

植被日光诱导叶绿素荧光高光谱成像仪研究(特邀)

于磊^{1*}, 汪涛^{1,2}, 林静³¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;³合肥师范学院化学与制药工程学院, 安徽 合肥 230601

摘要 植被日光诱导叶绿素荧光是一种可以表征植被光合生产力的重要衡量指标。为了实现植被日光诱导叶绿素荧光的广域精准探测,设计并研制了一种叶绿素荧光高光谱成像探测仪。该成像探测仪使用了基于棱镜-体相位全息透射光栅的全透射式光学系统,在高数值孔径(0.25)的基础上实现了高光学性能:可在20°视场和670~780 nm(可扩展至650~800 nm)工作波段实现1 mrad的空间角分辨率、0.3 nm的光谱分辨率和优于100的信噪比。由系统设计结果、样机测试结果和应用数据分析结果可知,样机完全满足设计要求。本仪器可为农林监测和碳循环观测提供重要的科学数据,并可作为陆地植被光合作用中有效的新型观测手段。

关键词 植被观测; 日光诱导叶绿素荧光; 高光谱成像; 体相位全息透射光栅

中图分类号 O433.1; TH744.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232182

Hyper-Spectral Imaging Spectrometer for Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence of Vegetation Observation (Invited)

Yu Lei^{1*}, Wang Tao^{1,2}, Lin Jing³

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²Science Island Branch, Graduate School of USTC, Hefei 230026, Anhui, China;

³Department of Chemical and Chemical Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230601, Anhui, China

Abstract Solar-induced chlorophyll fluorescence of vegetation is an important parameter in evaluating plant photosynthesis. A hyper-spectral imaging spectrometer prototype is presented for the fluorescence observation of vegetation in a wide area. The main transmission optical system of the imaging spectrometer is based on the key dispersive element composed of prism and volume phase holographic transmission grating. This form could realize high performances under the high numerical aperture (0.25). The prototype has an angle spatial resolution of 1 mrad, a spectral resolution of 0.3 nm, and an signal-to-noise ratio better than 100 in the waveband of 670–780 nm (it can be extended to 650–800 nm) and the full field of view of 20°. The results of the design, test results of the prototype and analysis results of application data show that the imaging spectrometer can satisfy the requests of the design. The instrument can supply important scientific data for the agriculture monitoring and forests and carbon cycle observation, and it can be considered as a new observation method for the land vegetation photosynthesis.

Key words vegetation observation; solar-induced chlorophyll fluorescence; hyper-spectral imaging; volume phase holographic transmission grating

1 引言

植被生态系统的稳定对于维持全球生态系统稳定来说非常重要。一直以来,对植被光合作用的观测都

是遥感领域的研究前沿,通过观测数据所实现的光合作用动力研究和精准评估可以帮助研究人员更深入地了解 and 掌握地球生态系统中各类复杂循环的机理和机制。近年来,日光诱导叶绿素荧光(SIF)的研究得到

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2023-10-07; 录用日期: 2023-10-13; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(62375269)、安徽省科研编制计划项目(2023AH051283)

通信作者: *yulei@aiofm.ac.cn

了快速发展。SIF 具有独特的产生机制,相比于植被常用反射光谱所能提供的植被指数(NDVI)参量,SIF 可以在叶片、冠层乃至生态系统以上的范围更准确地表征植被的光合生产力以及评估植被的生长状况,因此 SIF 又被称为植被光合作用的“探针”。这一特点使 SIF 已经逐渐发展为评估植物光合作用的重要遥感参数,并开始对植被生产力、植被生理、病理与环境压力监测以及全球碳和水循环研究领域中得到广泛应用^[1-3]。

SIF 是一种非常微弱的自发辐射光谱,几乎完全混杂在植被上行反射光谱中,很难被传统的植被光谱探测技术所获取,因此需要针对性地研制高精度的 SIF 探测仪器。SIF 探测经历了实验室探测、外场地面探测、高塔探测、航空探测和星载探测等一系列发展,距今已超过 50 年^[4]。但是直到近 10 年,高光谱成像观测技术才开始在 SIF 观测中发挥重要作用,这与相关的技术发展和反演算法的研究是分不开的。研究人员最早使用可对全球进行观测的各类星上光学遥感仪器所获取的数据进行 SIF 的反演和应用,这些仪器包括:GOSAT (Greenhouse Gases Observing SATellite)、GOSAT-2 (Greenhouse Gases Observing SATellite-2)、OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2)、TanSat (Carbon Dioxide Observation Satellite Mission)、GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment 2)、SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric CHartographY) 以及最新的 TROPOMI (TROPO-Spheric Monitoring Instrument)^[5-9]。实际上,这些载荷主要用于大气观测,并不专用于 SIF 观测,只是因为这些仪器的观测波段恰好覆盖了 SIF 的观测波段,同时它们又具备极高的分辨率和信噪比(SNR),因此,随着反演算法的发展,研究人员将这些仪器获取的较高质量的数据很好地用于 SIF 的反演。欧洲航天局正在研发的 FLEX (Fluorescence Explorer) 计划中的载荷 FLORIS (Fluorescence Imaging Spectrometer) 是第一个针对 SIF 的专用探测载荷,该仪器可以实现 150 km 的幅宽、300 m 的空间分辨率、0.3 nm 的光谱分辨率以及极高的信噪比,但是时至今日该仪器还没有完成研制^[10]。我国已经发射的“句芒号”上搭载了第一个入轨的荧光探测载荷 SIFIS (Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence Imaging Spectrometer),其光谱分辨率达到了 0.3 nm,并具备很好的观测信噪比,但是其幅宽仅为 34 km,空间分辨率为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ ^[11]。芬兰的 Specim 公司研发了市面上第一台 SIF 专用观测仪器 AsiaIBIS FI,仪器在 670~780 nm 波段具备 0.3 nm 的光谱分辨率,同时在 32.3° 视场下具备 1.5~2.0 mrad 的空间角分辨率。该设备售价昂贵,其核心研发技术和知识产权也属于保密范围。

