL118327]
- Zhang Z Y, Guanter L, Porcar-Castell A, Rossini M, Pacheco-Labrador J and Zhang Y G. 2023b. Global modeling diurnal gross primary production from OCO-3 solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 285: 113383 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113383]
- Zhang Z Y, Wang S H, Qiu B, Song L and Zhang Y G. 2019. Retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence and advancements in carbon cycle application. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(1): 37-52 (章钊颖, 王松寒, 邱博, 宋练, 张永光. 2019. 日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展. *遥感学报*, 23(1): 37-52) [DOI: 10.11834/jrs.20197485]
- Zhang Z Y, Xu J, Fu A M and Zhang Y G. 2023c. Global retrievals of terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence with TECIS-1 satellite//AGU Fall Meeting Abstracts. AGU, San Francisco, USA. American Geophysical Union
- Zhang Z Y, Zhang X K, Porcar-Castell A, Chen J M, Ju W M, Wu L S, Wu Y F and Zhang Y G. 2022c. Sun-induced chlorophyll fluorescence is more strongly related to photosynthesis with hemispherical than nadir measurements: evidence from field observations and model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 279: 113118 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113118]
- Zhang Z Y and Zhang Y G. 2023. Solar angle matters: diurnal pattern of solar-induced chlorophyll fluorescence from OCO-3 and TROPOMI. *Remote Sensing of Environment*, 285: 113380 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113380]
- Zhang Z Y and Zhang Y G. 2025. Mitigating the directional retrieval error of solar-induced chlorophyll fluorescence in the red band. *Remote Sensing of Environment*, 316: 114496 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114496]
- Zhang Z Y, Zhang Y G, Joiner J and Migliavacca M. 2018b. Angle matters: bidirectional effects impact the slope of relationship between gross primary productivity and sun-induced chlorophyll fluorescence from Orbiting Carbon Observatory-2 across biomes. *Global Change Biology*, 24(11): 5017-5020 [DOI: 10.1111/gcb.14427]
- Zhang Z Y, Zhang Y G, Zhang Y and Chen J M. 2020. Correcting clear-sky bias in gross primary production modeling from satellite solar-induced chlorophyll fluorescence data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(9): e2020JG005822 [DOI: 10.1029/2020JG005822]
- Zhao F, Dai X, Verhoef W, Guo Y Q, Van der Tol C, Li Y G and Huang Y B. 2016. FluorWPS: a Monte Carlo ray-tracing model to compute sun-induced chlorophyll fluorescence of three-dimensional canopy. *Remote Sensing of Environment*, 187: 385-399 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.036]
- Zhao F, Guo Y Q, Verhoef W, Gu X F, Liu L Y and Yang G J. 2014. A method to reconstruct the solar-induced canopy fluorescence spectrum from hyperspectral measurements. *Remote Sensing*, 6(10): 10171-10192 [DOI: 10.3390/rs61010171]
- Zhao F, Li R, Qin W H and Ding W J. 2018a. A model to simulate the radiative transfer of solar-induced fluorescence for three-dimensional canopies//IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE: 6003-6006 [DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519160]
- Zhao F, Li R, Verhoef W, Cogliati S, Liu X J, Huang Y B, Guo Y Q and Huang J X. 2018b. Reconstruction of the full spectrum of solar-induced chlorophyll fluorescence: intercomparison study for a novel method. *Remote Sensing of Environment*, 219: 233-246 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.021]
- Zhao F, Li Z J, Verhoef W, Fan C R, Luan H X, Yin T G, Zhang J, Liu Z Q, Tong C M and Bao Y F. 2022. Simulation of solar-induced chlorophyll fluorescence by modeling radiative coupling between vegetation and atmosphere with WPS. *Remote Sensing of Environment*, 277: 113075 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113075]
- Zhao F, Ma W W, Zhao J, Guo Y Q, Tariq M and Li J. 2024a. Global retrieval of the spectrum of terrestrial chlorophyll fluorescence: first results with TROPOMI. *Remote Sensing of Environment*, 300: 113903 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113903]
- Zhao F, Tariq M, Ma W W, Wu Z F and Zhang Y S. 2024b. An enhanced method for reconstruction of full SIF spectrum for near-ground measurements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 134: 104240 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.104240]
- Zhou Y S, Lu X P, Huang Y B, Gao Z and Zheng Y Q. 2020. New solar-induced chlorophyll fluorescence retrieval algorithm based on tansat satellite data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-3-2020: 209-214 [DOI: 10.5194/isprs-annals-V-3-2020-209-2020]
- Zhu J, Yin Y M, Lu J S, Warner T A, Xu X W, Lyu M Y, Wang X, Guo C L, Cheng T, Zhu Y, Cao W X, Yao X, Zhang Y G and Liu L Y. 2023. The relationship between wheat yield and sun-induced chlorophyll fluorescence from continuous measurements over the growing season. *Remote Sensing of Environment*, 298: 113791 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113791]

