

百种中国杰出学术期刊

遥感学报

Yaogan Xuebao

第 24 卷 第 8 期 2020 年 8 月

目 次

研究进展

海洋一号 C 星光学载荷对海面溢油的识别能力分析 沈亚峰, 刘建强, 丁静, 焦俊男, 孙绍杰, 陆应诚 (933)

综述

日光诱导叶绿素荧光辐射传输模型研究进展 詹春晖, 章钊颖, 张永光 (945)

地表反射率地形校正物理模型与效果评价方法研究进展
..... 林兴稳, 闻建光, 吴胜标, 郝大磊, 肖青, 柳钦火 (958)

博士论坛

遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展 张圆,
贾贞贞, 刘绍民, 徐自为, 徐同仁, 姚云军, 马燕飞, 宋立生, 李相, 胡晓, 王泽宇, 郭枝虾, 周纪 (975)

联合局部二值模式的 CNN 高光谱图像分类 魏祥坡, 余旭初, 张鹏强, 职露, 杨帆 (1000)

技术方法

ASTER GDEM V2 的南极冰川高程误差校正及精度分析
..... 陈昊楠, 许诗枫, 黄艳, 王淑杰, 舒松, 余柏菡, 吴健平 (1010)

风云二号多通道卫星数据对流单体检测 刘佳, 罗向阳 (1023)

遥感应用

FY-3B/MWRI 与 GCOM-W1/AMSR-2 亮温数据在北极地区的交叉定标
..... 唐晓彤, 陈海花, 管磊, 李乐乐 (1032)

泛北极地区多年冻土活动层厚度演变 蔡红艳, 韩冬锐, 杨林生, 陈慕琳, 杨小唤 (1045)

本期责任编辑: 李薇

《遥感学报》网络版: www.jors.cn

《遥感学报》微信公众号及官网



订阅号



官网

JOURNAL OF REMOTE SENSING (Chinese)

(Vol. 24 No.8 August, 2020)

CONTENTS

Research Progress

HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea
..... *SHEN Yafeng, LIU Jianqiang, DING Jing, JIAO Junnan, SUN Shaojie, LU Yingcheng* (944)

Review

Recent advances in the radiative transfer models of sun-induced chlorophyll fluorescence
..... *ZHAN Chunhui, ZHANG Zhaoying, ZHANG Yongguang* (957)

Advances in topographic correction methods for optical remote sensing imageries
..... *LIN Xingwen, WEN Jianguang, WU Shengbiao, HAO Dalei, XIAO Qing, LIU Qinhuo* (974)

Doctor's Voice

Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration
..... *ZHANG Yuan, JIA Zhenzhen, LIU Shaomin, XU Ziwei, XU Tongren,*
YAO Yunjun, MA Yanfei, SONG Lisheng, LI Xiang, HU Xiao, WANG Zeyu, GUO Zhixia, ZHOU Ji (998)

CNN with local binary patterns for hyperspectral images classification
..... *WEI Xiangpo, YU Xuchu, ZHANG Pengqiang, ZHI Lu, YANG Fan* (1008)

Technology and Methodology

Vertical accuracy correction and analysis of ASTER GDEM V2 over Antarctic Glacier
..... *CHEN Haonan, XU Shifeng, HUANG Yan, WANG Shujie, SHU Song, YU Bailang, WU Jianping* (1022)

Detection of convective cells using multi-channel satellite data from FY-2 *LIU Jia, LUO Xiangyang* (1031)

Remote Sensing Applications

Intercalibration of FY-3B/MWRI and GCOM-W1/AMSR-2 brightness temperature over the Arctic
..... *TANG Xiaotong, CHEN Haihua, GUAN Lei, LI Lele* (1044)

Spatiotemporal change in permafrost active layer thickness in the Pan-Arctic region
..... *CAI Hongyan, HAN Dongrui, YANG Linsheng, CHEN Mulin, YANG Xiaohuan* (1057)

日光诱导叶绿素荧光辐射传输模型研究进展

詹春晖^{1,2}, 章钊颖^{1,2}, 张永光^{1,3,4}

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. 自然资源部 国土卫星遥感应用重点实验室, 南京 210023;