为了在国内实现具有自主知识产权的 SIF 高光谱

成像探测仪的研发,有效解决目前同类产品稀缺的问题,本文针对 SIF 高光谱成像探测的科学应用需求,通过核心光学系统设计、核心分光器件研发、光机系统设计和整机集成标定等研究,实现了具有高光学性能和自主知识产权的高光谱成像探测仪样机的研制。研制的样机进行了外场应用,获取了很好的数据应用结果,验证了仪器的性能。本研究将为未来我国在植被探测领域的发展提供一条有效的技术路径。

2 光学系统设计

2.1 SIF 高光谱成像探测仪性能分析

SIF 的探测原理比较特殊:由于大气的吸收,到达地表的太阳辐照度光谱存在许多带宽在 0.1~10.0 nm 范围内的夫琅禾费谱线,其中部分谱线的中心强度比其相邻谱区低 10% 以上。受日光激发的叶绿素产生的荧光辐射量会将夫琅禾费谱线的吸收阱进行一定程度的填充。通过比较太阳入射标准光谱和探测获得的植被反射光谱中某个夫琅禾费谱线与其相邻谱区的相对强度,便可以定量测量这些荧光信号的强度。研究表明,只要能够测定夫琅禾费谱线波段的光谱反射率、太阳辐照度和冠层反射辐照度,就可以测算出 SIF。只要探测器的光谱分辨率和信噪比足够高,探测到的荧光光谱辐射特性和线宽特性就与夫琅禾费谱线的宽度、深度、形状无关。SIF 光谱观测原理如图 1 所示。

根据以上原理分析,SIF 高光谱成像探测仪需要具备以下性能:

1) 可用于 SIF 观测的窗口主要为 $\text{O}_2\text{-A}$ (740~780 nm) 和 $\text{O}_2\text{-B}$ (677~697 nm) 两个波段,因此在观测波段上需要覆盖以上两个窗口,同时最好可以有一定的延伸,设置仪器的工作波段为 670~780 nm。

2) 目前研究表明,当仪器的光谱分辨率优于 1 nm 时,观测数据就可用于荧光反演,且光谱分辨率越高越好。但是高光谱分辨率同时又与信噪比和观测波段紧密相关并呈反比关系,因此光谱分辨率并不能无限制取高。综合考虑设定观测仪器的光谱分辨率为 0.3 nm,以保证与其他指标同时达到最优。

3) 由于 SIF 仅占植物受照射光辐射能量的 0.5%~2.0%,在植被反射光谱能量中占比极低,比如在 $\text{O}_2\text{-A}$ 窗口波段,SIF 的辐射强度仅为 $0.5\sim 3.0 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{Sr})$,为了良好地提取这种微弱信号,需要观测仪器具备极高的信噪比(≥ 100)。

4) 仪器同时需要具备大观测视场和高空间分辨率,以帮助研究人员在进行广域遥感观测时对不同植被的分布和特性作良好区分。

2.2 SIF 高光谱成像仪光学系统设计

所设计的仪器使用推扫观测模式,采用望远镜-成像光谱系统的组成形式,其中,成像光谱系统由狭缝、准直镜组、光栅分光器件、聚焦镜组和探测器组成。选

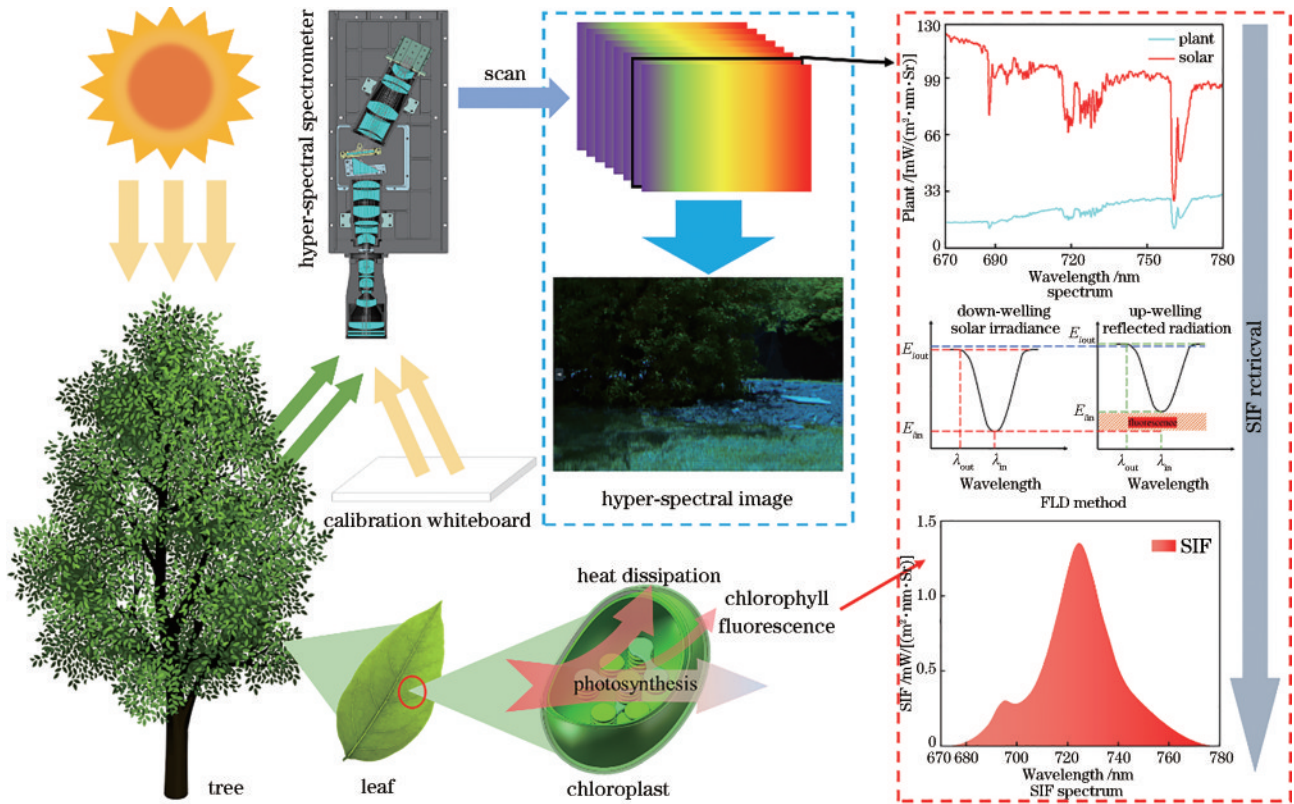


图 1 SIF 光谱观测原理

Fig. 1 Principle of SIF spectral observation

用面阵互补金属氧化物半导体(CMOS)作为探测器,其像元尺寸为 $11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$, 面阵大小为 $2048 \times$

