

# 叶绿素荧光反演方法调研

倪卓娅<sup>1</sup> 陆其峰<sup>1, 2</sup> 王志伟<sup>1</sup> 王富<sup>1</sup>

(1 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2 中国气象科学研究院, 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 简要阐述了叶绿素荧光提取方法的研究现状, 详细总结了不同尺度的叶绿素荧光反演算法, 包括叶片尺度、近地面和航天平台, 并介绍了不同方法存在的优缺点, 基于当前的研究现状, 指出了现有算法存在的关键问题, 并给出了未来叶绿素荧光反演与应用的建议。

**关键词:** 日光诱导叶绿素荧光, 叶片尺度, 近地面, 星载荧光

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.002

## A Review of Retrieving in Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence

Ni Zhuoya<sup>1</sup>, Lu Qifeng<sup>1, 2</sup>, Wang Zhiwei<sup>1</sup>, Wang Fu<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environment Satellites, National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** In this paper, the fluorescence retrieval methods from multiple scales, ranging from near the ground to the use of spaceborne sensors, are analyzed and summarized in detail. The advantages and disadvantages of different sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval methods are compared, and the key issues of the current sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval algorithms are discussed. Finally, suggested solutions and key problems are proposed for future research.

**Keywords:** sun-induced chlorophyll fluorescence, leaf scale, the ground, satellite chlorophyll fluorescence

### 0 引言

自1980年以来, 植被叶绿素荧光一直是监测植物生理状态变化的有效、无损和直接的方法<sup>[1-2]</sup>。叶绿素荧光在太阳光的照射下被光合组织激发, 产生的光谱范围为640~800 nm, 其中2个峰值位于685 nm和740 nm<sup>[3-5]</sup>。由于光合作用和叶绿素荧光之间存在直接和紧密的关系<sup>[6-11]</sup>, 可利用遥感技术对叶绿素荧光进行估测得到总初级生产力(GPP)<sup>[9, 12-23]</sup>。因此, 叶绿素荧光发射可以用作光合作用的指示剂。

日光诱导叶绿素荧光(SIF)提取方法主要是依据夫琅禾费暗线或氧气吸收带中的荧光信号填充原理<sup>[24]</sup>。在近地面, SIF提取方法分为主动<sup>[25-32]</sup>和被动测量2种。为了将近地表SIF反演算法扩展到卫星平台, 需要准确的大气校正信息以获得荧光辐亮度。由于难以获得准确的大气参数, 因此近地表SIF反演算法在

卫星平台上的适用性较差。自从制作第一张全球SIF图<sup>[33-35]</sup>以来, 许多研究人员基于夫琅禾费暗线或氧气吸收带中的荧光信号填充原理开发了适用于卫星数据的SIF反演方法, 并成功地从GOSAT、GOME-2、OCO-2、SCIAMACHY和TanSat数据中提取了SIF<sup>[36-43]</sup>。星载荧光提取方法包括物理方法<sup>[33, 36, 38, 44-48]</sup>和统计方法<sup>[34, 37-38, 43, 49-51]</sup>。为了更深入了解叶绿素荧光和扩展其应用, 欧空局开展了荧光探索器项目(FLEX)。FLEX任务将通过绘制植被荧光图达到量化光合作用活动的目的, 其携带荧光传感器FLORIS将与Copernicus Sentinel-3卫星之一同步进入轨道, 该卫星将于2022年发射<sup>[52]</sup>。

近年来, 已经发表了关于叶绿素荧光提取方法的文章。Maxwell等<sup>[53]</sup>介绍了在野外和实验室情况下叶绿素荧光提取的方法和应用。Meroni等<sup>[5]</sup>总结了SIF提取的方法, 包括基于辐亮度的方法和基于反射率的方法及其在不同尺度上的应用。Cendrero-Mateo等<sup>[54]</sup>总结了不同氮处理条件下冠层和叶片尺度上主动和被动叶绿素荧光的测量结果。Wang等<sup>[55]</sup>介绍了叶绿素荧光测量系统的最新研究进展以及基于统计算法的冠层

收稿日期: 2019年9月15日; 修回日期: 2020年4月30日  
第一作者: 倪卓娅(1986—), Email: nizy@cma.gov.cn  
资助信息: 国家重点研发计划(2018YFC1506800); 国家自然科学基金(41701421, 41701425, 41711411)

荧光提取方法。Frankenberg等<sup>[56]</sup>发表了一篇综述，全面介绍了叶绿素荧光的起源，及其在冠层尺度和全球尺度光合作用和叶绿素荧光的关系。有关研究总结了从叶片尺度到冠层尺度被动叶绿素荧光的测量设置及其方法。Cendrero-Mateo等<sup>[57]</sup>撰写了有关近地面叶绿素荧光提取方法的介绍和评估的综述。Gu等<sup>[58]</sup>从光反应的角度介绍了叶绿素荧光及其与光合作用之间的关系。

国内许多专家学者也开展了叶绿素荧光遥感的研究，如中国科学院遥感所刘良云团队开展了碳卫星的叶绿素荧光提取和冠层荧光的提取方法的相关研究，北京师范大学刘志刚团队开展的冠层荧光研究及其自动化监测系统的开发，南京大学张用光团队开展了叶绿素荧光与GPP的相关研究等。

国内外专家的研究成果从不同的角度介绍了叶绿素荧光的产生、反演和应用。在已有的研究基础上，本报告将从近地面到全球尺度全面介绍叶绿素荧光提取方法，并总结现有的叶绿素荧光提取方法。具体而言，本报告首先介绍了近地面的叶绿素荧光测量，其次详细介绍了从卫星数据中提取叶绿素荧光的算法，最后总结了当前研究中存在的问题。

## 1 叶绿素荧光的产生及其光谱

叶绿素荧光是叶绿体受太阳光激发产生的。叶绿素是光合作用过程中必需的色素。叶绿素荧光、光耗散和光合作用是消耗叶片吸收能量的重要途径，即叶绿素荧光与光合作用有直接关系。

植被主要吸收可见光波段的能量。当植被吸收红光时，叶绿素分子被激发到第一个单线态；当植被吸收蓝光时，叶绿素分子被激发到第二个单线态（图1）。叶绿素分子处于不稳定状态，需要释放能

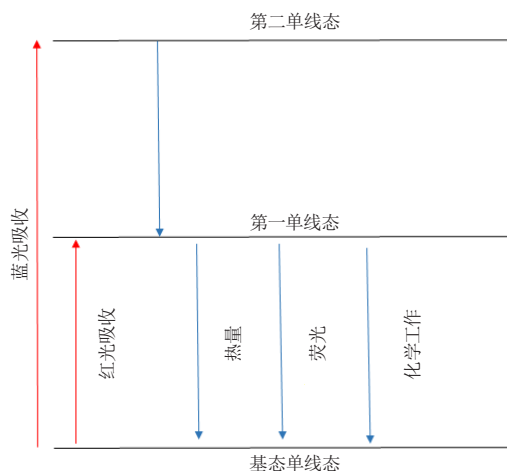


图1 叶绿素荧光的产生

Fig. 1 Production of chlorophyll fluorescence

量以返回稳定状态。散热是能耗的关键方式，当叶绿素分子处于第一单重态时，除了散热之外，光合作用和叶绿素荧光是耗散能量的重要方法。从第一个单峰态到基态单峰态，叶绿素分子通过发出较长波长的叶绿素荧光以消耗能量<sup>[59]</sup>。

叶绿素荧光光谱范围为640~850 nm，并有2个峰（690 nm和740 nm）。通过将植被反射光谱（表观反射率）与由FluorMOD<sup>[60]</sup>模拟的经过荧光过滤的植被反射光谱（实际反射率）进行比较，可以在690 nm和740 nm处发现2个凸峰（图2）。

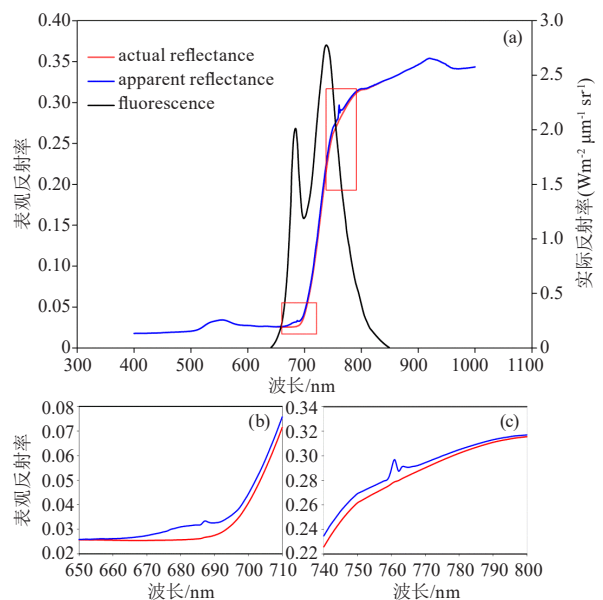


图2 模拟的叶绿素荧光波谱（来自FluorMOD模型）

Fig. 2 Simulated chlorophyll fluorescence spectrum (from Fluormod model)

## 2 近地面的叶绿素荧光提取方法介绍

### 2.1 主动叶绿素荧光探测

主动叶绿素荧光探测方法利用叶绿素荧光动力学来测量相关参数，包括调制方法（脉冲调制叶绿素荧光计<sup>[25-30]</sup>）和非调制方法（非调制荧光计<sup>[31-32]</sup>）。调制和非调制叶绿素荧光计是根据Kautsky效应设计的<sup>[53, 61-63]</sup>。

