

四种常用的太阳诱导植被叶绿素荧光 反演方法对比分析研究*

纪梦豪^{1, 2}, 唐伯惠^{1, 2*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 100049)

摘要:【目的】太阳诱导叶绿素荧光(SIF)是一种新型的植被参数, 可用于监测植物光合作用状态和评估总初级生产力。利用模拟数据对比分析常用SIF反演方法的精度, 为野外测量仪器SIF反演方法的选择提供理论基础。【方法】选择SCOPE模型模拟了不同生化理化参数下的模拟数据, 并以该数据为基础生成不同光谱分辨率(SR)和不同信噪比(SNR)下的模拟数据集。选择4种常用SIF反演方法进行SIF反演: 夫琅禾费暗线法(FLD), 3FLD、iFLD和光谱拟合法(SFM)。【结果】基于模拟数据的反演结果表明SFM和iFLD方法能够获得更准确的SIF, 其均方根误差(RMSE)分别为 $0.1142 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 和 $0.1114 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$; 3FLD法亦能取得较准确的SIF结果, 其RMSE为 $0.2014 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$; 而FLD法的精度较差, 其RMSE大于 $0.5 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。在高SR和SNR条件下, SFM和iFLD法明显优于3FLD和FLD法, 但随着SR和SNR的降低, 4种反演方法的精度也随之降低, 其中iFLD法受SNR影响最为明显。【结论】利用SFM和iFLD方法能够得到更准确的SIF反演结果, 且随着仪器SR和SNR的提高其反演精度也随着提高, 但iFLD方法易受SNR的影响。因此, 对于光谱分辨率优于1 nm的测量仪器应优先选择SFM方法来反演SIF。

关键词: 太阳诱导叶绿素荧光(SIF); 反演方法; SCOPE; 夫琅禾费暗线方法

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20190107

0 引言

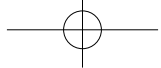
太阳诱导叶绿素荧光(Solar-Induced chlorophyll Fluorescence, SIF)是监测初级生产力(GPP)和植被光合作用的有效工具^[1-4]。在自然条件下, 叶色素吸收的光合有效辐射可以: (1) 用于光化学反应, (2) 热消散, (3) 以荧光的形式释放^[4-6]。荧光作为光合作用的副产品, 与基于反射率的植被指数等参数相比, 更能直接反映与植被光合作用相关的信息。近年来, SIF在GPP、物候和胁迫监测等方面的研究受到了国内外学者

收稿日期: 2019-01-10

第一作者简介: 纪梦豪(1995—), 硕士研究生。研究方向: 植被遥感。Email: jimh.17s@igsrr.ac.cn

*通信作者简介: 唐伯惠(1973—), 博士、研究员。研究方向: 定量遥感。Email: tangbh@igsrr.ac.cn

*基金项目: 国家自然科学基金“极轨卫星地表温度产品角度归一化方法研究”(41871244)



2019年2月

的广泛关注,且学者们尝试将SIF应用于作物产量估测、植被胁迫监测以及陆面模式或生态系统模型耦合等方面的研究^[7]。

由于太阳诱导叶绿素荧光的强度很小,通常只占总反射能量的1%~2%,故荧光的准确测量非常困难。研究表明在太阳夫琅禾费暗线或地球氧气吸收线处,荧光占总辐射能量的比例相对较大。因此,可以选择太阳夫琅禾费暗线或地球氧气吸收线处进行荧光反演^[5]。夫琅禾费暗线法(Fraunhofer Line Discrimination, FLD)通过假定吸收线内外处植被冠层反射率和荧光相同来反演荧光^[8]。但这一假设与现实不符,导致荧光反演存在很大误差,对此,许多修正的FLD方法被提出来以提高荧光的反演精度,例如3FLD、cFLD、eFLD和iFLD等^[5]。近年来,基于高光谱的SFM(Spectral Fitting Method)方法被发展出来,SFM方法假定在较窄的光谱范围内,冠层反射率和荧光可以用简单的数学函数表示。此外,基于统计的反演方法也被用于SIF反演,并且逐渐成为卫星遥感数据反演SIF的一种主要方法^[9]。Damm等、Meroni等以及Liu等通过模拟数据或野外实测数据对比分析了这些方法的优缺点及其适用性^[10-12]。