2048。根据前述分析得到所设计仪器系统的性能参数,如表 1 所示。

表 1 成像光谱仪系统参数

Table 1 Specifications of the imaging spectrometer

Parameter	Value
Spectral waveband	670–780 nm
Field of view	$20^\circ \times 0.057^\circ$ (spatial dimension \times spectral dimension, instantaneous)
Spectral resolution	$\leq 0.3 \text{ nm}$
Spatial resolution	$\leq 1 \text{ mrad}$
<i>F</i> number	2
Slit size (length \times width)	$11.500 \text{ mm} \times 0.033 \text{ mm}$

2.2.1 望远镜系统设计

仪器的前置望远镜采用像方远心设计,可对无穷远处的物体进行成像。在材料上尽量选用力、热性能较好的常用玻璃。设计的望远镜系统的结构如图 2 所示。

望远镜光学系统共由 8 片球面镜组成, *F* 数为 2, 视场为 20° 。优化设计良好地消除了系统的各类像差。图 3 给出了望远镜成像像面处在全波段和全视场下的 MTF(modulation transfer function)曲线。可以看到,在探测器奈奎斯特频率 (45 lp/mm) 下,望远镜的 MTF 值高于 0.8, 接近衍射极限, 具有优越的成像质量。

2.2.2 高通量成像光谱仪光学系统设计

设计可用于 SIF 探测的高光谱成像探测仪光学系统的核心难点在于如何令成像光谱仪良好地平衡探测所需的高信噪比和高光学性能。在一般光学系统的设计过程中,为了保证高信噪比,通常需提高系统的数值孔径,并尽可能地提升光学镜片的传输效率。但是高数值孔径同时又限制了系统的像差校正能力,使得高光学性能的实现变得困难。为了匹配前端望远镜高达 2 的 *F* 数,成像光谱仪光学系统需达到 0.25 左右的数值孔径。在各类已有的成像光谱系统中,仅有 Offner 和 Dyson 成像光谱系统结构可以实现较高的数值孔径^[12]。但是 Offner 结构在数值孔径超过 0.2 时就已很难满足研究所需的光学成像质量,而 Dyson 结构

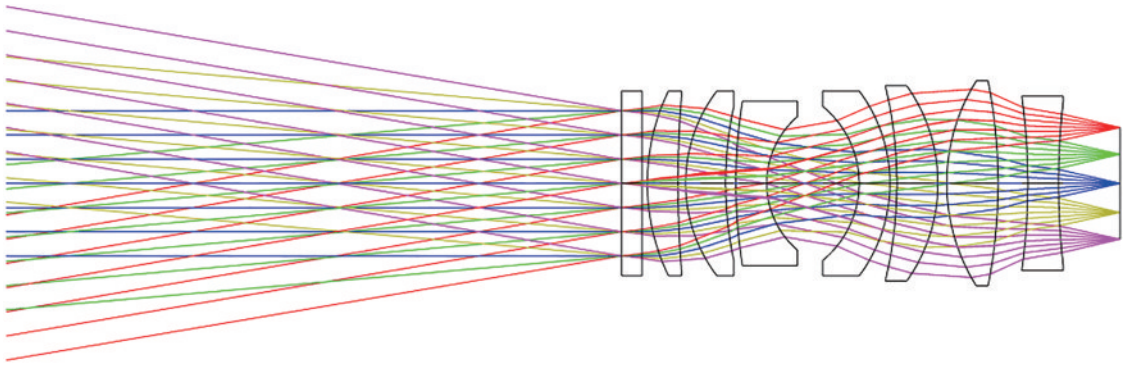


图 2 望远镜系统光学结构

Fig. 2 Optical structure of the telescope system

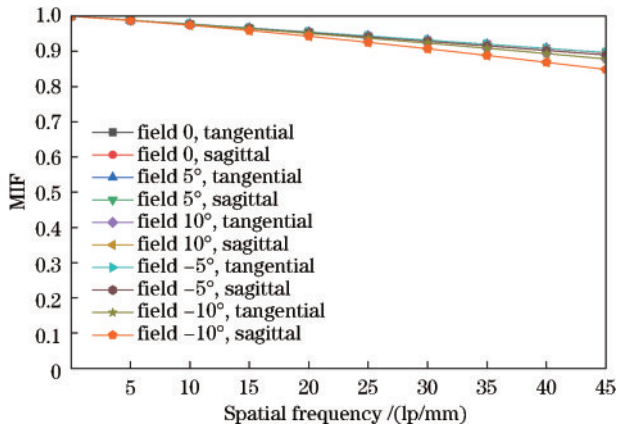


图 3 望远镜 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves of the telescope

由于光栅刻线的限制也难以实现所需的光谱分辨率。另一方面,在这两种结构中所用到的光栅的一阶衍射效率通常只有 40%,最高也不超过 70%,这也影响了仪器的有效传输效率。

为了解决这一问题,选择基于体相位全息透射光栅的透射式光谱仪形式。首先,体相位全息透射光栅具备极高的一阶衍射效率(≥70%)、多种刻线密度、低偏振敏感度和较低的杂光。其次,多个透镜组成的准直系统和聚焦系统具备更多变量,可以消除各类像差,使系统获得更好的光学性能。

根据体相位全息透射光栅的衍射光栅方程分析聚焦透镜出射后的各波长在像面上的均匀分布情况,再根据所需的光谱分辨率要求即可推算出光栅所需具备的刻线密度。当聚焦透镜焦距固定、光谱分辨率固定时,光栅刻线密度表示为

$$g = 1 / \sqrt{\left(\frac{\lambda_1}{a}\right)^2 - 2b \frac{\lambda_1 \lambda_c}{a^2} + \left(b \frac{\lambda_c}{a}\right)^2 + \lambda_c^2}, \quad (1)$$

$$\text{式中: } a = \left(\frac{L}{2f_t}\right) / \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2f_t}\right)^2}; \quad b = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2f_t}\right)^2},$$