调制荧光计使用调制测量光，可以在任何阶段使用。当来自调制荧光计的测量光具有与荧光相同的频率时，可以记录不同生理状态（包括强光）下的荧光值，因此可在野外试验中使用调制荧光计。Schreiber<sup>[64]</sup>设计和制造了世界上第一台脉冲调制荧光计（PAM），通过PAM测得的叶绿素荧光诱导动力学参数可以反映植被的变化，通常用于检测植被的生理状态<sup>[25-26, 28-30, 54, 65]</sup>。此外，叶绿素荧光参数通常与其他相关的植被生理参数（气孔导度，叶水势等）结合起

来，以分析植被胁迫<sup>[66-67]</sup>。

非调制荧光计利用快速数据采集系统来记录Kaunsty效应或快速叶绿素荧光诱导<sup>[61]</sup>，例如Pochet植物效率分析仪（PEA），手持式PEA和多功能PEA。

可以使用2种不同的测量方法来获得叶绿素荧光动力学参数。非调制荧光计结构简单，易于操作，在整个测量过程中使用连续光。相比之下，调制荧光计具有调制光源，可在每种生理状态下获得叶绿素荧光测量值。实际上，调制荧光计通常用于检测植被压力<sup>[66, 68]</sup>。

## 2.2 被动荧光测量

被动叶绿素荧光测量使用夫琅禾费暗线或氧气吸收带中的叶绿素荧光填充来提取荧光信息。在冠层尺度提取的SIF并未考虑表面植被和传感器之间的大气影响，提取算法只需要2个通道的太阳辐照度和地表辐亮度2个参数。根据已有文献，近地面的被动叶绿素荧光的提取方法<sup>[69-70]</sup>分为基于反射率的方法<sup>[28, 71-74]</sup>和基于辐亮度的方法。基于辐亮度的方法包括夫琅禾费暗线深度法（FLD）<sup>[24, 75]</sup>和一系列在FLD方法上改进的方法<sup>[76-81]</sup>，以及波谱拟合方法（SFM）<sup>[69]</sup>。基于反射率的方法主要使用650~800 nm范围内的多个光谱通道建立指数，以定性反应荧光信息。基于夫琅禾费暗线填充原理的基于辐亮度的荧光提取方法获得的荧光值具有物理意义，而基于反射率的提取方法只能得到荧光的相对值，没有物理意义。

FLEX的任务是准确重建整个荧光光谱。在波谱拟合方法的基础上，目前已有几种全光谱光谱拟合方法，可从冠层测量数据重建叶绿素荧光光谱，例如荧光光谱拟合方法（FSR）<sup>[82]</sup>，全光谱光谱拟合方法（F-SFM）<sup>[83]</sup>，波谱拟合方法（SpecFit）<sup>[84]</sup>和改进版荧光光谱拟合方法（aFSR）<sup>[85]</sup>。

### 2.2.1 FLD 方法

Plascyk<sup>[75]</sup>和Plascyk等<sup>[24]</sup>提出了FLD算法。所有的辐亮度方法均是在FLD算法的基础上发展的。FLD算法利用位于夫琅禾费暗线内部和外部的入射太阳辐照度和目标辐亮度估算荧光对夫朗合费井的填充程度（图3）。在算法中，需要知道吸收线内部（ $\lambda_{in}$ ，O<sub>2</sub>-B 687 nm和O<sub>2</sub>-A 760 nm）的入射太阳辐照度和目标辐亮度，吸收暗线附近波段（ $\lambda_{out}$ ，686 nm和758 nm）的入

射太阳辐照度和目标辐亮度：

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

$$L(\lambda_{out}) = \frac{r(\lambda_{out})E(\lambda_{out})}{\pi} + F(\lambda_{out}).$$
(1)

假设反射率 $r$ 和荧光 $F$ 不变，图3a为入射的太阳辐照度波谱；图3b为上行通量：植被目标观测到的总的辐亮度（蓝色）由荧光辐亮度（红色）和植被反射的辐亮度（绿色）组成。蓝色曲线A和B是测量参数<sup>[5]</sup>。

假设吸收暗线内波段和吸收暗线外波段足够接近，则吸收暗线内外的反射率和荧光保持不变：

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

$$F(\lambda_{in}) = \frac{E(\lambda_{out}) \cdot L(\lambda_{in}) - L(\lambda_{out}) \cdot E(\lambda_{in})}{E(\lambda_{out}) - E(\lambda_{in})}.$$
(2)

FLD算法比较简单，仅需要知道2个通道的入射太阳辐照度和目标辐亮度。实际上，尽管这2个通道足够接近，但是反射率 $r$ 和荧光 $F$ 在这两个通道上不会保持不变。FLD算法的前提条件是 $r$ 和 $F$ 在吸收暗线内外两个通道上保持不变。许多作者针对这个假设前提提出了质疑。在此基础上，发展了许多改进的算法，如3FLD、cFLD、iFLD、eFLD和SFM。

### 2.2.2 波谱拟合方法 SFM

冠层辐射度可以表示为荧光贡献（SIF）和反射率辐射度的组合<sup>[86]</sup>：

$$L(\lambda) = SIF(\lambda) + \rho(\lambda) \frac{E^g(\lambda)}{\pi},$$
(3)

在选定的感兴趣谱带中，例如氧气吸收谱带或夫琅禾费暗线，使用最小二乘拟合技术估算荧光和反射率（假设反射率和荧光是波长的函数），数学方程式表示为公式（4），变量定义见表1。

$$\min \sum (L_{\text{measure}}(\lambda) - SIF(\lambda) - \rho(\lambda) \frac{E^g(\lambda)}{\pi})^2.$$
(4)

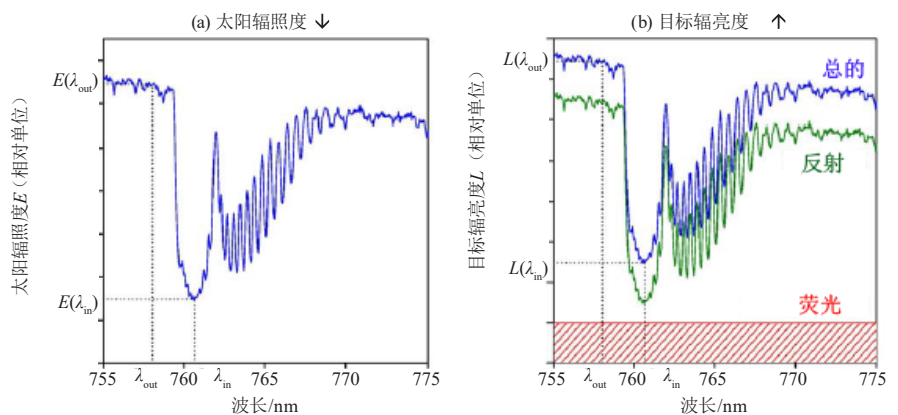


图3 FLD算法  
Fig. 3 FLD algorithm

表1 公式 1~8中的参数含义  
Table 1 The meaning of parameters in 1-8

参数	定义
$L(\lambda)$	冠层辐亮度
$L_{\text{measure}}(\lambda)$	测量的冠层辐亮度
$SIF(\lambda)$	荧光辐亮度
$\rho(\lambda)$	冠层反射率
$E^{\text{in}}(\lambda)$	入射的辐照度
$C_f$	荧光主成分分量的系数
$C_r$	反射率波谱主成分分量的系数
$\phi_f(\lambda)$	荧光的主成分分量
$\phi_r(\lambda)$	反射率波谱的主成分分量
$N_f$	荧光主成分分量的个数
$N_r$	反射率波谱主成分分量的个数
$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$	荧光和反射率表达式的系数
$SIF_{\text{FSR}}$	荧光全波段波谱
$c_1, c_2, c_3$	基础分量的系数
$v_1, v_2, v_3$	荧光全波段波谱的基础分量

与其他方法相比, SFM方法利用更多的波段和连续的波谱来提高信噪比, 并用于从FLEX的模拟数据<sup>[87]</sup>和FLEX/FLORIS的模拟数据<sup>[88]</sup>中提取叶绿素荧光。波谱拟合方法也可用于重建完整的叶绿素荧光波谱。Cogliati等<sup>[84]</sup>提出了SpecFit方法来获得完整的SIF谱, 他选择了Gaussian、Lorentzian和Voigt函数的不同组合来模拟叶绿素荧光的发射峰, 并通过使用3次样条拟合法获得叶绿素荧光波谱<sup>[88-89]</sup>。

### 2.2.3 荧光波谱重建方法 (FSR) 和改进版荧光波谱重建方法 (aFSR)

对于公式 (3), Zhao等<sup>[82]</sup>认为在吸收线处反射率和荧光可以表示为泰勒多项式:

结合公式 (3) 和 (5), 冠层辐亮度可以表示为<sup>[82]</sup>:

$$SIF(\lambda) \approx SIF(\lambda_0) + \frac{dSIF(\lambda_0)}{d\lambda} \cdot (\lambda - \lambda_0) + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2SIF(\lambda_0)}{d\lambda^2} \cdot (\lambda - \lambda_0)^2, \quad (5)$$

$$= b_0 + b_1 \cdot (\lambda - \lambda_0) + b_2 \cdot (\lambda - \lambda_0)^2$$

$$\rho(\lambda) \approx \rho(\lambda_0) + \frac{d\rho(\lambda_0)}{d\lambda} \cdot (\lambda - \lambda_0) + \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2\rho(\lambda_0)}{d\lambda^2} \cdot (\lambda - \lambda_0)^2,$$

$$= b_3 + b_4 \cdot (\lambda - \lambda_0) + b_5 \cdot (\lambda - \lambda_0)^2$$

$$L(\lambda) = (\lambda - \lambda_0)^2 \cdot \frac{E_g(\lambda)}{\pi} \cdot b_5 + (\lambda - \lambda_0) \cdot \frac{E_g(\lambda)}{\pi} \cdot b_4 + \frac{E_g(\lambda)}{\pi} \cdot b_3 + (\lambda - \lambda_0)^2 \cdot b_2 + (\lambda - \lambda_0) \cdot b_1 + b_0. \quad (6)$$