在过去的几十年中,基于物理和统计原理的方法已广泛应用于地基、机载和星载的SIF反演^[10]。特别是自Joiner等人利用日本温室气体卫星观测数据首次实现了卫星尺度上的SIF反演后,学者们针对不同卫星传感器发展了许多新的SIF反演方法,并生成了相应的SIF产品数据集,促进了SIF领域的研究^[13]。目前越来越多具有荧光探测的卫星发射或即将发射,为荧光探测提供了丰富的数据源。但是由于卫星的空间分辨率比较低,与地面荧光探测空间分辨率存在较大差异,造成了卫星荧光验证十分困难^[14]。此外,目前关于SIF与GPP之间的关系研究大都基于长时间的地面观测数据,而SIF反演的误差会影响SIF与GPP关系的研究^[15-17]。因此,需要一种更准确的地面SIF估算方法。为此,文章利用模拟数据和地面实测数据比较分析了4种常用的太阳诱导叶绿素荧光反演方法的精度,以期野外测量仪器SIF反演方法的选择提供理论基础。

1 数据

1.1 模拟数据

通过SCOPE模型构建模拟数据集来评估不同方法的反演精度^[18]。该数据集由167个案例组成,这些案例是通过随机分配给模型的输入参数而生成,表1给出了SCOPE模型模拟所用的参数及其相应的值。对于每种情况,模拟了不同传感器配置下的植被冠层的总出射辐射亮度、荧光辐射亮度以及相应的入射辐照度^[19]。影响SIF反演精度的仪器参数主要有:光谱分辨率(SR)、信噪比(SNR)、光谱偏移(SS)和光谱采样间隔(SSI)。根据Damm等人实验结果,SR和SNR是影响SIF反演结果的两个主要因素,SS和SSI对SIF反演的误差影响较小^[10]。因此,该文仅分析SR和SNR对反演精度的影响。

表 1 SCOPE 模型中的参数设置

Table 1 Values of parameters set for the simulations of scope model

参数	定义	单位	范围	参数	定义	单位	范围
<i>N</i>	叶细胞结构参数	—	1~2.5	<i>hc</i>	植被高度	m	0.2~5
<i>Cab</i>	叶片叶绿素含量	ug/cm ²	0.4~76.8	<i>LIDFa</i> <i>LIDFb</i>	叶倾角分布函数	—	-1~1
<i>Cw</i>	叶片等效水厚度	g/cm ²	0.0044~0.0340				
<i>Cm</i>	干物质含量	g/cm ²	0.0017~0.0331				
<i>Vcmo</i>	最大羧化能力	umol/m ² /s	20~40	<i>leafwidth</i>	叶宽	m	0.05~0.2
<i>Type</i>	光化学途径	—	0 (C3) 或 1 (C4)	<i>spectrum</i>	土壤反射率光谱类型	—	1 (type 1), 2 (type 2) 或 3 (type 3)
<i>fqe</i>	荧光量子产率	—	0~0.02	<i>Rin</i>	入射短波辐射	W/m ²	200~1600
<i>LAI</i>	叶面积指数	—	0~6	<i>Ta</i>	气温	℃	10~30

由于 SCOPE 模型模拟的冠层出射辐照度的分辨率为 1 nm，因此，首先利用 MODTRAN（版本 5.2.1）模拟 1 cm⁻¹ 的冠层入射辐照度，并将 SCOPE 模拟的反射率和荧光插值到相同分辨率，最终生成 SSI 为 1 cm⁻¹ 的无噪声影响的光谱数据。然后使用 Damm 等人提出的方法，通过高斯函数对光谱进行卷积，并且通过随机白高斯噪声添加噪声，来模拟给定 SR 和 SNR 下的光谱数据。基于上述方法，模拟数据集构建了 30 个不同的 SR（范围从 0.1~3 nm，增量为 0.1 nm）和 11 个不同的 SNR（范围从 100~1 000，常规对数间隔为 0.1，基数为 10）下的光谱数据。光谱的 SSI 设为 SR 值的一半。