其中, L 为像面处两个波长聚焦时沿光栅色散方向的距离(可根据光谱分辨率进行计算), f_t 为聚焦透镜焦距;

λ_1 为任意波长; λ_c 为工作波段中心波长。将已知参数代入式(1),计算得到光栅刻线密度为 1087 line/mm。留有一定余量,并考虑光栅制作情况,最终选取光栅刻线密度为 1200 line/mm。

基于体相位透射光栅的透射式成像光谱仪存在着固有的光谱弯曲现象,一定程度上会影响其高性能的光谱表现。为解决这一问题,利用棱镜-光栅(P-G 结构)作为成像光谱系统的核心分光器件。其组成结构如图 4 所示,其中, O 为狭缝中心, S 为狭缝长度边缘点。

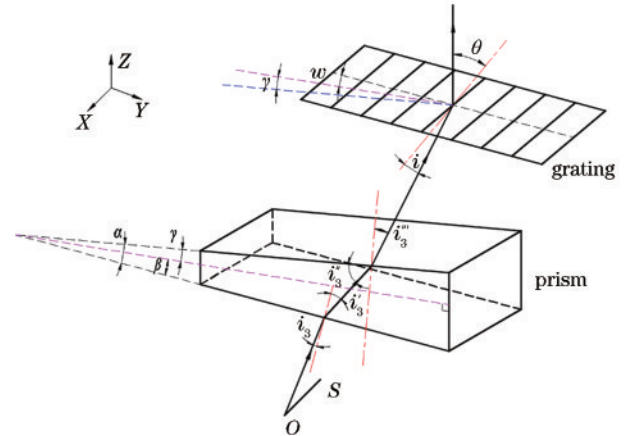


图 4 P-G 核心分光器件

Fig. 4 P-G dispersive component

由棱镜带来的光谱弯曲(smile)可表示为

$$\Delta S_p = -\frac{(n^2 - 1) \sin \alpha}{2nf_c \cos i'_3 \cos i''_3} x^2, \quad (2)$$

式中: n 为棱镜材料折射率; f_c 为准直镜焦距; x 为狭缝高度; α 为棱镜楔角; $i'_3 = \arcsin(\sin i_3/n_{\lambda_0})$, 其中, n_{λ_0} 为棱镜材料对选定波长光束的折射率, i_3 为光线在棱镜上的入射角; $i''_3 = \arcsin\{n_{\lambda_0} \sin[(\gamma - \beta) - i'_3]\} = i + \gamma + w$, 其中, γ 为棱镜底边法线与出射面的夹角, β 为棱镜底边法线与入射面的夹角, w 为棱镜光线出射面与光栅之间的夹角, i 为光线在光栅上的入射角。

由光栅带来的光谱弯曲可表示为

$$\Delta y_G = \frac{mg\lambda x^2}{2f_c \cos \theta_0}, \quad (3)$$

式中: m 为光栅衍射级数; λ 为选择波长; θ_0 为对应选择波长的光栅衍射角。从式(2)和式(3)可以看出, 由透镜带来的光谱弯曲与由光栅带来的光谱弯曲的弯曲方向相反, 因此, 通过合理选择参数对组合器件进行优化

即可完全消除光谱弯曲。

光谱弯曲的另一种形式是 keystone, 它与狭缝的长度成正比, 同时与不同波长的衍射角之差成正比。在工作波段不是非常宽、狭缝不是特别长的情况下, 这一弯曲量是可以忽略不计的。

最终设计的成像光谱系统如图 5 所示, 系统为物方远心光路, 孔径光阑位于光栅上。

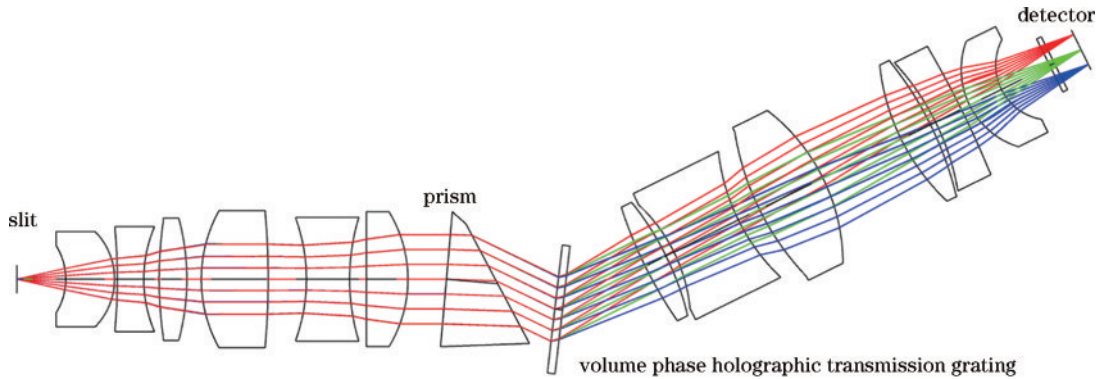


图 5 成像光谱仪光路

Fig. 5 Imaging spectrometer light path

2.2.3 高光谱成像仪光学系统设计结果

将望远镜与成像光谱仪以狭缝为基准进行对接, 即可获得仪器的整体光路, 如图 6 所示。

完整仪器光学系统的模拟仿真分析结果如图 7 所示。边缘波长 (670 nm 和 780 nm) 与中心波长

(725 nm) 处的全视场 MTF 值在探测器奈奎斯特频率 (45 lp/mm) 下均高于 0.6, 全视场全波段点列图中均方根 (RMS) 光斑半径值小于 $5 \mu\text{m}$, 像面聚焦所成像斑可完全被探测器像元 ($11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$) 包围。因此仪器光学系统具有极佳的光学成像质量。