公式 (6) 中有6个未知参数。第一步, 通过在5个吸收线 (H $\alpha$  656 nm, O<sub>2</sub>-B 687 nm, H<sub>2</sub>O 719 nm, O<sub>2</sub>-A 761 nm, H<sub>2</sub>O 823 nm) 处采样, 确定未知参数,

然后获得吸收线处的荧光辐射。第二步, 对SCOPE模型模拟的荧光辐亮度数据通过奇异值分解 (SVD) 生成完整的荧光波谱的主成分变量, 完整的叶绿素荧光波谱可表示为<sup>[82]</sup>:

$$SIF_{\text{FSR}} = c_1 \cdot v_1 + c_2 \cdot v_2 + c_3 \cdot v_3, \quad (7)$$

公式 (7) 有3个未知数,  $c_1$ 、 $c_2$  和  $c_3$  是基础主成分的系数, 需要通过最优化方法确定。

波谱重建方法 (FSR) 仅使用荧光波谱的5个吸收带上的信息。基于这个想法, Zhao等<sup>[85]</sup>提出了一种使用SIF频谱的全部信息的aFSR (改进版FSR) 方法, 上行的辐射度表示如下:

$$L(\lambda) = \sum_{i=1}^{N_f} c_{fi} \phi_{fi}(\lambda) + \frac{E_g(\lambda)}{\pi} \sum_{j=1}^{N_r} c_{rj} \phi_{rj}(\lambda), \quad (8)$$

公式 (8) 中的参数介绍可见表1, 通过在640~850 nm计算实测的上行辐亮度和建模的上行辐亮度的残差来确定系数, 最终获得荧光的全波谱数据。

Liu等<sup>[83]</sup>提出的F-SFM荧光提取算法与aFSR算法思想类似, 不同的是, 在F-SFM算法中, 反射率表达式用一次线性多项式, 荧光波谱的基础分量通过主成分分析获得。

### 3 星载叶绿素荧光提取算法介绍

与反射信号相比, 叶绿素荧光的信号较弱, 因此很难从卫星影像中检测出叶绿素荧光, 荧光信号约为近红外光谱区域中反射辐射的2%~5%。685 nm处的稳态荧光约为1.5~3.4 mW·m<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>·nm<sup>-1</sup>, 而740 nm处的稳态荧光约为2.4~5.4 mW·m<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>·nm<sup>-1</sup><sup>[90-96]</sup>。如何从反射信号中提取荧光信号是一个重要的问题。在过去的几年中, 已经提出了许多方法来从传感器接收的辐射中提取荧光。简而言之, 这些方法主要归为2类, 一类主要使用物理方法, 另一类利用统计方法。

基于物理模型的荧光提取算法是使用辐射传输理论在可见-近红外区域发展的。假设表面反射率和荧光都遵循朗伯定律, 并且表面均匀。在这些假设下, 可以简化辐射透射方程并将其在荧光提取窗口拟合以获得荧光辐射度<sup>[33, 36, 38, 44-45]</sup>。此外, 差分光谱吸收光谱法 (DOAS) 也可用于提取叶绿素荧光<sup>[46-48]</sup>。基于物理模型的荧光反演算法具有清晰的物理意义和简单的反演过程。不足之处是夫琅禾费暗线处大气影响对算法精度的影响需进一步研究。

统计算法使用统计方法, 例如主成分分析 (PCA)<sup>[97]</sup>或奇异值分解 (SVD)<sup>[43, 49-50]</sup>估测大气影响, 并在感兴趣的光谱区域拟合求解出荧光辐射度。这类算法主要使用中等光谱分辨率的卫星数据, 选择

氧气吸收带或Fraunhofer线作为提取窗口。宽的窗口可以提高信噪比，并降低算法对传感器噪声的敏感性。在氧气吸收带，使用统计模型估算主要的大气影响，包括大气散射和氧气吸收，通过统计模型以避免计算相关的大气参数。目前的算法中，大多数算法使用O<sub>2</sub>-A波段估计近红外荧光辐亮度<sup>[34, 37-38, 40, 51]</sup>，而部分算法使用O<sub>2</sub>-B波段估计红色荧光<sup>[98-99]</sup>。

### 3.1 星载叶绿素荧光的提取原理

光由太阳发出经过大气在地表反射后又经过大气作用入射到传感器上，整个辐射传输过程可以用图4表示。

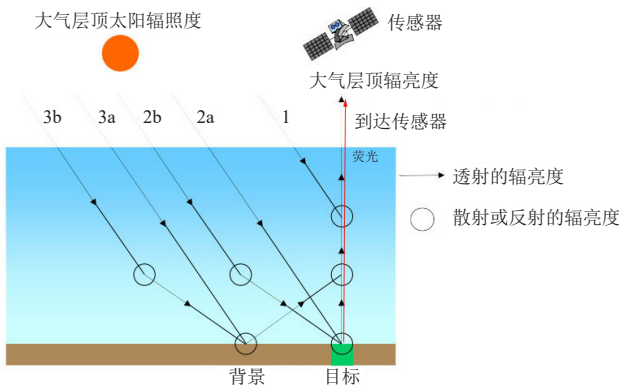


图4辐射传输过程

Fig. 4 Radiation transfer process

如图所示，传感器入射能量分为3部分：①太阳辐射能量直接由大气反射到传感器的能量，即大气程辐射；②太阳辐射能量经大气作用后照射到目标并反射回传感器的能量，其中2a代表太阳辐射直接入射到目标，2b代表太阳辐射被大气散射后入射到目标上；③太阳辐射照射经大气散射后照射到相邻地物；④目标发射的荧光经由大气到达传感器。假设地表均一，且地表反射符合兰伯特定律，则相应的数学表达式为<sup>[100]</sup>：

$$L_{\text{TOA}} = \frac{E_0 \cos \theta}{\pi} \rho_{\text{so}} + \frac{E_0 \cos \theta (\tau_{\text{ss}} + \tau_{\text{sd}}) R (\tau_{\text{do}} + \tau_{\text{oo}})}{\pi (1 - R\rho)} + \frac{SIF (\tau_{\text{do}} + \tau_{\text{oo}})}{1 - R\rho} \quad (9)$$

第一项是大气对卫星辐亮度的贡献，第二项是地表反射的辐亮度，最后一项是叶绿素荧光信号对卫星辐亮度的贡献。在公式(9)中， $\rho_{\text{so}}$ 为半球反照率， $E_0$ 指大气层顶处的太阳辐照度， $\theta$ 代表太阳高度角， $R$ 为地表反射率， $SIF$ 为冠层荧光辐亮度， $\rho$ 为从大气到地表的半球反照率。

$\tau$ 为透过率，第一个下标指入射辐亮度，第二个下标为散射辐亮度。 $\tau_{\text{ss}} + \tau_{\text{sd}}$ 为总的入射透过率（包括直射和散射部分）； $\tau_{\text{do}} + \tau_{\text{oo}}$ 为从地表到大气层顶的透过率。

$\tau_{\text{ss}}$ ：入射和散射辐亮度均为直射辐亮度。

$\tau_{\text{sd}}$ ：入射辐亮度为直射辐亮度，散射辐亮度为半球散射辐亮度。

$\tau_{\text{do}}$ ：入射辐亮度为散射天空辐亮度，散射辐亮度为直射辐亮度（在观测方向）。

$\tau_{\text{oo}}$ ：入射辐亮度为直射辐亮度，散射辐亮度为直射辐亮度（在观测方向）。

### 3.2 基于物理模型的荧光提取算法

#### 3.2.1 FLD-like 算法

FLD算法在设计时并未考虑到大气的影响，仅适用于冠层尺度的荧光提取。一些研究<sup>[100-105]</sup>把3FLD和大气参数结合起来得到了星载荧光的提取算法。在航空或航天尺度上，荧光信号作为传感器接收的地表反射能量的一个附加项。如果荧光发射和地表反射率均符合兰伯特余弦定律，则传感器接收的辐亮度（at-sensor radiance）可表示为：

$$L = L^p + \frac{E^s \cdot \rho / \pi + SIF}{1 - S \cdot \rho} \cdot \tau_{\uparrow} \quad (10)$$

$$L^p = \frac{E_0 \cos \theta}{\pi} \rho_{\text{so}}$$

$$E^s = E_0 \cos \theta \cdot \tau_{\downarrow} \cdot S$$

其中， $i$ 表示氧A吸收带内（760 nm）， $o$ 表示氧A吸收带外部（753 nm）， $L$ 表示卫星上接收到的辐亮度， $L^p$ 指路径辐射， $E^s$ 指辐照度，包括到达地表的直射和散射通量， $S$ 指地表发射率， $\rho$ 指半球反照率， $\tau_{\uparrow}$ 指上行透过率， $SIF$ 指地表的荧光辐亮度。选择氧气吸收带作为提取窗口，选择2个波段，一个位于氧气吸收带内（ $i$ ：760 nm），另一位位于氧气吸收带外（ $o$ ：753 nm），则两个波段处的辐亮度可以表示为：

$$L_i = L^p_i + \frac{E^s_i \cdot \rho_i / \pi + SIF_i}{1 - S_i \cdot \rho_i} \cdot \tau_{\uparrow_i} \quad (11)$$

$$L_o = L^p_o + \frac{E^s_o \cdot \rho_o / \pi + SIF_o}{1 - S_o \cdot \rho_o} \cdot \tau_{\uparrow_o}$$