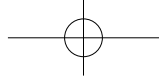
1.2 野外测量数据

该文还利用了实际的野外测量数据对 4 种方法进行了对比分析。野外测量地点为小汤山国家精准农业示范基地试验田（北京，40°11'N，116°27'E），实验时间为 2017 年 4 月 14 日，实验对象为冬小麦。测量仪器选择的是植被荧光时序观测系统（BGS-FL24C），BGS-FL24C 配备 Ocean Optice QE Pro 光谱仪，其光谱分辨率为 0.31 nm，光谱采样间隔为 0.155 nm，信噪比为 1 000，光谱范围为 640~800 nm。图 1 为野外 BGS-FL24C 数据采集图。

2 方法

2.1 SIF 反演方法

冠层 SIF 反演方法包括物理模型法和统计方法。该文选择 4 种常用的冠层反演方法，通过模拟数据集来对比分析 4 种方法的反演精度。以下是 4 种常用反演方法的介绍。



2019 年 2 月



图 1 利用 BGS-FL24C 仪器在小汤山实验基地开展植被荧光测量

Fig.1 Data acquisition at Xiao Tangshan site with BGS-FL24C measurement system

由于大气对地面冠层荧光观测的影响较小,因此可以忽略大气的影。在假设荧光发射和地物表面反射都是朗伯体的条件下,植被冠层的辐射传输方程可表示为:

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

式(1)中, L 为植物冠层接收到的辐亮度, E 为入射到植被冠层的太阳辐照度, F 为荧光, r 为植被冠层反射率, λ 为波长。

FLD: FLD 方法假定吸收线内外波段的反射率和 SIF 值相同^[8],通过联立吸收线内外两个波段的辐射传输方程反演出 SIF 值:

$$\left. \begin{aligned} L(\lambda_{out}) &= r \times \frac{E(\lambda_{out})}{\pi} + F \\ L(\lambda_{in}) &= r \times \frac{E(\lambda_{in})}{\pi} + F \end{aligned} \right\} \Rightarrow F = \frac{L(\lambda_{in}) \times E(\lambda_{out}) - E(\lambda_{in}) \times L(\lambda_{out})}{E(\lambda_{out}) - E(\lambda_{in})} \quad (2)$$

式(2)中,下标 in 和 out 分别表示吸收线内外的波段。

3FLD: 由于吸收线内外波段的反射率与荧光之间存在差异,使用 FLD 方法会高估 SIF 值。为减少 FLD 的假设带来的误差,Maier 等提出三波段反演方法,其假定在很窄的波段范围内反射率呈线性变化,并利用吸收线左右两个波段反射率的加权平均来拟合吸收性处的反射率^[20],即:

$$\left. \begin{aligned} L(\lambda_{out}) &= L(\lambda_{left}) \times w_{left} + L(\lambda_{right}) \times w_{right} \\ E(\lambda_{out}) &= E(\lambda_{left}) \times w_{left} + E(\lambda_{right}) \times w_{right} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$w_{left} = \frac{\lambda_{right} - \lambda_{in}}{\lambda_{right} - \lambda_{left}} \quad w_{right} = \frac{\lambda_{in} - \lambda_{left}}{\lambda_{right} - \lambda_{left}} \quad (4)$$

式(3)~(4)中, λ_{left} 和 λ_{right} 分别为吸收线左右波段的波长值, w 为权重系数。

iFLD: Alonso 等进一步利用两个校正因子来拟合吸收性内外波段的反射率和荧光的差异^[21]。iFLD 方法可以表示为:

$$F(\lambda) = \frac{\alpha_R \times L(\lambda_{in}) \times E(\lambda_{out}) - E(\lambda_{in}) \times L(\lambda_{out})}{\alpha_R \times E(\lambda_{out}) - \alpha_F \times E(\lambda_{in})} \quad (5)$$

$$F(\lambda_{out}) = \alpha_F F(\lambda_{in}) \quad r(\lambda_{out}) = \alpha_R r(\lambda_{in}) \quad (6)$$