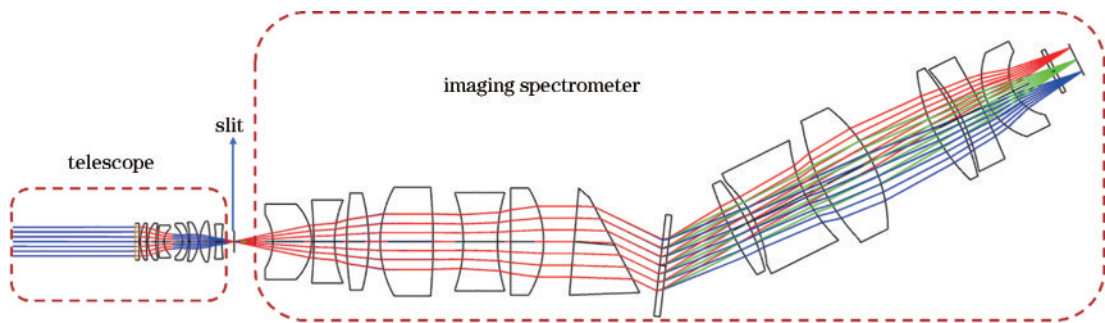


图 6 仪器光学系统

Fig. 6 Optical system of the instrument

根据光学系统像面聚焦成像光斑分析, 系统的谱线弯曲 (smile) 小于 $2.5 \mu\text{m}$, keystone 小于 1 个像元, 具有很好的光谱性能。像面上最终成像的光谱宽度为 12.935 mm , 计算出的光谱采样间隔为 0.0935 nm/pixel , 整个成像光谱系统的放大倍率为 1:1, 狭缝在像面上成像宽度约覆盖 3 个像元, 计算得到光谱的半高宽即光谱分辨率为 0.28 nm , 满足设计要求。

3 样机研制与应用结果分析

3.1 SIF 高光谱成像仪样机研制与标定

3.1.1 研制样机整体结构

SIF 高光谱成像仪样机的整体结构如图 8 所示。

3.1.2 望远镜测试结果

使用定心仪对望远镜进行装调, 通过传递函数测试仪测试了望远镜参数, 获得其 MTF 值, 如图 9 所示。

可以看到, 在探测器奈奎斯特频率 45 lp/mm 处望远镜的 MTF 值高于 0.65。探测器像元尺寸为 $11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$, 成像时采用 3 像元合并, 望远镜焦距为 32.5 mm , 计算得到其空间角分辨率为 1 mrad 。测试结果表明, 望远镜的空间角分辨率完全满足设计指标要求。

3.1.3 样机光谱定标结果

使用汞-氙灯对仪器进行光谱定标, 获得如图 10(a) 所示的数据。使用带宽为 0.001 nm 的可调谐激光器以步长为 0.1 nm 扫描全部光谱, 并对数据进行拟合标

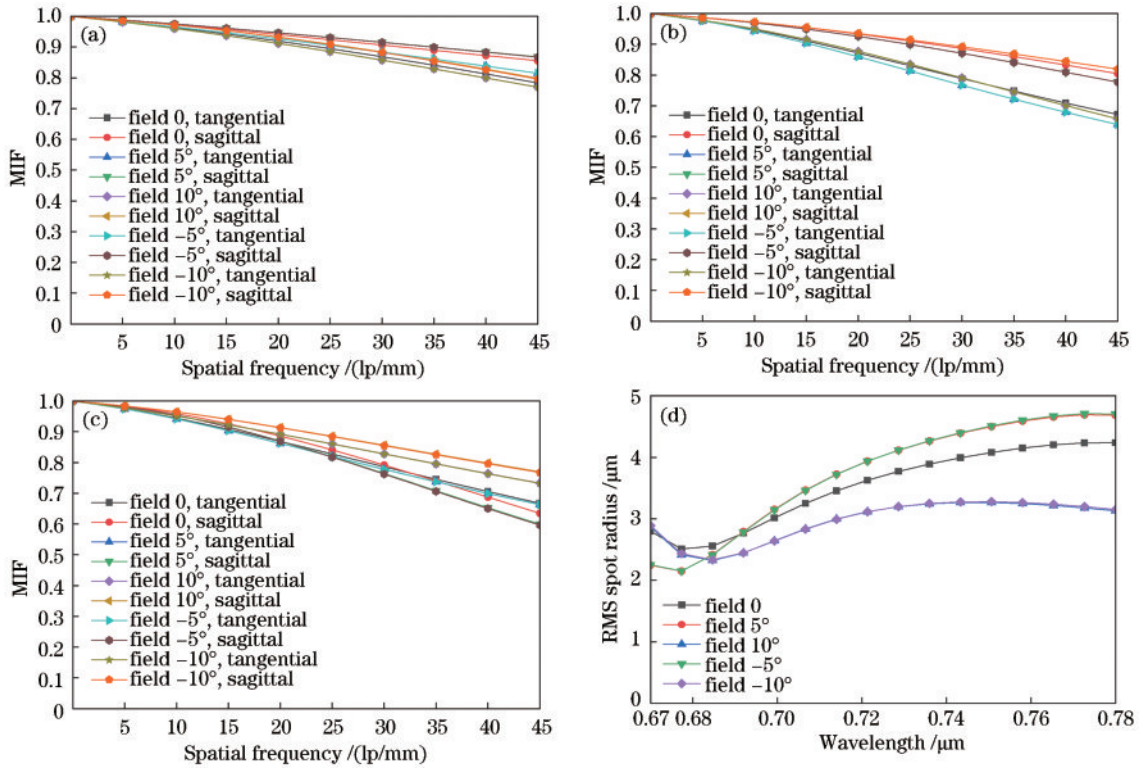


图 7 仪器光学系统优化设计仿真结果。(a)670 nm 波长处的 MTF 值;(b)725 nm 波长处的 MTF 值;(c)780 nm 波长处的 MTF 值;(d)全波段全视场的 RMS 光斑半径分布

Fig. 7 Optimized design results of optical system of the instrument. (a) MTF value at the wavelength of 670 nm; (b) MTF value at the wavelength of 725 nm; (c) MTF value at the wavelength of 780 nm; (d) RMS spot radius distribution in all waveband and all fields of view