两式联立，可得到SIF的表达式：

$$SIF_i = B \left[ \frac{X_i (E^s_o + \pi X_o S_o) - A X_o (E^s_i + \pi X_i S_i)}{B (E^s_o + \pi X_o S_o) - A (E^s_i + \pi X_i S_i)} \right] \quad (12)$$

$$X_j = \frac{L_j - L^p_j}{\tau_{\uparrow_j}}, j = i, o$$

$$\rho_i = A \cdot \rho_o$$

$$SIF_i = B \cdot SIF_o \quad (13)$$

$A$ 指O<sub>2</sub>-A吸收带内反射率  $\rho_i$ 与吸收带外反射率  $\rho_o$ 的比值，一般通过反射率波谱中氧气吸收带左右两侧的波段内插得到。 $B$ 指O<sub>2</sub>-A吸收带内外的荧光辐亮度比值，Alonso等<sup>[80]</sup>和Rascher等<sup>[105]</sup>把  $B$ 固定为0.8。

$$A = \frac{\rho_{758} \cdot \omega_1 + \rho_{771} \cdot \omega_2}{\rho_{758}}$$

$$\omega_1 = \frac{771 - 760}{771 - 758}, \quad (14)$$

$$\omega_2 = \frac{760 - 758}{771 - 758}$$

在这类方法中，在O<sub>2</sub>-A吸收带附近的荧光和反射率变化均被假设为线性变化，并没有考虑在荧光和反射率波谱的形状变化。此类方法在使用时，一般和MODTRAN结合，利用MODTRAN计算出所需要的大气参数，把大气参数代入此方法中求解荧光辐亮度。此类方法计算的荧光具有明确的物理意义，荧光单位与辐亮度单位相同，但是由于必须要输入大气参数，而大气参数通常是较难得到的，MODTRAN模拟的大气参数跟实际的大气状况还是有一定误差，因此得到的荧光辐亮度有一定的误差，而且误差的来源较难分析。

### 3.2.2 差分吸收波谱方法 DOAS

差分光学吸收光谱技术 (Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS) 常用于提取大气中的痕量气体，主要应用于紫外、可见光和近红外波段。DOAS的理论基础是Lambert-Beer定律，以大气中的痕量气体对紫外和可见光波段的特征吸收为基础，通过对特征波段的识别，达到鉴定痕量气体的浓度和类型的目的。除了痕量气体的吸收作用外，大气中的粒子的散射作用也有一定的影响。其中，痕量气体随波段变化的吸收速率不一致，随波长变化快的部分称为快变部分 $\sigma'(\lambda)$ ，随波长慢变化的部分称为慢变部分 $\sigma''(\lambda)$ 。慢变部分主要是痕量气体吸收截面、散射等消光过程引起，常归于散射项。把叶绿素荧光当做一种痕量气体，引入差分概念，整理得到：

$$-\ln \frac{L(\lambda, \theta)}{E_g(\lambda, \theta)} = \sum_{n=1}^N \sigma'_n(\lambda) S_n + \sigma_{\text{Ray}}(\lambda) S_{\text{Ray}} + \sigma_{\text{Mic}}(\lambda) S_{\text{Mic}} + \sigma_f(\lambda) S_f + \sum_{m=1}^M a_m \lambda_m, \quad (15)$$

荧光参考波谱 $\sigma_f(\lambda)$ 表示DOAS算法中的气体横截面积，荧光项的拟合系数 $S_f$ 表示气体的柱密度，通过在一定的波谱窗口中拟合求解荧光项系数，达到求解星载荧光辐亮度的目的。在公式(15)中存在多个未知项，选择合适的波谱窗口可以减少要考虑的吸收气体数量。在荧光波谱范围内，主要要考虑的气体吸收是氧气O<sub>2</sub>-A和水汽，Khosravi<sup>[47]</sup>在其论文中选择了660~683 nm和745~758 nm两个窗口，这两个窗口离氧气吸收带较近，且无明显氧气和水汽吸收作用，仅受夫琅禾费暗线影响，简化了DOAS算法，此时，

DOAS算法表示为：

$$-\ln \frac{L(\lambda, \theta)}{E_g(\lambda, \theta)} = \sigma_f(\lambda) S_f + \sum_{m=1}^M a_m \lambda_m, \quad (16)$$

在公式(16)中， $L(\lambda, \theta)$ 和 $E_g(\lambda, \theta)$ 已知， $\sigma_f(\lambda)$ 可以用冠层荧光波谱表示， $m$ 一般取值为3，在所选择波谱窗口中使用最小二乘法拟合，得到 $S_f$ 和 $a_m$ ，最终的星载荧光辐亮度为 $\sigma_f(\lambda) S_f$ 。

### 3.2.3 夫琅禾费暗线深度法

夫琅禾费暗线仅受到荧光的影响，因此在夫琅禾费暗线处可以无偏差计算荧光。Frankenberg等<sup>[36]</sup>在氧气吸收带附近的夫琅禾费暗线处把夫琅禾费暗线的深度简单的表示为：

$$\bar{f}(F_s^{\text{rel}}, \alpha) = \log \left( \bar{I}_0 + F_s^{\text{rel}} \right) + \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot \lambda^i, \quad (17)$$

其中， $\bar{I}_0$ 为高分辨率的太阳辐射波谱， $F_s^{\text{rel}}$ 为相对的荧光信号，公式右面第二项为辐亮度波谱的连续统。 $\langle \rangle$ 表示与传感器响应函数做卷积。大气散射和地表反照率仅影响氧气吸收带处的反射率波谱的高频部分，可以表示为波长的线性组合，以避免复杂的多散射辐射传输计算。假设在一个很小的提取范围， $F_s^{\text{rel}}$ 可认为是标量，不随波长变化而变化。在此式中未知数为 $F_s^{\text{rel}}$ 和 $\alpha$ ，通过对欧几里德范数差进行非线性最小二乘算法求解。

$$\text{argmin} \left\| S_{\epsilon}^{-1/2} (\bar{y} - \bar{f}(F_s^{\text{rel}}, \alpha)) \right\|_2, \quad (18)$$

公式(18)中， $\bar{y}$ 为测量的变量，表示为 $\log(R(\bar{\lambda}))$ ， $R$ 为辐亮度波谱， $S_{\epsilon}$ 为协方差矩阵的对角测量误差。在此方法中， $\bar{I}_0$ 若被定义为太阳辐射波谱，结果得到的 $F_s^{\text{rel}}$ 是无单位的，则可以通过计算近似得到荧光辐亮度：

$$F_s = F_s^{\text{rel}} / (1 + F_s^{\text{rel}}) \cdot R_{\text{cont}}, \quad (19)$$

### 3.2.4 简化的辐射传输方法

公式(9)给出了星上辐亮度的表达式。在某些特殊的窗口，如KI吸收线何866 nm CaII的吸收暗线，以及一些非常窄的波段，如太阳夫朗合费暗线，大气散射和吸收可以忽略 ( $\rho_{\text{so}}=0, \rho=0, \tau_{\text{ss}}+\tau_{\text{sd}}=1, \tau_{\text{do}}+\tau_{\text{oo}}=1$ )，则星上的辐亮度可以表示为<sup>[33]</sup>：

$$(L_{\text{TOA}})^* = \left( \frac{R \cdot E_0 \cdot \cos \theta}{\pi} + SIF \right)^* = K \cdot E^* + F, \quad (20)$$

这里\*表示与卫星的传感器相应函数做卷积。

假设在感兴趣波段范围内的大气吸收和散射为常数，则上式可表达为：

$$(L_{\text{TOA}})^* = K' \cdot E^* + \epsilon F, \quad (21)$$

在公式(20)与(21)中，可以注意到 $K$ 或者 $K'$ 对 $SIF$ 没有什么决定意义。忽略大气散射和吸收会对

SIF造成一个小的比例因子 $\epsilon$  (当 $R=0.3$ 时, 误差接近于0.6%<sup>[33]</sup>), 因此假设 $\epsilon \approx 1$ , 在公式(20)与(21)中, 只有 $K$ 或者 $K'$ 和 $F$ 为未知数,  $(L_{\text{TOA}})^*$ 指传感器接收到的辐亮度,  $E^*$ 为太阳辐照度, 在感兴趣区域使用最小二乘法拟合求解 $F$ 荧光辐亮度。

在当前的文献中, GOSAT数据的K I吸收线, 具有超精细的波普分辨率, 常被用做荧光的反演窗口。为了提高信噪比, 选择的反演窗口需要扩大, 如包括K I吸收线的769.9~770.25 nm 和758.45~758.85 nm窗口, 包括CaII吸收线的863.5~868.8 nm窗口<sup>[44]</sup>。Köhler等<sup>[38]</sup>对于GOSAT 数据发展了辐射传输反演的荧光提取算法GARLiC, 反演窗口为769.9~770.25 nm, 在此窗口, 晴朗天空的上行透过率可认为是1, 则, 公式(9)可简化为:

$$L_{\text{TOA}} = \frac{E_0 \cdot \cos \theta}{\pi} \cdot (\rho_{\text{so}} + \rho \cdot \tau_{\downarrow}), \quad (22)$$