4. 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)是指示植被光合作用过程的无损探针,在不同时空尺度上对植被进行SIF的观测可以反映植被的实际光合作用及生理状态。然而在观测、分析和利用SIF的过程中,仍存在很多不确定因素。SIF的发生具有较为复杂的机理,从机理出发理解SIF与植被结构的相互作用,并分析影响SIF激发的主要因素将有助于更好地理解SIF与光合作用以及生物量的内在联系。因此,植被SIF辐射传输模型在解释和利用SIF遥感信号方面具有重要的作用。植被SIF信号相对较弱,且受环境、植被和生理等多种因子的影响,需要量化描述,这为SIF辐射传输模型的构建带来挑战。近年来,大量学者已经发展一系列SIF辐射传输模型,为SIF遥感的发展提供了坚实的理论基础。本文回顾了叶片、冠层和生态系统尺度的SIF模型,从建模机理出发,对比模型优劣势,并对未来SIF模型的发展前景进行了展望。

关键词: 日光诱导叶绿素荧光, 叶绿素荧光模型, 辐射传输模型, 植被结构, 多次散射

引用格式: 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

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(Chinese)*, 24(8): 945-957[DOI:10.11834/jrs.20209379]

1 引言

日光诱导叶绿素荧光 SIF (Solar-Induced chlorophyll Fluorescence) 由植物中的光系统 I 和光系统 II 激发而生。作为植物色素捕获的光能量去激发的方式之一, SIF 与光合作用和热耗散互为竞争关系 (Krause 和 Weis, 1991)。相较于大部分基于反射率的植被指数, SIF 可以更加直接地指示植物的光合作用能力。研究表明 SIF 与总初级生产力 GPP (Gross Primary Production) 密切相关 (Frankenberg 等, 2011; Porcar-Castell 等, 2014)。随着高光谱传感器的发展和欧空局荧光探测项目 FLEX (Fluorescence Explorer) 的推进, 近十年研究人员已经分别从近地面、航空和卫星平台获取的遥感数据中成功反演了 SIF (Moya 等, 2004; Joiner 等, 2011; Frankenberg 等, 2011, 2014; Köhler 等,

2018)。章钊颖等 (2019) 介绍了 SIF 遥感反演现状及其在碳循环应用方面的进展, 张立福等 (2018) 回顾了 SIF 反演算法。SIF 的发射波段在 650—800 nm, 且有两个发射峰, 分别在红光波段 (685 nm) 和远红光波段 (740 nm) 附近, 其中前者主要由光系统 II 产生, 后者由光系统 I 和光系统 II 共同产生 (Miller 等, 2005; Van Wittenberghe 等, 2013)。研究表明 SIF 的产生过程受多重因素影响, 包括光化学和非光化学猝灭过程, 叶片和冠层的光学属性等, 而这些因子又受多变的生物环境和大气因素影响 (Lichtenthaler 和 Rinderle, 1988; Malenovsky 等, 2009; Rascher 等, 2009; Porcar-Castell 等, 2014)。在叶片、冠层和生态系统尺度上, SIF 对环境 and 生理因素的响应较为复杂, 因此需要更详细地描述入射光与植被的交互过程, 尤其在 SIF 的激发和发射波段描述植被叶片与光的相

收稿日期: 2019-10-08; 预印本: 2020-03-10

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2016YFA0600202);国家自然科学基金(编号:41671421);江苏省杰出青年基金(编号:BK20170018)

第一作者简介: 詹春晖, 1995年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为植被定量遥感、叶绿素荧光遥感。E-mail: zhanchunhui@smail.nju.edu.cn

通信作者简介: 张永光, 1980年生, 男, 教授, 研究方向为植被叶绿素荧光遥感和全球碳循环。E-mail: yongguang_zhang@nju.edu.cn

互作用。SIF观测技术与方法的提升以及植被辐射传输模型的发展,驱动了SIF与辐射传输模型的耦合。通过对不同尺度的SIF辐射传输模型构建和分析,可以区分各类因子对SIF和光合作用的影响程度和重要性,并可以从机理出发更好地解释和利用SIF遥感信号,增强对SIF与光合的机理联系的理解。进一步地,SIF辐射传输模型与陆面模式的结合促进了区域和全球尺度的光合过程研究。本文回顾了叶片、冠层和生态系统尺度的SIF辐射传输模型(图1),对比了不同SIF模型的建模理论、方法和适用条件等,并对SIF辐射传输模型的发展前景进行了展望。