式(5)~(6)中, α_R 和 α_F 分别为反射率和荧光校正因子。由于真实反射率和荧光无法获取, Alonso 等利用吸收线附近受大气影响较小的夫琅禾费暗线波段的表观反射率插值出吸收线处的反射率, 并用插值后的反射率代替真实反射率来求解校正系数。常用的插值方法有 3 次样条插值和多项式拟合, 值得注意的是对于光谱分辨率较高的仪器, 3 次样条插值方法将不再适用, 此时可选择多项式插值。

SFM: SFM 方法假定在很窄的波段范围内, 反射率和荧光可以用简单的数学函数表示^[11]。则 SFM 方法可以表示为:

$$L(\lambda) = \frac{f_r(\lambda) \times E(\lambda)}{\pi} + f_F(\lambda) + \varepsilon(\lambda) \quad (7)$$

式(7)中, $f_r(\lambda)$ 和 $f_F(\lambda)$ 分别表示为反射率和荧光的拟合函数, 该文选择二次多项式拟合反射率和荧光 ($f_r(\lambda) = a_1\lambda^2 + b_1\lambda + c_1$, $f_F(\lambda) = a_2\lambda^2 + b_2\lambda + c_2$), $\varepsilon(\lambda)$ 表示为拟合误差。SFM 方法是针对高光谱分辨仪器提出的一种新的反演方法, 反演精度相对较高。表 2 为以上反演算法的波段设置, 其参考 Damm 等和 Zhao 等文章中的波段设置^[10, 22]。

表 2 不同反演方法的波段位置
Table 2 Wavelength settings for all methods

反演方法	中心波段选择	左波段选择	右波段选择
FLD		$\lambda L(\lambda) = \max(L(\lambda)),$ $\lambda \in [750 \text{ nm}, 775 \text{ nm}]$	—
3FLD	$\lambda L(\lambda) = \min(L(\lambda)),$ $\lambda \in [750 \text{ nm}, 775 \text{ nm}]$		$\lambda L(\lambda) = \max(L(\lambda)),$ $\lambda \in [772 \text{ nm}, 777 \text{ nm}]$
iFLD		$\lambda \in [750 \text{ nm}, 775 \text{ nm}]$	$\lambda \in [772 \text{ nm}, 777 \text{ nm}]$
SFM		$\lambda \in [757 \text{ nm}, 771 \text{ nm}]$	

2.2 精度评定方法

对于模拟数据集, 可通过将反演的 SIF 值与模型模拟的 SIF 值对比来评估反演精度。该文选择 3 种常用的评定参数: 均方根误差 (RMSE)、相对均方根误差 (RRMSE) 和相对绝对平均误差 (MARE), 且参数值越小, 模型反演的精度越高。RMSE、RRMSE 和 MARE 的计算公式分别为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (F_{re} - F_s)^2}{n}} \quad (8)$$

$$\text{RRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{F_{re} - F_s}{F_s} \right)^2}{n}} \times 100\% \quad (9)$$

$$\text{MARE} = \frac{\sum_{j=1}^n \left| \frac{F_{re} - F_s}{F_s} \right|}{n} \times 100\% \quad (10)$$

式(8)~(10)中, F_{re} 为反演值, F_s 为模型模拟值, n 为样本个数。

3 结果与讨论

3.1 基于无噪声模拟数据的反演结果

图2显示了光谱分辨率为1 nm且无噪声影响下4种不同反演方法在O₂A波段处的反演结果。从图2中可以看出, 利用iFLD和SFM方法反演的SIF值与模拟的SIF值相接近, 其RMSE分别为0.111 4 W/m²/μm/sr和0.114 2 W/m²/μm/sr。3FLD方法亦能取得较准确的SIF反演结果, 其RMSE为0.2014 W/m²/μm/sr; 而FLD方法的反演精度较差, 其RMSE大于0.5 W/m²/μm/sr, 明显高估了SIF。