+ SIF

在公式(22)中, 太阳辐照度波谱可以使用卫星的测量值或者是Chance和Kurucz (2010) 的标准模拟波谱, 地表反射率 $R$ 被表示为波长的三次多项式, 透过率则使用几个主成分表示。最终公式(22)可以表示为:

$$T_{\text{TOA}} = E^* \cdot (\alpha_0 + \alpha_1 \cdot \lambda) + SIF, \quad (23)$$

在公式(23)中, 未知数有3个, 分别为 $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$ 和 $F_s$ ,  $\alpha_0$ 和 $\alpha_1$ 是描述大气散射和反射率的参数, 最终需要使用最小二乘法拟合得到 $SIF$ 。

基于物理模型的荧光提取算法比较常用于荧光提取。这类算法具有清晰的物理意义, 且是基于不同的反演思路发展的。在这类算法中, 一般选择受大气影响很小的波段作为反演窗口, 大气的影晌通常被简化处理, 在今后的研究中, 还需要更多关注这类算法中对大气影晌的处理。

### 3.3 基于统计模型的荧光提取算法

#### 3.3.1 奇异向量分解法

Guanter等<sup>[34]</sup>利用奇异向量的概念, 把卫星观测辐亮度表示为无荧光的非植被辐亮度与荧光贡献之和, 且把此方法应用于GOSAT FTS数据, 分别在以750 nm和770 nm为中心的2个小拟合窗口进行非线性拟合得到荧光辐亮度。其中, 无荧光的非植被辐亮度由几个奇异向量线性组合。

利用奇异值分解的方法, 包含荧光的辐射传输方程可以表示为:

$$F(\omega, F_s) = \sum_{i=1}^{n_v} \omega_i v_i + F_s^{\text{TOA}} \mathbf{I}, \quad (24)$$

其中,  $\omega_i$ 指每个奇异向量 $v_i$ 的比重,  $F_s^{\text{TOA}}$ 指大气层顶的荧光辐亮度,  $\mathbf{I}$ 是 $n$ 维恒向量,  $n_v$ 是奇异向量的个数。需要拟合的系数是 $n_v$ ,  $\omega_i$ 和 $F_s^{\text{TOA}}$ 。 $n_v$ 一般为4或者5, 选择755 nm拟合窗口时, 奇异向量个数为4, 选择770 nm拟合窗口时, 奇异向量为5。奇异向量个数的选择具有一定的经验性, 一般以每个奇异向量能够解释整体的0.05%作为经验阈值。注意, 在770 nm拟合窗口中的强大气吸收带需要剔除。最终通过最小二乘法在拟合窗口拟合得到 $F_s^{\text{TOA}}$ 。

Guanter等<sup>[51]</sup>改进Guanter等<sup>[34]</sup>的方法, 扩展了方法的应用范围, 使其覆盖717~780 nm范围。在717~780 nm范围内, 由于受叶面积指数和叶绿素吸收的影响, 植被光谱的结构会发生较大变化。因此在此方法中, 前2个主成分为低频信息, 构成了无荧光参考体的主要信息, 第3项为高频信息, 把光谱结构变化信息考虑进去, 最终前向模型可以表示为:

$$F(\alpha, b, c, F_s^{760}) = \nu_1 \sum_{i=1}^{n_p} \alpha_i \lambda^i + \nu_2 \sum_{i=1}^{n_p} b_i \lambda^i + \sum_{i=1}^{n_v} c_i \nu_i + F_s^{\text{TOA}} h_f, \quad (25)$$

其中,  $n_v$ 为代表高频信息的奇异向量个数,  $n_p$ 为代表低频信息的奇异向量个数,  $a$ 、 $b$ 和 $c$ 分别为 $n_p$ 、 $n_p$ 和 $n_v$ 维中的系数,  $\lambda$ 为输入的波谱范围 ( $n_\lambda$ ),  $\nu$ 为 $n_\lambda \times n_v$ 维的奇异向量。此外, 刘良云等成功使用SVD方法从TanSat卫星数据中提取叶绿素荧光<sup>[43]</sup>。

#### 3.3.2 主成分分析法

Joiner等<sup>[44]</sup>把波谱特征分为3个成分: 大气吸收 ( $T_{\uparrow}$ 和 $T_{\downarrow}$ )、地表反射率 ( $R$ ) 和荧光辐亮度 ( $SIF$ ) 影响, 通过解算大气影响提取荧光。假设地表反射率和荧光符合兰伯特定律, 假设大气的散射影晌比较小, 则 $\rho_{\text{so}} \approx 0$ ,  $R \cdot \rho_{\text{ad}} \ll 1$ , 则反射率可表示为:

$$\rho_{\text{tot}} = T_{\uparrow} \cdot R \cdot T + \frac{\pi \cdot SIF \cdot T_{\uparrow}}{E_0 \cdot \cos \theta}, \quad (26)$$

此时,  $T_{\uparrow}$ 和 $T_{\downarrow}$ 和 $SIF$ 为未知参数, 目标参数为 $SIF$ 。为了消除未知参数, 引入了 $T(\lambda)$ , 表示太阳与传感器间双向 (太阳—地表—传感器) 大气透过率, 定义为 $T(\lambda) = T_{\uparrow} T_{\downarrow}$ ,  $T$ 代表太阳与传感器间双向 (太阳—地表—传感器) 大气透过率, 根据它们之间的数学关系, 可得到上行透过率的表达式, 其中太阳高度角为 $\theta$ , 同时观测天顶角为 $\theta_0$ :

$$T_{\uparrow}(\lambda) = \exp[-\bar{A}(\lambda)] = \exp\left[-A_2(\lambda) \frac{\sec \theta_0}{\sec \theta + \sec \theta_0}\right], \quad (27)$$

$$= \exp\left[\ln T(\lambda) \frac{\sec \theta_0}{\sec \theta + \sec \theta_0}\right]$$

经过以上几步的简化,则地表反射率可表示为<sup>[37]</sup>:

$$\rho_{\text{tot}} = R \cdot T + \frac{\pi \cdot \text{SIF}}{E_0 \cos \theta} \cdot \exp \left[ \ln T(\lambda) \frac{\sec \theta_0}{\sec \theta + \sec \theta_0} \right], \quad (28)$$

此方法只对单频辐射有效,且在算法中 $\rho_{\text{SO}}$ 、 $\rho_{\text{PDD}}$ 、 $T_{\uparrow}$ 和 $T_{\downarrow}$ 仅考虑大气的散射,忽略大气分子吸收。在此方程中,仅有 $R$ 、 $T$ 和 $\text{SIF}$ 3个未知数,假设他们在研究的波谱范围内均有相应的波谱函数, $\text{SIF}$ 是波长的高斯函数(波谱中心位于736.8 nm,方差为21.2 nm)。在我们的研究范围,反射率 $R$ 被假定为波长的线性函数。从已有的研究结果中可知,描述荧光波形的函数的误差对荧光峰值的估测影响较小<sup>[51,100]</sup>。透过率 $T(\lambda)$ 则用几个主成分的线性关系来表示。把未知参数表示为波长的函数后,在所选择的波谱窗口内,使用最小二乘法拟合得到所要求的 $\text{SIF}$ 。需要注意所选择的拟合窗口尽量在一个较小的波谱范围内。

主成分分析的提取算法中考虑到了大气的影响,且从GOME-1和SCIAMACHY卫星数据中成功提取了荧光辐亮度<sup>[37,39]</sup>。

## 4 当前的问题和讨论

叶绿素荧光遥感从叶片尺度到卫星尺度上取得了较大的进展,已广泛用于与植被生理状态的相关性研究。叶绿素荧光探测在叶尺度和冠层尺度上都取得了良好的结果,还被有效地用于监测植物的水分胁迫<sup>[29,30,42,73-74,95,107-113]</sup>,臭氧胁迫<sup>[66,114-115]</sup>,氮胁迫<sup>[3-4,54,106,116-120]</sup>,害虫胁迫<sup>[121-122]</sup>,GPP<sup>[14-23,123-126]</sup>,热胁迫<sup>[127]</sup>和农作物生产力<sup>[128]</sup>。尽管研究人员设计了许多实验来阐明叶绿素荧光与植被胁迫之间的关系,但这种关系的内在机制尚待探索。对于从卫星数据反演叶绿素荧光,大气影响不可忽略,并使反演变得更加复杂。总结其中存在的问题,主要分为以下几点:

### 4.1 大气影响的处理

传感器接收的辐射受大气条件,太阳/传感器的方位角信息等影响。在我们感兴趣的波段(600~800 nm)中,主要吸收是氧气(O<sub>2</sub>)和水蒸气(H<sub>2</sub>O)<sup>[47,129]</sup>。关于大气影响,散射是荧光反演方法中应考虑的主要因素。在夫琅禾费暗线中,荧光能够填充夫琅禾费暗线,散射也会对夫琅禾费暗线有填充作用。目前已经许多关于散射对荧光提取影响的研究<sup>[61,130-134]</sup>,并且认为星载荧光提取时应考虑拉曼散射的影响<sup>[47]</sup>。

在荧光提取方法中,主要是使用2个反演窗口,分别是氧气吸收带和Fraunhofer线。在氧气吸收带中,拉曼散射、地表压强和反照率等可能会在算法中

产生误差<sup>[37]</sup>。 $\text{SIF}$ 反演方法通常利用统计技术来计算 $\text{SIF}$ 反演过程中的大气影响,例如PCA<sup>[37]</sup>和SVD<sup>[34]</sup>。选择一些无植被的区域,如沙漠、格陵兰和南极洲等无荧光区域用于训练数据,以估计大气效应的影响。训练数据的类型和数量必须尽可能具有代表性,通过训练得到许多无荧光数据集,使估算出的大气条件更加可靠。正确选择无荧光区域至关重要<sup>[34]</sup>。