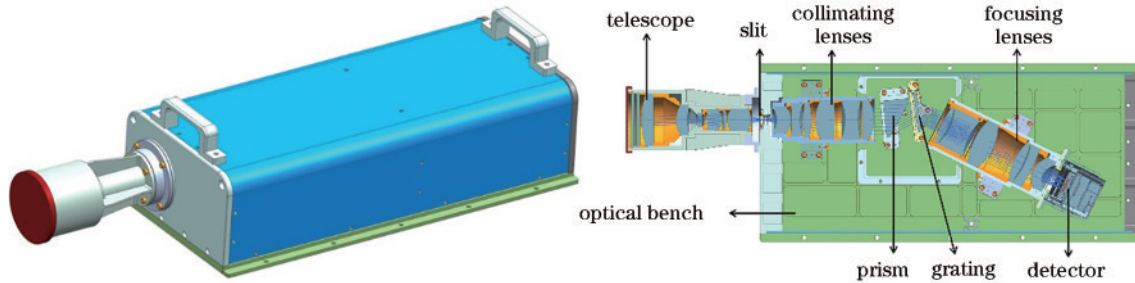


图 8 仪器样机

Fig. 8 Prototype instrument

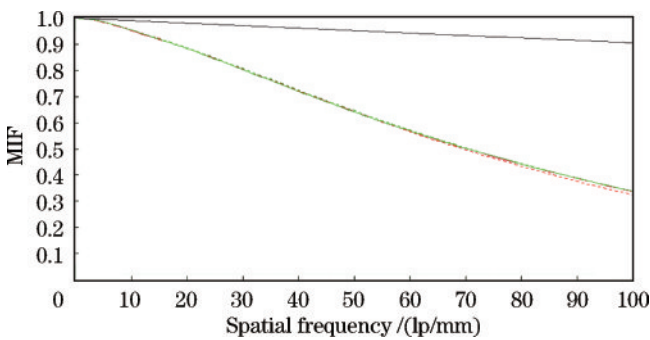


图 9 望远镜 MTF 测试曲线

Fig. 9 Tested MTF curves of the telescope

定,获得的 696.1 nm 波长处的光谱定标数据如图 10(b)所示。

根据以上分析可知,仪器在 696.1 nm 波长处的光谱分辨率达到了 0.27 nm,满足设计应用需求。工作波段内其他波长处的光谱分辨率与此值近似,同样满足应用需求,此处不再赘述。

3.1.4 信噪比测试结果

在实验室使用标准辐射计和积分球对仪器样机完成了辐射定标,实验室辐射定标精度达到 4%。在完成辐射定标后,使用样机对外场植被进行了观测,获取的样机信噪比曲线如图 11 所示。其中,CMOS 积分时间为 5 ms,探测目标一般辐亮度为 100 mW/(m²·nm·Sr)。可以看到,在最弱辐射下单像元的最小信噪比仍然超过了 110,完全满足 SIF 的探测需求。

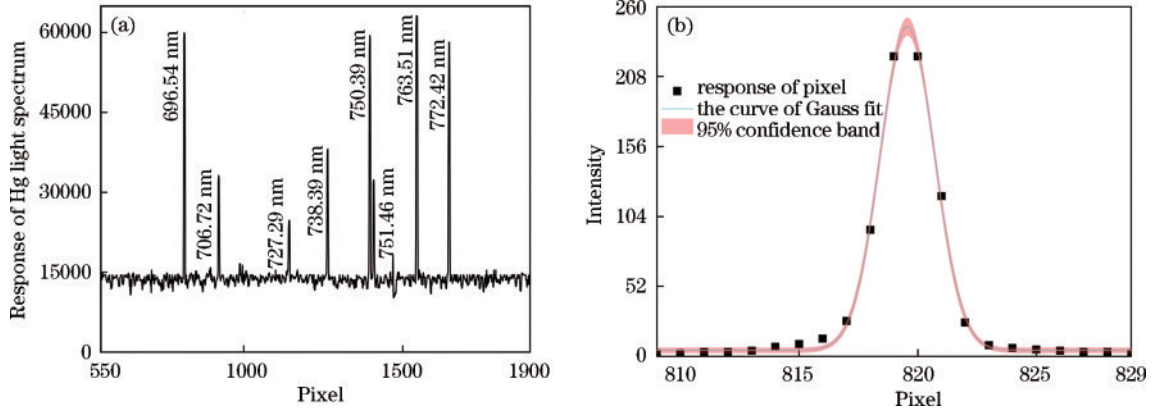


图 10 光谱定标结果。(a)CMOS 第 1000 行的光谱测试数据;(b)696.1 nm 波长处的光谱响应拟合曲线

Fig. 10 Spectral calibration results. (a) Spectral data in the 1000th line of CMOS; (b) Gaussian fit curve of spectral response at 696.1 nm wavelength

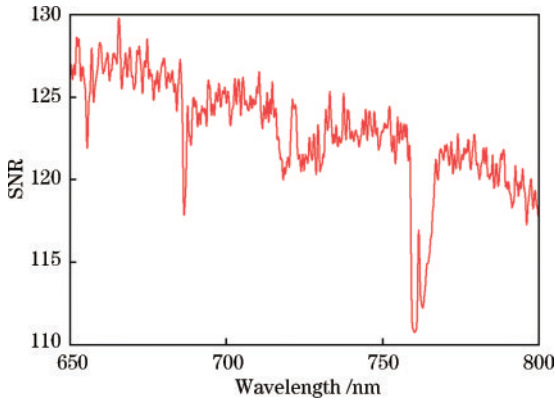


图 11 信噪比测试结果

Fig. 11 Test result of SNR

3.2 SIF 高光谱成像仪样机外场探测反演应用

3.2.1 SIF 反演方法

植被 SIF 辐射强度的基本计算公式表示为

$$L_{\uparrow}(\lambda) = \frac{R(\lambda)E_{\downarrow}(\lambda)}{\pi} + S_{\text{SIF}}(\lambda), \quad (4)$$

式中: λ 为波长; $S_{\text{SIF}}(\lambda)$ 为对应波长 λ 的 SIF 辐射; $R(\lambda)$ 为植被的反射光谱辐射; $E_{\downarrow}(\lambda)$ 为下行太阳辐照度; $L_{\uparrow}(\lambda)$ 为上行反射辐亮度。利用 3FLD 方法对 SIF 进行反演

处理^[13],该方法的原理如图 12 所示。

根据 3FLD 方法,选择 3 个波长对 SIF 进行反演。当这些选取的波长相距足够近时,可以认为在光谱反演窗口内的各波长反射变化是线性的。因此,左右两端的权重 w 可以表示为

$$\begin{cases} w_{\text{left}} = \frac{\lambda_{\text{in}} - \lambda_{\text{left}}}{\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}} \\ w_{\text{right}} = \frac{\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{in}}}{\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}} \end{cases}, \quad (5)$$