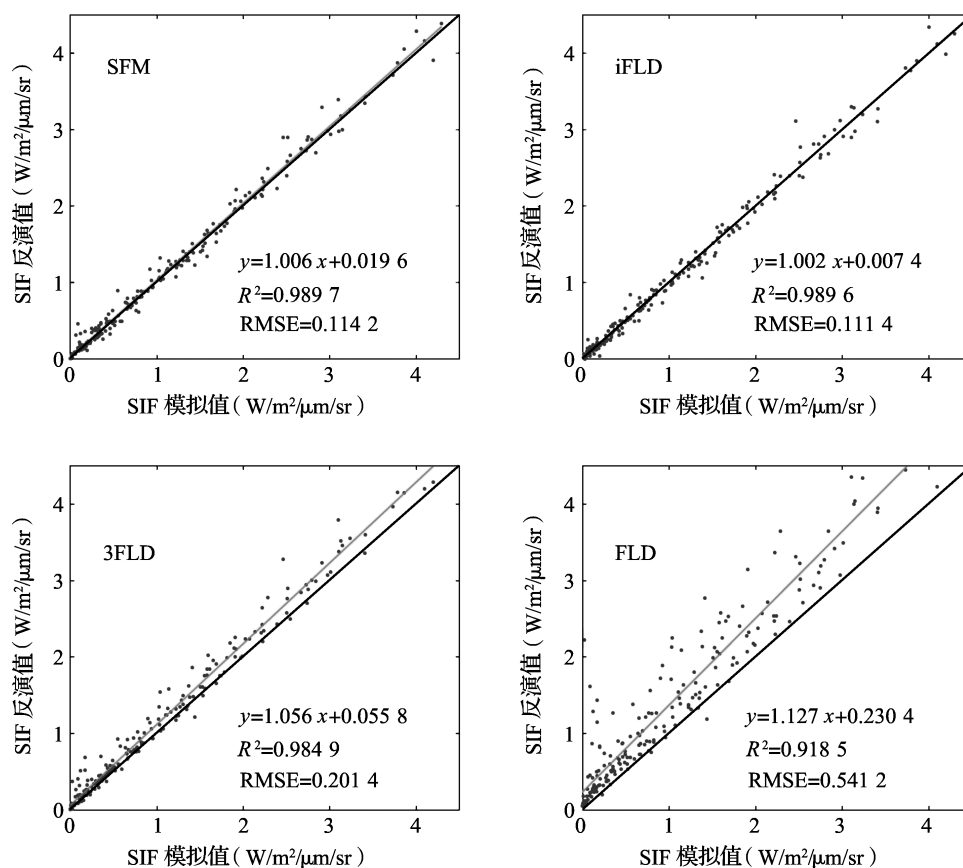


图2 反演的与模拟的SIF值对比结果图;灰色线为拟合曲线,黑色线为1:1线。

Fig.2 Comparisons of SIF simulated with the SCOPE model and the retrieved with four different SIF retrieval methods; the grey line is the fitted curve and the black line is the 1:1 line.

3.2 不同 SR 和 SNR 数据下的结果

图 3 给出了不同 SR 和 SNR 条件下, 分别利用 4 种方法反演 SIF 的精度等值图, 从上至下、从左到右依次为 SFM、iFLD、3FLD 和 FLD 方法的精度结果图。红色虚线为 MARE 等于 10% 的等值线。图 3 结果表明, SFM 和 iFLD 方法的精度明显优于 3FLD 和 FLD 方法的精度。对于 SNR 等于 1000, SR 优于 1 nm, SFM 和 iFLD 方法可以获得较准确的 SIF 反演结果, 其 RRMSE 小于 20%, MARE 小于 10%; 3FLD 方法亦能取得较好的结果, 其 RRMSE 小于 40%, 但 MARE 大于 10%; 而 FLD 方法的反演结果较差, 其最小的 RRMSE 约为 60%, 且 MARE 远大于 10%。