2 叶片尺度SIF模型

光到达叶片后发生反射、透过和吸收等过程。叶片叶绿素分子所吸收的光合有效辐射,有一小部分以荧光的形式重新发射出去。叶绿素在可见光波段(400—700 nm)有较强的吸收作用,并且与SIF的发射波段(650—800 nm)有部分重合。因此发射的红光区SIF在逃离叶片过程中会被叶片内部叶绿素等色素重吸收,导致观测到的红光SIF值较低。随着叶绿素含量的升高,红光波段SIF的值较快达到饱和,之后会降低,而近红外波段的SIF饱和现象较弱。因此,在叶片尺度的SIF模型中需要准确描述这些过程(Mohammed等,2019)。由于叶片尺度的SIF与叶片反射率和透过率紧密相

关,与SIF相关的叶片尺度辐射传输模型大多建立在模拟叶片反射率和透过率的光学属性模型基础上。

2.1 基于比尔定律和K-M理论的荧光模型

叶片SIF模型的建立基于叶片光学属性模型。对叶片反射和透射属性的模拟可以建立在不同的辐射传输理论上。当叶片光学特性以吸收为主时,比尔定律(Beer-law)可以有效地模拟叶片辐射传输过程。应用比尔定律描述光线的传播时会忽略叶片内部多次散射的影响,光线在均匀介质中传播的强度按照指数函数形式衰减。Baret等(1988)用一种基于比尔定律的半经验模型模拟叶片光学特性。在此基础上,Ounis等(2001)基于比尔定律假设光线在叶片内部呈指数型衰减,模拟激光诱导荧光。为了解决光线在介质中的吸收和散射过程,Kubelka和Munk(1931)建立了两个方程来描述上行和下行辐射分量(K-M理论)。尽管K-M理论最初不包含荧光部分,Fukshansky和Kazarinova(1980)、Bonham(1986)和Shakespeare(2003)等已经将K-M理论延伸到包含荧光的计算。Rosema(1991)提出了基于K-M理论的荧光模型KMF(Kubelka-Munk Fluorescence Model)模型来模拟均匀介质中荧光的发射、吸收和散射过程

$$\frac{dF^+}{dx} = -kF^+ - sF^+ + sF^- + P/2 \quad (1)$$

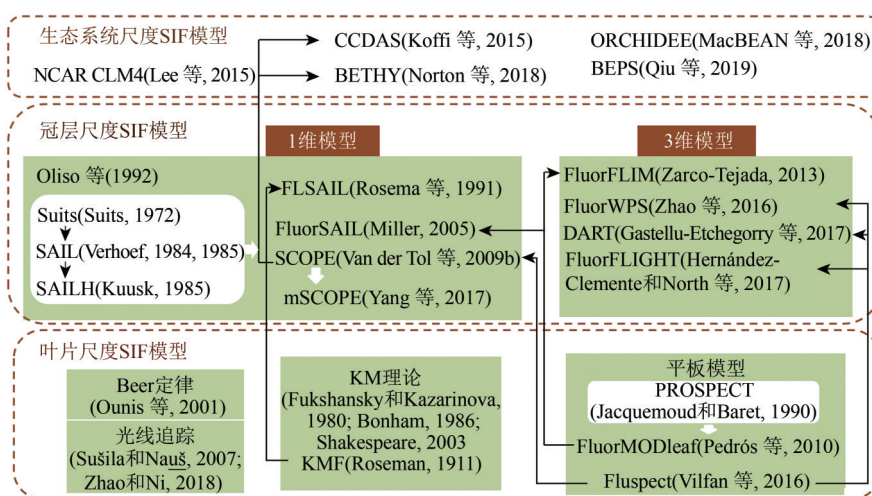


图1 SIF辐射传输模型发展总结

Fig.1 Summary of radiative transfer models of SIF (Relevant models that do not include SIF simulation are shown with a white background)

$$\frac{dF^-}{dx} = kF^- + sF^- - sF^+ - P/2 \quad (2)$$

式中， F^+ 、 F^- 分别表示上行和下行的荧光辐射通量密度 ($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$)， k 和 s 分别为K-M方程中的吸收和后向散射系数，利用倍增法可以求解 k 和 s 。 P 为介质发射的各向同性的荧光，向上和向下所发射的荧光各占1/2。

$$P = \phi \eta \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} k(E^+ + E^-) (\lambda/\lambda_{670}) d\lambda \quad (3)$$