Zou C, Du S S, Liu X J, Liu L Y, Wang Y Y and Li Z. 2021. Optimizing the empirical parameters of the data-driven algorithm for SIF

retrieval for SIFIS onboard TECIS-1 satellite. *Sensors*, 21(10): 3482 [DOI: 10.3390/s21103482]

Review of sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval algorithms for remote sensing from space, airborne, and ground platforms

TAO Shiyu^{1,2}, CHEN Jingming³, ZHANG Yongguang^{1,4,5}, WU Linsheng^{1,2}, ZHANG Zhaoying^{1,2}

1. International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

3. Department of Geography and Planning, University of Toronto, Toronto M5S3G 3;

4. Key Laboratory for Land Satellite Remote Sensing Applications of Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China;

5. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Novel Software Technology and Industrialization, Nanjing 210023, China

Abstract: Sun-induced chlorophyll fluorescence (SIF) is a weak spectral signal emitted by chlorophyll under solar radiation and can directly reflect the process of vegetation photosynthesis. It serves as a critical remote sensing indicator for accurately monitoring vegetation productivity and the carbon – water cycle of terrestrial ecosystems. In recent years, with the gradual improvement of the space – air – ground multilevel fluorescence remote sensing observation system, SIF retrieval techniques have achieved rapid progress in terms of algorithms, instruments, observation platforms, and product development, showing high application potential in vegetation photosynthesis monitoring, carbon cycle assessment, and global change research.

Existing reviews on SIF retrieval mostly focus on specific aspects, such as algorithms or instruments, and lack a systematic synthesis of recent developments in algorithms, equipment, platforms, and products. Over the past five years, substantial progress has been achieved in algorithm improvements and product applications, but a comprehensive review summarizing and critically analyzing these advances is still lacking. To address this gap, this study presents a comprehensive review of the current status and progress of research on SIF retrieval.

Specifically, the study traces the historical development of SIF retrieval since its first successful implementation in 1975 and introduces multiple categories of retrieval algorithms on the basis of different principles. These algorithms include physics-based approaches (e.g., Fraunhofer line discrimination), empirical and statistical methods (e.g., singular value decomposition), and emerging machine learning techniques. In addition, this study systematically introduces SIF retrieval methods that are based on 1D (homogeneous canopies) and 3D (heterogeneous canopies) radiative transfer models. For each category, the theoretical basis, technical characteristics, strengths, and limitations are analyzed.

This study further summarizes the representative instruments, observation platforms, and major products of SIF retrieval and reviews theoretical and practical achievements from recent multiplatform (ground, airborne, and satellite) and multiscale observations. For ground-based platforms, we provide a systematic overview of observation instruments (e.g., Fraunhofer line radiometer) and automated monitoring systems (e.g., hyperspectral IR radiometer). For airborne platforms, we describe the instrumentation characteristics of aircraft- (e.g., reflective optics system imaging spectrometer) and UAV-based (e.g., six-band multispectral camera) observation systems. For satellite platforms, we review the development of the first spaceborne SIF retrieval mapping, which was achieved in 2007 by using the medium-resolution imaging spectrometer onboard the Environmental Satellite, and summarize the major SIF products that have been generated to date. In addition, methods for assessing retrieval uncertainties are briefly introduced, and six key issues (e.g., atmospheric effect) affecting SIF retrieval accuracy are identified and discussed with reference to existing literature. On the basis of these analyses, the study further evaluates the challenges currently faced by the field and outlines potential directions for future development.

In summary, this study systematically synthesizes the progress of research on SIF retrieval from the perspectives of algorithms, instruments, platforms, and products and provides a comprehensive overview of achievements and limitations. The review aims to serve as a useful reference for domestic and international studies and promote the extensive application of SIF in carbon cycle assessment, gross primary production estimation, climate change research, and ecosystem monitoring.

Key words: SIF, remote sensing retrieval, remote sensing instruments, estimation methods, ecological monitoring, multi-platform, Carbon-water cycle

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42125105, 42522108, 42471405, 42201398); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20240068)