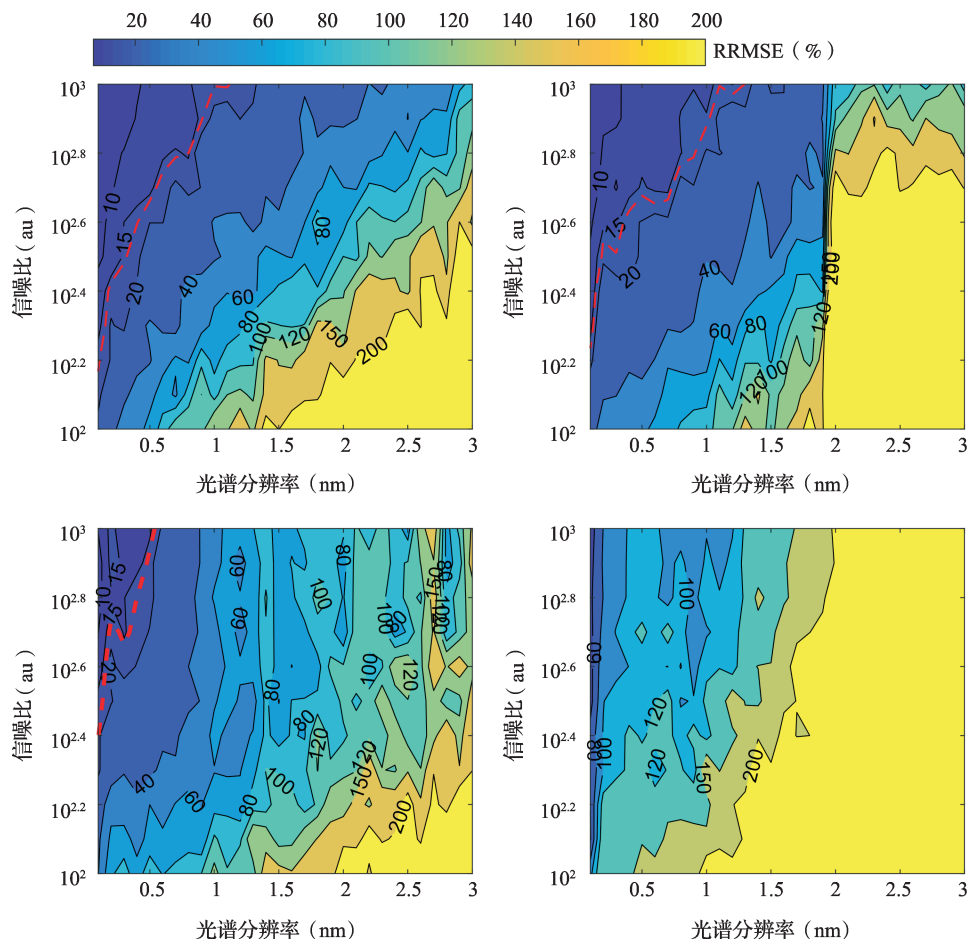


图 3 4 种方法的反演精度等值图, 左上 (SFM)、右上 (iFLD)、左下 (3FLD)、右下 (FLD), 图 4 中红色虚线为 MARE 等于 10% 的等值线

Fig.3 Contours of RRMSE of the SIF with four different SIF retrieval methods as a function of spectral resolution (SR) and signal-to-noise ratio (SNR) (solid lines). The dashed lines show the contours of 10% MARE of the SIF. The axes for SNR are plotted on logarithmic scale.

从图 3 中可以看出, 随着 SR 或 SNR 的降低, 4 种反演方法精度也随着降低; 且 SR 与 SNR 之间可以部分弥补对方的误差影响, 即: 高 SR 可以部分弥补低 SNR 的误差影响, 反之, 高 SNR 可以部分弥补低 SR 的误差影响; 前人的研究亦表明这一现象。此

2019年2月

外,从图3中的结果也可以看出,iFLD方法对SNR最为敏感,在相同的SR条件下,随着SNR降低,iFLD方法的反演精度存在明显降低。SFM方法对SR较为敏感,随着SR降低,SFM方法的反演精度迅速下降;这是由于SFM是基于高光谱仪器提出的一种新的反演方法,当SR较小时,SFM反演方法的可用波段减少,可能造成反演波段的个数少于SFM方法的方程个数。