在Fraunhofer线中,假定大气影响很小,可以忽略不计<sup>[33]</sup>。基于此假设,开发了一系列基于Fraunhofer暗线中的荧光反演方法。但是直到现在,尚不清楚Fraunhofer暗线中大气效应的忽略如何对 $\text{SIF}$ 产生影响。与接收到的辐射相反,荧光辐射相对较弱(强度大约为1%~3%)。大气效应处理不当会影响荧光的反演结果。

### 4.2 零值偏移校正

非植被区域的荧光为零。实际上,由于旋转拉曼散射和各种反演方法的缺点,非植被区域(例如撒哈拉沙漠)的荧光值并非为零<sup>[33]</sup>。这些荧光值被认为是荧光偏差。所有反演方法都应消除荧光偏差以获得可靠的值。Frankenberg等<sup>[36]</sup>发现在TANSO-FTS波段1中存在非线性问题,并提出了一种经验方法,通过将荧光偏移表示为南极洲区域平均辐射的函数来校正所产生的荧光。基于这个思路<sup>[36]</sup>,Guanter等<sup>[34]</sup>,Joiner等<sup>[44]</sup>和Köhler等<sup>[38-39]</sup>增加了无植被地物作为参考光谱,并采用了严格的标准来选择参考光谱,例如荧光值范围、平均辐射度和太阳天顶辐射度。这些参数的阈值没有通用标准,由研究人员根据传感器的特征确定。这些荧光偏移校正方法选择无植被区域作为目标,并建立荧光偏移与平均辐射度之间的关系,并且认为平均辐射度与无植被区域相同的植被区域具有相同的荧光偏移。Joiner等<sup>[99]</sup>认为以前的荧光偏移校正方法没有考虑暗电流、杂散光和非线性响应的影响,在此基础上开发了一种经验校正方案来减小零值偏移。形成零值偏移的原因很复杂并有待将来研究,且尚未开发出新的零级偏移校正方法。

### 4.3 缺乏地表数据来验证星载叶绿素荧光产品

星载叶绿素荧光产品的验证是当前研究中的一个问题。最常用的方法是通过其他荧光产品进行交叉验证的,例如OCO-2 SIF, GOSAT SIF, GOME-2 SIF和SCIAMACHY SIF或NDVI数据<sup>[9,13,33-35,37-38,40,42,99,104,126,135]</sup>。地表测量数据的缺乏会影响到荧光产品精度的提高,这可能会限制其未来的应用。叶绿素荧光被认为是检测植被状况的有效探针,与光合作用密切相关,因此可用于推导GPP。太

阳卫星观测几何的变化影响荧光观测的不确定性，将会影响GPP估算<sup>[136, 137]</sup>。在地面附近进行的荧光测量数量很少，并且测量范围有限。因此，难以使用地面数据来验证SIF卫星数据。为了验证SIF卫星数据，必须扩展地表叶绿素荧光观测网络。

## 5 气象卫星在叶绿素荧光遥感中的潜在优势

极轨气象卫星FY-3D上搭载的高光谱温室气体监测仪（Greenhouse gases Absorption Spectrometer, GAS）探测目标是测量全球大气温室气体（CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO等）的浓度在三维空间的分布，其可见光通道范围为0.75~0.77 μm，光谱分辨率为0.6 cm<sup>-1</sup>，信噪比>300。可见光通道覆盖叶绿素荧光的一个峰

值。Zhang等<sup>[89]</sup>总结了具有SIF探测能力的星载传感器的主要指标（表2），均覆盖了叶绿素荧光波谱的氧气吸收带特征，具有较高的光谱分辨率和较高的信噪比，主要分为以GOAST、OCO-2和TANSAT为代表的超精细光谱分辨率传感器和以GOME-2、SCIAMACHY和TROPOMI为代表的高光谱分辨率传感器。GAS传感器的高光谱分辨率和高信噪比为叶绿素荧光的提取提供了可能。FY-3 03批仍将搭载GAS传感器，利用GAS可见光波段数据反演叶绿素荧光，为植被生态遥感的监测提供一种新的数据源，同时扩展了气象卫星在生态遥感中的应用。纵观可用于荧光反演的在轨和即将发射的卫星，高光谱分辨率和高空间分辨率将是星载传感器反演叶绿素荧光的必要性能指标。

表2 具有SIF探测能力的星载传感器的主要性能指标，包括已经在轨运行的和已列入发射日程的卫星<sup>[89]</sup>  
Table 1 The main performance indicators of satellite-borne sensors with SIF detection capability, including satellites already in orbit and those scheduled for launch<sup>[89]</sup>

传感器指标	GOSAT-FTS	OCO-2	MetOp-A GOME-2	ENVISAT-SCIAMACHY	Tan-Sat	Sentinel-5-TROPOMI	FLEX-FLORIS
发射时间	2009	2014	2006	2002	2016-12	2017-07	2022
过境时间	13: 00	13: 30	9: 30	10: 00	13: 30	13: 30	~10: 00
重访周期/d	3	16	1.5	6	16	1	27（赤道）
光谱范围/nm	757~775		650~790		758~778	675~775	670~780
光谱分辨率/nm	0.025	0.042	0.5		0.044	0.5	~0.3
星下点	10.5 km	1.3 km×2.25 km	40 km×80 km	30 km×40 km	1 km×2 km	7 km×7 km	300 m
分辨率	—	—	—	—	2 km×2 km	—	—
幅宽/km	750	10.3	1920	960	20	2600	150
空间采样方式	离散	离散	连续	连续	离散	连续	连续
信噪比SNR	>300	>360	>1000	3000	>360	500	>240

## 6 结论与建议

基于目前提出的荧光反演方法和当前存在的问题，下面对叶绿素荧光的反演提供部分建议。

### 6.1 研究大气对荧光提取的影响

近地面不用考虑大气的影 响，机载/星载数据的SIF反演仍然面临挑战。因此，在这些情况下提取SIF需要校正大气影响<sup>[35, 87]</sup>。近年来，研究人员已经成功地从卫星数据（如SCIAMACHY、GOSAT、GOME-2、OCO-2、TROPOMI和TanSat）中反演了SIF，利用反演窗口的特征，可以忽略大气影响或通过统计方法计算大气影响。尽管在荧光反演方法中经常考虑大气效应，例如气溶胶散射和地表压强等，但其他因素仍需要进一步分析<sup>[87]</sup>，包括旋转拉曼散射（RRS）和杂散光。这些大气效应导致的填充效果不如氧气吸收带或Fraunhofer谱线中的荧光填充明显，但它们仍会引起荧光反演误差。

考虑到微弱的荧光信号，应充分深入地研究大气影响。近年来，越来越多的人开始关注大气对SIF估测的影响。Daumard等<sup>[138]</sup>认为，空气柱的透射率、路

径辐射和邻近效应是影响氧气吸收带深度的3个主要因素，并使用MODTRAN 4来计算大气和环境参数，然后校正测得的地表辐射度以获得与地表SIF有关的氧气吸收谱段信息。Sabater等<sup>[139]</sup>通过使用MODTRAN的模拟数据分析了大气影响如何影响近距离（塔吊）反演的荧光，并通过将透过率函数引入FLD或SFM中来提供一种严格校正方法，以改善SIF反演精度。Liu等<sup>[140]</sup>还使用MODTRAN估算了向上和向下的大气透射率，以获得冠层的下层辐照度和上层辐照度，然后通过3FLD方法估测SIF。Celesti等<sup>[90]</sup>和Verhoef等<sup>[92]</sup>使用辐射传输模型反演方法来估计SIF。此外，FLEX报告中指出，必须进行大气校正以减弱SIF反演中的误差传播<sup>[141, 142]</sup>。在未来的研究中，荧光反演算法将在严格的大气校正基础上发展。

### 6.2 建立叶绿素荧光验证网络

近地面的荧光反演方法已成功应用于众多研究中。没有大气的影响，近地面反演的荧光值可以认为是“真”值，用于叶绿素荧光的验证。因此，使用标准光谱测量和荧光检索技术，构建了地面荧光测量网