由式(5)可以计算得到

$$\begin{cases} \lambda_{\text{out}} = w_{\text{left}}\lambda_{\text{left}} + w_{\text{right}}\lambda_{\text{right}} \\ E_{\text{out}} = w_{\text{left}}E_{\text{left}} + w_{\text{right}}E_{\text{right}} \\ L_{\text{out}} = w_{\text{left}}L_{\text{left}} + w_{\text{right}}L_{\text{right}} \end{cases}, \quad (6)$$

综合式(4)~(6)即可获得 S_{SIF} 和反射率 R :

$$\begin{cases} S_{\text{SIF}} = \frac{E_{\downarrow}(\lambda_{\text{out}})L_{\uparrow}(\lambda_{\text{in}}) - L_{\uparrow}(\lambda_{\text{out}})E_{\downarrow}(\lambda_{\text{in}})}{E_{\downarrow}(\lambda_{\text{out}}) - E_{\downarrow}(\lambda_{\text{in}})} \\ R = \frac{\pi[L_{\uparrow}(\lambda_{\text{out}}) - L_{\uparrow}(\lambda_{\text{in}})]}{E_{\downarrow}(\lambda_{\text{out}}) - E_{\downarrow}(\lambda_{\text{in}})} \end{cases}. \quad (7)$$

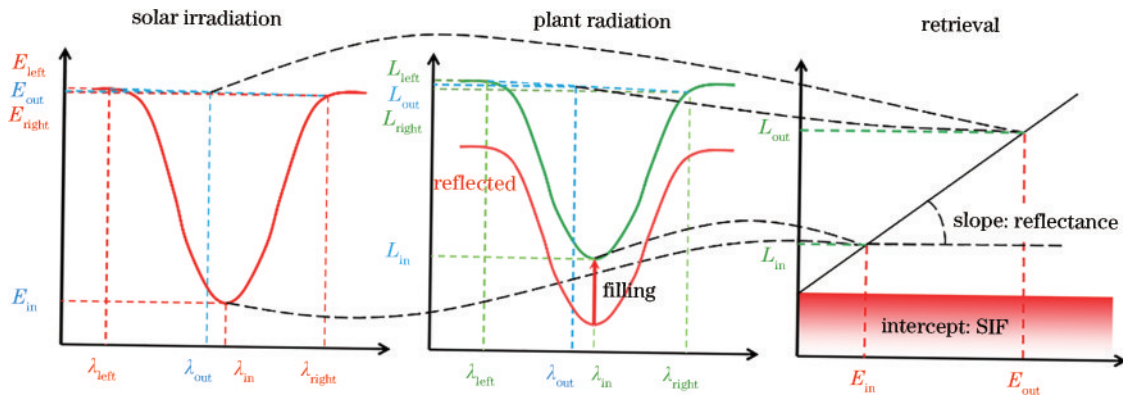


图 12 3FLD 方法原理图

Fig. 12 Schematic diagram of the 3FLD method

3.2.2 SIF 高光谱成像仪应用

使用研制的仪器样机开展外场实验研究。将样机放置于转台之上,对 20 m 远的植物进行扫描观测,获取其在近红外波段的辐射观测数据,并对归一化植被指

数(NDVI)进行分析。NDVI 参数可以增强近红外波段和红辐射远端之间的比对,因此可以用于植被冠层和非植被冠层覆盖区域的区分。图 13 为这一观测结果数据,可以看到,样机具有非常优越的成像质量。