3.3 基于测量数据的SIF反演

图4显示了利用4种不同方法从野外测量数据中反演的SIF结果。从图4中可以看出,4种方法的反演结果具有相同的变化趋势,在13:30时SIF值存在明显的增加,这与前人的研究结果相同^[22]。此外,图4结果显示FLD的反演结果明显高于SFM、iFLD和3FLD方法的结果,表明FLD方法存在明显的高估SIF现象。SFM、iFLD和3FLD方法的反演结果值较为接近,但3FLD方法反演结果略高于SFM和iFLD方法的反演结果。

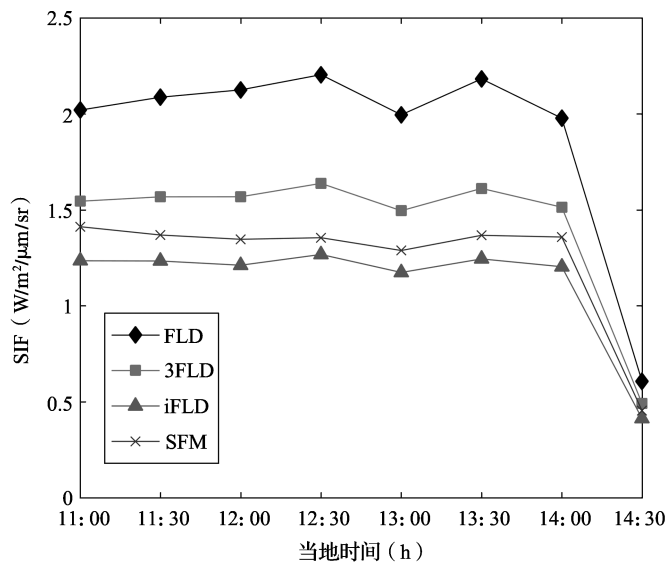


图4 基于测量数据的4种不同方法反演的30 min平均SIF结果

Fig.4 Results of 30-minute averaged SIF retrieved using the four different methods from field measured data

4 结论

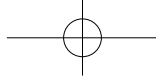
太阳诱导植被叶绿素荧光是光合作用的副产品,能够提供直接反映与植被光合作用相关的信息。定量估算SIF对陆地生态系统碳循环、植被生产力和干旱监测具有重要的意义。该文利用SCOPE模型构建了不同SR和SNR条件下的模拟数据集,并通过该模拟数据集评估了4种常用荧光反演方法的精度。

在SIF反演方法精度评估过程中,利用SCOPE和大气辐射传输模型MODTRAN模拟了30种不同SR和11种不同SNR条件下的SIF数据集。基于无噪声模拟数据的反演结果表明SFM和iFLD方法能够获得更准确的SIF结果,其RMSE分别为0.114 2 W/m²/μm/sr和0.1114 W/m²/μm/sr;3FLD方法亦能取得较准确的SIF结果,而FLD方法的精度较差,

具有明显的高估现象。基于不同 SR 和 SNR 下的反演结果表明, SFM 和 iFLD 方法亦能够得到准确的 SIF 结果, 其反演精度明显优于 3FLD 和 FLD 方法; 此外, 随着仪器 SR 和 SNR 的提高其反演精度也随着提高, 但 iFLD 方法易受 SNR 的影响。基于野外测量数据同样表明 SFM 和 iFLD 方法能够获得较为准确的 SIF 值。因此, 对于光谱分辨率优于 1 nm 的光谱测量仪器优先选择 SFM 方法。