络, 获得“真实”荧光值。随着更多的荧光卫星数据和产品的出现, 迫切需要验证荧光卫星数据, 以提高荧光卫星的检索方法和准确性。

叶绿素荧光随植被生化参数和冠层结构的变化而变化。因此, 在不同的环境条件下, 它对植被的反应也不同。覆盖大量被测样品的荧光验证网络将确保SIF数据的整体有效性。在FLEX荧光项目中, 提出了“自下而上”的验证方案来验证FLEX荧光产品, 该产品从基于塔吊的冠层荧光测量开始到景观水平, 包括不同的植被类型和非植被表面, 且考虑几个主要因素, 例如测量的地点, 植被类型、结构、物候和光合有效辐射 (PAR) 的范围等。此外, 基于现有的数据站点, 例如FLUXNET, 可以进行荧光测量的部署<sup>[141-142]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] Bolhar-Nordenkampf H R, Long S P, Baker N R, et al. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation. *Functional Ecology*, 1989, 3: 497-514.
- [2] Köhler P, Guanter L, Kobayashi H, et al. Assessing the potential of sun-induced fluorescence and the canopy scattering coefficient to track large-scale vegetation dynamics in Amazon forests. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 769-785.
- [3] Corp L A, McMurtry J E, Middleton E M, et al. Fluorescence sensing systems: in vivo detection of biophysical variations in field corn due to nitrogen supply. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86, 470-479.
- [4] Corp L, Middleton E, Daughtry C, et al. Solar induced fluorescence and reflectance sensing techniques for monitoring nitrogen utilization in corn. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2006: 2267-2270.
- [5] Meroni M, Rossini M, Guanter L, et al. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: review of methods and applications. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113, 2037-2051.
- [6] van der Tol C, Verhoef W, Rosema A. A model for chlorophyll fluorescence and photosynthesis at leaf scale. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149, 96-105.
- [7] Frankenberg C, Berry J, Guanter L, et al. Remote sensing of terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *SPIE Newsroom*, 2013. <https://spie.org/news/4725-remote-sensing-of-terrestrial-chlorophyll-fluorescence-from-space?SSO=1>.
- [8] Porcar-Castell A, Tyystjärvi E, Atherton J, et al. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges. *Journal of Experimental Botany*, 2014, eru191, doi: 10.1093/jxb/erv412.
- [9] Yang X, Tang J, Mustard J F, et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 2977-2987.
- [10] Sun Y, Frankenberg C, Wood J D, et al. OCO-2 advances photosynthesis observation from space via solar-induced chlorophyll fluorescence. *Science*, 2017, 358(6360): eam5747.
- [11] Thum T, Zaehle S, Köhler P, et al. Modelling sun-induced fluorescence and photosynthesis with a land surface model at local and regional scales in northern Europe. *Biogeosciences* 2017, 14: 1969-1987.
- [12] Cheng Y B, Middleton E M, Zhang Q, et al. Integrating solar induced fluorescence and the photochemical reflectance index for estimating gross primary production in a cornfield. *Remote Sensing*, 2013, 5: 6857-6879.
- [13] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, et al. The seasonal cycle of satellite chlorophyll fluorescence observations and its relationship to vegetation phenology and ecosystem atmosphere carbon exchange. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 375-391.
- [14] Guanter L, Zhang Y, Jung M, et al. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111: E1327-E1333, doi:10.1073/pnas.1320008111.
- [15] Parazoo N C, Bowman K, Fisher J B, et al. Terrestrial gross primary production inferred from satellite fluorescence and vegetation models. *Global Change Biology*, 2014, 20: 3103-3121.
- [16] Zhang Y, Guanter L, Berry J A, et al. Estimation of vegetation photosynthetic capacity from space-based measurements of chlorophyll fluorescence for terrestrial biosphere models. *Global Change Biology*, 2014, 20: 3727-3742.
- [17] Zhang Y, Guanter L, Berry J A, et al. Model-based analysis of the relationship between sun-induced chlorophyll fluorescence and gross primary production for remote sensing applications. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187: 145-155.
- [18] Damm A, Guanter L, Paul-Limoges E, et al. 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*, 2015, 166: 91-105.
- [19] Perez-Priego O, Guan J, Rossini M, et al. Sun-induced Chlorophyll fluorescence and PRI improve remote sensing GPP estimates under varying nutrient availability in a typical Mediterranean Savanna Ecosystem. *Biogeosciences Discussions*, 2015, doi:10.5194/bgd-12-11891-2015 .
- [20] Duveiller G, Cescatti A. Spatially downscaling sun-induced chlorophyll fluorescence leads to an improved temporal correlation with gross primary productivity. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 182: 72-89.
- [21] Zhang Y, Xiao X, Jin C, et al. Consistency between sun-induced chlorophyll fluorescence and gross primary production of vegetation in North America. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183: 154-169.
- [22] Cui Y, Xiao X, Zhang Y, et al. Temporal consistency between gross primary production and solar-induced chlorophyll fluorescence in the ten most populous megacity areas over years. *Scientific Reports*, 2017, 7: 14963.
- [23] Liu L, Guan L, Liu X. Directly estimating diurnal changes in GPP for C3 and C4 crops using far-red sun-induced chlorophyll fluorescence. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 1-9.
- [24] Plascyk J A, Gabriel F C. The Fraunhofer line discriminator MKII—an airborne instrument for precise and standardized ecological luminescence measurement. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, 1975, 24: 306-313.
- [25] Genty B, Briantais J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1989, 990: 87-92.
- [26] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. *Ecophysiology of Photosynthesis*, 1994: 49-70.
- [27] Walker J P. Estimating soil moisture profile dynamics from near-surface soil moisture measurements and standard meteorological data. *The University of Newcastle*, 1999.
- [28] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, et al. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: II. laboratory and airborne canopy-level measurements with hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 596-608.
- [29] Zarco-Tejada P J, González-Dugo V, Berni J A. 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*, 2012, 117: 322-337.
- [30] Zarco-Tejada P J, Catalina A, González M R, et al. Relationships between net photosynthesis and steady-state chlorophyll fluorescence retrieved from airborne hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136: 247-258.
- [31] Mathur S, Jajoo A, Mehta P, et al. Analysis of elevated temperature-induced inhibition of photosystem II using chlorophyll a fluo-

- rescence induction kinetics in wheat leaves (*Triticum aestivum*). *Plant Biology*, 2011, 13: 1-6.
- [32] Kalaji H M, Oukarroum A, Alexandrov V, et al. Identification of nutrient deficiency in maize and tomato plants by in vivo chlorophyll a fluorescence measurements. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 81: 16-25.
- [33] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A, et al. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *Biogeosciences* 2011, 8: 637-651.
- [34] Guanter L, Frankenberg C, Dudhia A, et al. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 236-251.
- [35] Frankenberg C, Fisher J B, Worden J, et al. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L17706.
- [36] Frankenberg C, Butz A, Toon G. Disentangling chlorophyll fluorescence from atmospheric scattering effects in O<sub>2</sub> A-band spectra of reflected sun-light. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L03801.
- [37] Joiner J, Guanter L, Lindstrot R, et al. Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate-spectral-resolution near-infrared satellite measurements: methodology, simulations, and application to GOME-2. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6: 2803-2823.
- [38] Köhler P, Guanter L, Frankenberg C. Simplified physically based retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from GOSAT data. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2015, 12: 1446-1450.
- [39] Köhler P, Guanter L, Joiner J. A linear method for the retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from GOME-2 and SCIAMACHY data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8: 2589-2608.
- [40] Frankenberg C, O'Dell C, Berry J, et al. Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147: 1-12.
- [41] Guanter L, Aben I, Tol P, et al. Potential of the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard the Sentinel-5 Precursor for the monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8: 1337-1352.
- [42] Lee J E, Frankenberg C, van der Tol C, et al. Forest productivity and water stress in Amazonia: observations from GOSAT chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, 280, doi:10.1098/rspb.2013.0171.
- [43] Du S, Liu L, Liu X, et al. Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from TanSat satellite. *Science Bulletin* 2018, 63, 1502-1512.
- [44] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A, et al. Filling-in of near-infrared solar lines by terrestrial fluorescence and other geophysical effects: simulations and space-based observations from SCIAMACHY and GOSAT. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5: 809-829.
- [45] Liu X, Liu L. Assessing band sensitivity to atmospheric radiation transfer for space-based retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing*, 2014, 6: 10656-10675.
- [46] Frankenberg C, Platt U, Wagner T. Iterative maximum a posteriori (IMAP)-DOAS for retrieval of strongly absorbing trace gases: Model studies for CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> retrieval from near infrared spectra of SCIAMACHY onboard ENVISAT. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2005, 5: 9-22.
- [47] Khosravi N. Terrestrial plant fluorescence as seen from satellite data. University of Bremen, 2012.
- [48] Frankenberg C. Solar induced chlorophyll fluorescence OCO-2 lite files (B700) user guide. 2015.
- [49] Rodgers C D. Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice. World Scientific, 2000, doi: 10.1142/3171.
- [50] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. Numerical recipes 3rd edition: the art of scientific computing. Cambridge University Press, 2007.
- [51] Guanter L, Rossini M, Colombo R, et al. 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*, 2013, 133: 52-61.
- [52] Rascher U, Gioli B, Miglietta F. FLEX—fluorescence explorer: a remote sensing approach to quantify spatio-temporal variations of photosynthetic efficiency from space. In: *Photosynthesis*. Energy from the Sun. Dordrecht: Springer, 2008: 1387-1390.
- [53] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence: practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51: 659-668.
- [54] Cendrero-Mateo M P, Moran M S, Papuga S A, et al. Plant chlorophyll fluorescence: active and passive measurements at canopy and leaf scales with different nitrogen treatments. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 67: 275-286.
- [55] Wang S, Zhang L, Huang C, et al. Ground-based long-term remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: Methods, challenges and opportunities. *Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2017: 3862-3865.
- [56] Frankenberg C, Berry J. Solar induced chlorophyll fluorescence: origins, relation to photosynthesis and retrieval. Elsevier, 2018.
- [57] Cendrero-Mateo M P, Wieneke S, Damm A, et al. Sun-induced chlorophyll fluorescence III: benchmarking retrieval methods and sensor characteristics for proximal sensing. *Remote Sensing*, 2019, 11: 962, doi:10.3390/rs11080962.
- [58] Gu L, Han J, Wood J D, et al. Sun-induced Chl fluorescence and its importance for biophysical modeling of photosynthesis based on light reactions. *New Phytologist*, 2019, 223: 1179-1191.
- [59] Heldt H W, Piechulla B. *Plant biochemistry*. Academic Press, 2004.
- [60] Zarco-Tejada P J, Miller J, Pedros R, et al. FluorMODgui: a graphic user interface for the spectral simulation of leaf and canopy fluorescence effects. *Computers and Geosciences*, 2004, 32: 577-591.
- [61] Kautsky H, Hirsch A. Neue versuche zur kohlenensäureassimilation. *Naturwissenschaften*, 1931, 19: 964-964.
- [62] Arndt U. The Kautsky-effect: a method for the investigation of the actions of air pollutants in chloroplasts. *Environmental Pollution*, (1970) 1974, 6: 181-194.
- [63] Stirbet A, Govindjee. On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll a fluorescence induction) and Photosystem II: Basics and applications of the OJIP fluorescence transient. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2011, 104: 236-257.
- [64] Schreiber U. Pulse-Amplitude-Modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: an overview. In Govindjee G C. *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis*, papageorgiou. Dordrecht: Springer, 2004.
- [65] White A J, Critchley C. Rapid light curves: a new fluorescence method to assess the state of the photosynthetic apparatus. *Photosynthesis Research*, 1999: 59, 63-72.
- [66] Guidi L, Nali C, Ciompi S, et al. The use of chlorophyll fluorescence and leaf gas exchange as methods for studying the different responses to ozone of two bean cultivars. *Journal of Experimental Botany*, 1997, 48: 173-179.
- [67] Flexas J, Escalona J M, Evain S, et al. Steady-state chlorophyll fluorescence (Fs) measurements as a tool to follow variations of net CO<sub>2</sub> assimilation and stomatal conductance during water-stress in C3 plants. *Physiologia Plantarum*, 2002, 114: 231-240.
- [68] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79: 213-224.
- [69] Meroni M, Colombo R. Leaf level detection of solar induced chlorophyll fluorescence by means of a subnanometer resolution spectroradiometer. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103: 438-448.
- [70] Cendrero-Mateo M P, Wieneke S, Damm A, et al. Sun-induced chlorophyll fluorescence III: benchmarking retrieval methods and sensor characteristics for proximal sensing. *Remote Sensing*, 2019, 11: 962.
- [71] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, et al. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: I. leaf-level measurements and model simulation. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 582-595.
- [72] Zarco-Tejada P J, Pushnik J, Dobrowski S, et al. Steady-state

- chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84: 283-294.
- [73] Dobrowski S, Pushnik J, Zarco-Tejada P J, et al. Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97: 403-414.
- [74] Pérez-Priego O, Zarco-Tejada P J, Miller J R, et al. Detection of water stress in orchard trees with a high-resolution spectrometer through chlorophyll fluorescence in-filling of the O/sub 2/-A band. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 2005, 43: 2860-2869.
- [75] Plascyk J A. The MK II Fraunhofer line discriminator (FLD-II) for airborne and orbital remote sensing of solar-stimulated luminescence. *Optical Engineering*, 1975, 14: 339-330.
- [76] Maier S W, Günther K P, Stellmes M. Sun-induced fluorescence: a new tool for precision farming. *Digital Imaging and Spectral Techniques: Applications to Precision Agriculture and Crop Physiology*, 2003: 209-222.
- [77] Gomez-Chova L, Alonso-Chorda L, Amoros-Lopez J, et al. Solar induced fluorescence measurements using a field spectroradiometer. in proceedings of earth observation for vegetation monitoring and water management. *AIP Conference Proceedings*, 2006: 274-281.
- [78] Moya I, Daumard F, Moise N, et al. First airborne multiwavelength passive chlorophyll fluorescence measurements over La Mancha (Spain) fields. *Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, 2006: 820-825.
- [79] Alonso L, Gómez-Chova L, Vila-Francés J, et al. Sensitivity analysis of the fraunhofer line discrimination method for the measurement of chlorophyll fluorescence using a field spectroradiometer. In *Proceedings of IGARSS*, 2007: 3756-3759, doi:10.1109/IGARSS.2007.4423660
- [80] Alonso L, Gomez-Chova L, Vila-Frances J, et al. Improved Fraunhofer line discrimination method for vegetation fluorescence quantification. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2008, 5: 620-624.
- [81] Mazzoni M, Agati G, del Bianco S, et al. High resolution measurements of solar induced chlorophyll fluorescence in the Fraunhofer Ha and in the atmospheric oxygen lines. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Remote Sensing of Vegetation Fluorescences*, Florence, Italy, 7-9 February 2007.
- [82] Zhao F, Guo Y, Verhoef W, et al. A method to reconstruct the solar-induced canopy fluorescence spectrum from hyperspectral measurements. *Remote Sensing*, 2014, 6: 10171-10192.
- [83] Liu X, Liu L, Zhang S, et al. New spectral fitting method for full-spectrum solar-induced chlorophyll fluorescence retrieval based on principal components analysis. *Remote Sensing*, 2015, 7: 10626-10645.
- [84] Cogliati S, Verhoef W, Kraft S, et al. Retrieval of sun-induced fluorescence using advanced spectral fitting methods. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 344-357.
- [85] Zhao F, Li R, Verhoef W, et al. Reconstruction of the full spectrum of solar-induced chlorophyll fluorescence: intercomparison study for a novel method. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 233-246.
- [86] Meroni M, Busetto L, Colombo R, et al. Performance of spectral fitting methods for vegetation fluorescence quantification. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 363-374.
- [87] Guanter L, Alonso L, Gómez-Chova L, et al. Developments for vegetation fluorescence retrieval from spaceborne high-resolution spectrometry in the O<sub>2</sub>-A and O<sub>2</sub>-B absorption bands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010: 115.
- [88] Cogliati S, Rossini M, Julitta T, et al. Continuous and long-term measurements of reflectance and sun-induced chlorophyll fluorescence by using novel automated field spectroscopy systems. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 164: 270-281.
- [89] Zhang L, Wang S, Huang C. Top-of-atmosphere hyperspectral remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: a review of methods. *Journal of Remote Sensing*, 22(1): 1-12.
- [90] Celesti M, van der Tol C, Cogliati S, et al. Exploring the physiological information of Sun-induced chlorophyll fluorescence through radiative transfer model inversion. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 97-108.
- [91] van der Tol C, Verhoef W, Timmermans J, et al. An integrated model of soil-canopy spectral radiance observations, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences Discussions*, 2009, 6: 6025-6075.
- [92] Verhoef W, van der Tol C, Middleton E M. 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*, 2018, 204: 942-963.
- [93] Middleton E M, McMurtrey J E, Entcheva Campbell P K, et al. Fluorescence sensing techniques for vegetation assessment. *Applied Optics*, 2006, 45: 1023-1033.
- [94] Amoros-Lopez J, Gomez-Chova L, Vila-Frances J, et al. Evaluation of remote sensing of vegetation fluorescence by the analysis of diurnal cycles. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29: 5423-5436.
- [95] Zarco-Tejada P J, Berni J A J, Suárez L, et al. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 1262-1275.
- [96] Campbell P E, Middleton E, Corp L, et al. Contribution of chlorophyll fluorescence to the apparent vegetation reflectance. *Science of the Total Environment*, 2008, 404: 433-439.
- [97] Hotelling H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 1933, 24: 417.
- [98] Rossini M, Nedbal L, Guanter L, et al. Red and far red Sun-induced chlorophyll fluorescence as a measure of plant photosynthesis. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 1632-1639.
- [99] Joiner J, Yoshida Y, Guanter L, et al. New methods for the retrieval of chlorophyll red fluorescence from hyperspectral satellite instruments: simulations and application to GOME-2 and SCIAMACHY. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9: 3939-3967.
- [100] Daumard F, Champagne S, Fournier A, et al. A field platform for continuous measurement of canopy fluorescence. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 2010, 48: 3358-3368.
- [101] Guanter L, Alonso L, Gómez-Chova L, et al. Estimation of solar induced vegetation fluorescence from space measurements. *Geophysical Research Letters*, 2007: 34.
- [102] Damm A, Schickling A, Schläpfer D, et al. Deriving sun-induced chlorophyll fluorescence from airborne based spectrometer data. In *Proceedings of ESA Hyperspectral Workshop*, March 2010, doi:10.5167/uzh-35343.
- [103] Liu X, Liu L. Improving chlorophyll fluorescence retrieval using reflectance reconstruction based on principal components analysis. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12: 1645-1649.
- [104] Rascher U, Alonso L, Burkart A, et al. Sun-induced fluorescence-new probe of photosynthesis: first maps from the imaging spectrometer HyPlant. *Global Change Biology*, 2015, 21: 4673-4684.
- [105] Rascher U, Agati G, Alonso L, et al. CEFLES2: the remote sensing component to quantify photosynthetic efficiency from the leaf to the region by measuring sun-induced fluorescence in the oxygen absorption bands. *Biogeosciences Discussions*, 2009, 6: 2217.
- [106] F Noxon J. Nitrogen dioxide in the stratosphere and troposphere measured by ground-based absorption spectroscopy. *Science*, 1975, 189: 547-549.
- [107] Schmuck G, Moya I, Pedrini A, et al. Chlorophyll fluorescence lifetime determination of waterstressed C3- and C4-plants. *Radiation and Environmental Biophysics*, 1992, 31: 141-151.
- [108] Bürling K, Cerovic Z G, Cornic G, et al. Fluorescence-based sensing of drought-induced stress in the vegetative phase of four contrasting wheat genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 89: 51-59.
- [109] Panigada C, Rossini M, Meroni M, et al. Fluorescence, PRI and canopy temperature for water stress detection in cereal crops. *International Journal of Applied Earth Observation and*