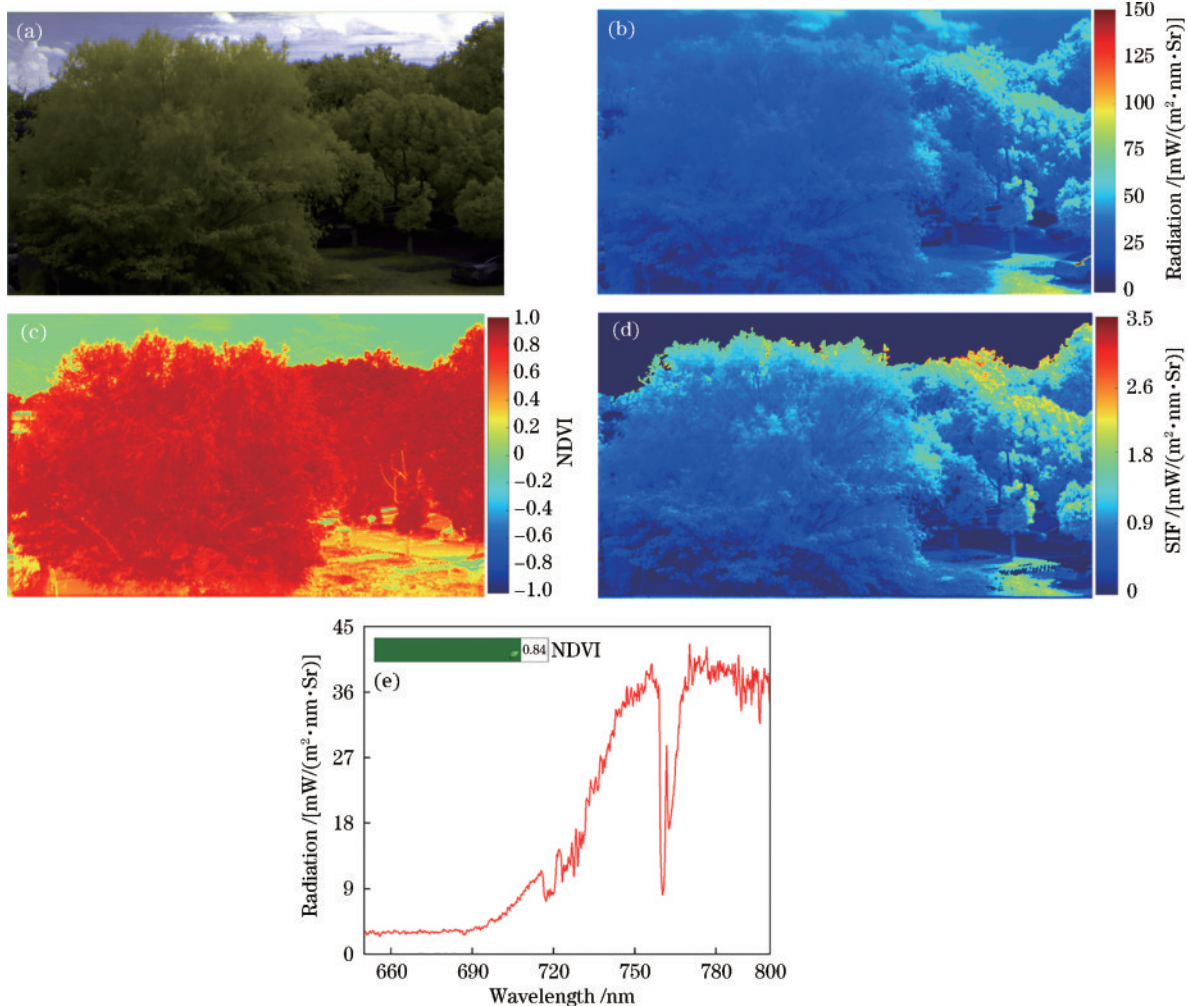


图 13 仪器在外场实地观测的高光谱成像数据与 NDVI 分析结果。(a) 仪器观测的高光谱伪彩色合成图;(b) 近红外 750 nm 波长窗口处的红外反射图像;(c) NDVI 图像;(d) SIF 图像;(e) 冠层反射光谱和 NDVI 分析结果

Fig. 13 Hyper-spectral images observed by the instrument in the outfield and analysis results of NDVI. (a) Pseudo colors hyper-spectral image observed by the instrument; (b) infrared reflected radiation mapping image at the wavelength of 750 nm; (c) NDVI mapping image; (d) SIF mapping image; (e) canopy reflected spectrum and NDVI analysis result

由图 13 可以看出:从近红外反射辐射来看,右侧树木的光照条件优于左侧被云层遮挡的树木,但是这一特征是无法通过 NDVI 图像看出的。这是由于 NDVI 参量仅反映了红边反射之比,而无法反映近红外辐射。在植被未完全覆盖的地面区域,NDVI 产生了明显的变化,这可以帮助研究人员有效识别植被丰度的变化,并探索裸露的土壤区域。但是在植被完全覆盖的区域($\text{NDVI} > 0.7$),这一变化将不再明显,这就意味着在植被覆盖率高的地区 NDVI 的敏感性会大大降低。但是 SIF 的观测结果可以弥补这一问题,这是由于 SIF 仅仅与植物的光合作用状态相关,根据提取的 SIF 成像结果,研究人员可以很容易地获得植物的光合信息。可以看到:右边的植物顶部因为获得了

更好的光照条件,其光合作用很快达到最大值,因此这种光化学淬灭机制允许叶绿体吸收更多的光能用于产生荧光;而左边的植物被云层遮挡,几乎所有的能量都用于光合作用,因此只有极少数的能量能激发叶绿体产生荧光。这一观测结果表明,与 NDVI 参量相比,SIF 信号能够更好地实时反映和跟踪植物的生长状况,因此 SIF 在植物生理生态学研究中具有更大的应用潜力。

4 结 论

本文提出并研制了一种可用于植被 SIF 探测的高光谱成像仪。该仪器的核心成像光谱系统形式为基于棱镜-体相位全息透射光栅的透射式光谱仪形式,这种

结构可以很好地平衡系统的光通量和光学性能之间的矛盾,在 0.25 的高数值孔径下实现 0.3 nm 的光谱分辨率和极其优越的成像质量。最终研制的样机在 670~780 nm 波段具备优于 0.3 nm 的光谱分辨率,在 20°视场下具有 1 mrad 的空间分辨率,在最小信号下具有高于 100 的信噪比。通过样机的标定和外场应用验证了仪器的性能,同时获得了极佳 SIF 实验结果。后续将使用该样机进行长期的外场实验应用,通过大量的数据采集和分析进一步提升仪器的可应用性。

参 考 文 献

- [1] Aasen H, Wittenberghe S V, Medina N S, et al. Sun-induced chlorophyll fluorescence II: review of passive measurement setups, protocols, and their application at the leaf to canopy level[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 927.
- [2] Liu X J, Liu L Y. Influence of the canopy BRDF characteristics and illumination conditions on the retrieval of solar-induced chlorophyll fluorescence[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39: 1782-1799.
- [3] Yu L, Zheng S S, Feng H S, et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence imaging spectrometer: design, manufacture, and evaluation[J]. *Optics Express*, 2022, 30(23): 41422-41436.
- [4] Mohammed G H, Colombo R, Middleton E M, et al. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111177.
- [5] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, et al. Filling-in of near-infrared solar lines by terrestrial fluorescence and other geophysical effects: simulations and space-based observations from SCIAMACHY and GOSAT[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(4): 809-829.
- [6] Li X, Xiao J F, He B B. Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 659-671.
- [7] Du S S, Liu L Y, Liu X J, et al. Retrieval of global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence from TanSat satellite[J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(22): 1502-1512.
- [8] Joiner J, Guanter L, Lindstrot R, et al. Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate-spectral-resolution near-infrared satellite measurements: methodology, simulations, and application to GOME-2[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(10): 2803-2823.
- [9] Guanter L, Aben I, Tol P, et al. Potential of the TROPO-Spheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard the Sentinel-5 precursor for the monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(3): 1337-1352.
- [10] Coppo P, Taiti A, Pettinato L, et al. Fluorescence imaging spectrometer (FLORIS) for ESA FLEX mission[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 649.
- [11] Du S S, Liu L Y, Liu X J, et al. The solar-induced chlorophyll fluorescence imaging spectrometer (SIFIS) onboard the first terrestrial ecosystem carbon inventory satellite (TECIS-1): specifications and prospects[J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 815.
- [12] 于磊. 成像光谱仪的发展与应用(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(1): 20210940.
Yu L. Development and application of imaging spectrometer(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210940.
- [13] Alonso L, Gomez-Chova L, Vila-Frances J, et al. Improved Fraunhofer line discrimination method for vegetation fluorescence quantification[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 620-624.