式中，阐述了在 λ_2 （波段积分下限）和 λ_1 （波段积分上限）之间光子被吸收后所发射的荧光， λ 为波段， λ_{670} 为670 nm处波段， E^+ 和 E^- 分别为向上和向下激发光的辐射通量密度 ($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$)， ϕ 为荧光发射效率，取值为0.02—0.12， η 为描述荧光光谱分布的常量。

2.2 基于平板模型的荧光模型

叶片SIF模型FluorMODleaf (Pedrós等, 2015)和Fluspect (Vilfan等, 2016)模型都是基于平板模型发展而来。平板模型首次由Allen等(1969)提出，他把叶片看作具有朗伯表面的吸收体。该模型适用于细胞间隙较小的紧实叶片，如玉米叶片。随后Allen等(1970)改进了平板模型，将厚度为 D 的具有细胞间隙的叶片分为 N 个紧实的薄层，其中层数 N 与叶片内部结构相关。在计算每个薄层的反射率和透过率之后，通过叠加得到厚度为 D 的叶片反射率和透过率。目前应用最为广泛的叶片辐射传输模型PROSPECT模型(Jacquemoud和Baret, 1990)就是基于平板模型理论而建立的。相较于平板模型，PROSPECT模型将叶片分为最上层和其他 $N-1$ 层，其中最上层入射光角度为 α ，其他 $N-1$ 层假设入射光为各向同性。PROSPECT模型可以精确模拟阔叶在400—2500 nm波段的方向半球反射率和透过率。模型输入参数分为两个部分，分别为叶片结构参数和叶片生化参数。PROSPECT-5B模型(Feret等, 2008)在原模型的基础上调整了输入的生化参数种类，包含了叶绿素、类胡萝卜素、棕色素、水分和干物质。

在PROSPECT模型基础上发展的叶片SIF模型FluorMODleaf和Fluspect都沿用了PROSPECT模型的输入参数和输出的反射率和透过率。两个模型的主要差别在于荧光光子的模拟过程不同。FluorMODleaf模型中用分子在发射荧光光子之前停

留在激发态的时间来计算荧光的产量效率。而Fluspect模型将这一过程简化，将光合系统I和II的荧光产量效率 η_1 、 η_{II} 作为输入参数。其中 η_1 主要影响荧光在远红光区的峰值，而 η_{II} 主要影响荧光在红光区的峰值(Franck等, 2002)。表1列出了Fluspect和FluorMODleaf模型的主要输入参数和范围。

表1 Fluspect和FluorMODleaf模型主要输入参数

Table 1 Main input parameters of Fluspect and

FluorMODleaf

参数	符号	范围	标准值	单位
PROSPECT模型				
叶绿素含量	C_{ab}	0—100	40	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$
类胡萝卜素含量	C_{car}	0—30	5	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$
水分含量	C_w	0—0.04	0.009	cm
干物质含量	C_{dm}	0—0.02	0.012	g/cm^2
叶肉组织结构参数	N	1—4	1.5	—
衰老物质(棕色素)	C_s	0—0.6	0	fraction
Fluspect模型				
荧光产量效率(光系统I)	η_1	0—0.2	0.002	—
荧光产量效率(光系统II)	η_{II}	0—0.2	0.01	—
FluorMODleaf模型				
相对吸收截面比	σ_{II}/σ_1	1.0—2.4	1.0	—
荧光寿命(光系统I)	τ_1	0.034—0.1	0.035	ns
荧光寿命(光系统II)	τ_{II}	0.3—2.0	0.05	ns

基于平板模型，叶片可以被分为多个层。相较于简单的KMF模型假设光线的吸收和散射发生在介质中的各个部位，FluorMODleaf和Fluspect模型在叶片与空气接触的边界层模拟散射过程，在叶肉内部模拟吸收过程，这更能准确描述叶片内的荧光辐射传输过程。Pedrós等(2015)应用FluorMODleaf模型和KMF模型分析SIF对不同输入参数的敏感性时发现，KMF模型无法精确模拟红光波段SIF的重吸收现象。

2.3 基于蒙特卡洛光线追踪的荧光模型

蒙特卡洛光线追踪MCRT (Monte Carlo Ray Tracing)是一种统计方法，其模拟结果的精确性与所追踪的光子数目有关。基于该方法的SIF模型假设叶片为水平方向无限延伸，垂直方向厚度 D 的介质层，介质内部分子颗粒随机分布。光子入射到叶片后的初始路径由随机数和叶片光学属性而决定，叶片内部的光子与叶片内部分子颗粒发