参考文献

- [1] 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(14): E1327~E1333.
- [2] Sun Y, Frankenberg C, Jung M, et al. 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*, 2018, 209: 808~823.
- [3] 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.
- [4] Porcar-Castell A, Berry J A. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(15): 4065~4095.
- [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] Frankenberg C, Berry J. Solar induced chlorophyll fluorescence: origins, relation to photosynthesis and retrieval. Amsterdam: *Elsevier*, 2018, 143~162.
- [7] 章钊颖, 王松寒, 邱博, 等. 日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展. *遥感学报*, 2019, 23(1): 37~52.
- [8] 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(4): 144339.
- [9] 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(7253): 52~61.
- [10] Damm A, Erler A, Hillen W, et al. Modeling the impact of spectral sensor configurations on the FLD retrieval accuracy of sun-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1882~1892.
- [11] Meroni M, Busetto L, Colombo R, et al. Performance of Spectral Fitting Methods for vegetation fluorescence quantification. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 363~374.
- [12] Zhou X, Liu Z, Xu S, et al. An automated comparative observation system for sun-induced chlorophyll fluorescence of vegetation canopies. *Sensors*, 2016, 16(6): 775.
- [13] 张立福, 王思恒, 黄长平. 太阳诱导叶绿素荧光的卫星遥感反演方法. *遥感学报*, 2018, 22(1): 1~12.
- [14] Frankenberg C, Köhler P, Magney T S, et al. The Chlorophyll Fluorescence Imaging Spectrometer(CFIS), mapping far red fluorescence from aircraft. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 523~536.
- [15] Miao G, Guan K, Yang X, et al. Sun-induced chlorophyll fluorescence, photosynthesis, and light use efficiency of a soybean field from seasonally continuous measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(2): 610~623.
- [16] Yang K, Ryu Y, Dechant B, et al. Sun-induced chlorophyll fluorescence is more strongly related to absorbed light than to photosynthesis at half-hourly resolution in a rice paddy. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216: 658~673.
- [17] Paul-Limoges E, Damm A, Hueni A, et al. Effect of environmental conditions on sun-induced fluorescence in a mixed forest and a cropland. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 310~323.
- [18] Van der Tol C, Verhoef W, Timmermans J, et al. An integrated model of soil - canopy spectral radiances, photosynthesis, fluorescence, temperature and energy balance. *Biogeosciences*, 2009, 6(12): 3109~3129.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Alonso L., Gomez Chova L., Vila Frances J., et al. Improved fraunhofer line discrimination method for vegetation



- fluorescence quantification. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 620~624.
- [22] 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.

Comparative analysis of four commonly used sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval methods

Ji Menghao^{1, 2}, Tang Bohui^{1, 2*}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [**Purpose**] Solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) is a novel vegetation parameter that can be used to monitor plant photosynthesis status and assess total primary productivity. The accuracy of the four commonly used SIF retrieval methods is compared and analyzed using simulation data and field measured data, which provides a theoretical basis for the selection of SIF retrieval methods for field measurement instruments. [**Method**] The SCOPE (Soil-Canopy-Observation of Photosynthesis and the Energy Balance) model was selected to simulate the simulated data sets under different vegetation biochemical and physical parameters. Analog dataset under different resolutions (SR) and different signal-to-noise ratio (SNR) were generated based on the data. Four commonly used SIF retrieval methods were selected to retrieve the SIF: Fraunhofer Line Discrimination (FLD), 3FLD (modified FLD), iFLD (improved FLD) and SFM (Spectral Fitting Method) methods. [**Result**] The retrieval results based on the simulated data show that the SFM and iFLD methods can obtain more accurate SIF results with root mean square error (RMSE) of $0.1142 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ and $0.1114 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$, respectively. The 3FLD method can also obtain accurate SIF results with an RMSE of $0.2014 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$. The accuracy of the FLD method is poor, and its RSME is greater than $0.5 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$. Under high SR and SNR conditions, SFM and iFLD algorithms are significantly better than 3FLD and FLD algorithms, but with the decrease of SR and SNR, the accuracy of the four retrieval methods is also reduced, and the iFLD method is most affected by SNR. [**Conclusion**] The SFM and iFLD methods can obtain more accurate SIF results, and the retrieval accuracy increases with the improvement of SR and SNR, but the iFLD method is susceptible to SNR. Therefore, the SFM method is preferred for spectrometric instruments with spectral resolutions below 1 nm.

Key words: Sun-induced chlorophyll fluorescence (SIF); retrieval methods; Soil-Canopy-Observation of Photosynthesis and the Energy Balance (SCOPE); Fraunhofer Line Discrimination (FLD); Spectral Fitting Method (SFM)