生碰撞后被吸收, 或者依据特定的散射相函数散射。吸收的光子将成为荧光的发射源, 并且假设荧光的发射各向同性。发射后的荧光光子与普通光子传输路径一致。由叶片顶部发出的荧光光子为后向荧光, 叶片底部发出的荧光光子为前向荧光。当光子的能量小于既定阈值时, 该光子的传输过程结束。Sušila 和 Nauš (2007) 基于 MCRT 模型加入了 SIF 的模拟, 而 Zhao 和 Ni (2018) 同样基于蒙特卡洛方法建立了 SIF 的叶片辐射传输模型。他们通过调整模型输入参数使得该模型与 Fluspect 模型所模拟的叶片反射率与透过率近乎一致, 进而对比上述两个模型 SIF 的模拟结果, 发现两个模型模拟结果的差异主要体现在红光区域, Fluspect 模型在红光区域模拟的 SIF 的较高。

3 冠层尺度 SIF 模型

与叶片辐射传输过程相比, 光线在植被冠层内的传输过程中会进一步与冠层内的各组分发生碰撞, 然后被吸收或者散射。因此植被冠层结构如叶面积指数、叶倾角分布、叶片大小和聚集度指数等都会影响冠层上方所观测到的反射光和 SIF。因此准确模拟光线在植被冠层内的辐射传输过程对模拟整个冠层的 SIF 至关重要。冠层 SIF 模型需要准确模拟 SIF 在冠层内部的产生以及与冠层组分相互作用后的散射与重吸收过程。冠层 SIF 模型多是在冠层辐射传输模型的基础上结合叶片 SIF 模型而建立的 (Disney 等, 2000)。根据模型对植被冠层的不同描述和假设, 可以分为 1 维和 3 维冠层 SIF 模型。本节将分别介绍两种类型的冠层尺度 SIF 模型的发展和区别。

3.1 1 维模型

目前描述冠层 SIF 的 1 维模型大多基于 SAIL (Scattering of Arbitrarily Inclined Leaves) (Verhoef, 1984, 1985) 模型或在其基础上改进的 SAILH (Kuusk, 1994) 模型。1 维辐射传输模型假设植被冠层各向均一 (图 2 (a))。SAIL 模型用 4 个线性方程来描述冠层内部的辐射传输过程。模型中包含的主要参数为叶片透过率、叶片反射率、叶倾角分布函数 LIDF (Leaf Inclination Distribution Function)、叶面积指数 LAI (Leaf Area Index)、太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角。Kuusk (1994) 在 SAIL 模型基础上加入了连续植被冠层的

BRDF 热点效应模拟, 建立了 SAILH 模型。

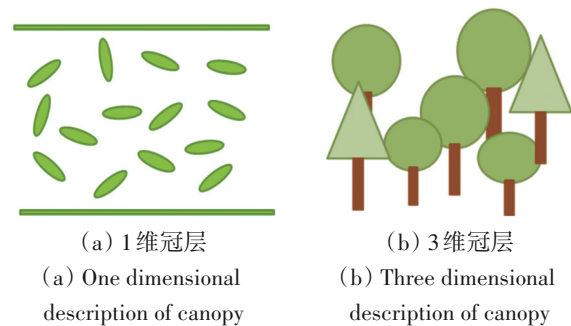


图2 植被冠层描述示意图

Fig.2 Description of vegetation canopies

Olioso 等 (1992) 结合了 SAIL 模型中的光线消减系数来模拟 SIF。模型中只考虑了直射光入射后激发的荧光, 没有模拟散射辐射激发荧光。观测方向的 SIF 分为 3 个部分: 直射光入射激发 SIF, 土壤反射 SIF, 土壤反射入射光后激发 SIF。模型中入射光基于比尔定律指数型衰减

$$I(L) = I_0 \cdot \exp\left(-\int_0^L k_c(L') dL'\right) \quad (4)$$

式中, k_c 为消减系数, 与叶片光学属性和植被冠层结构有关, I_0 为冠层上方的入射辐射 ($W/m^2/\mu m$), L 和 L' 为从冠层顶部开始累积的叶面积指数 (m^2/m^2)。在累积叶面积指数为 L 处的冠层发射的荧光为

$$dF(L) = \phi(L) K(L) I(L) dL \quad (5)$$

式中, $\phi(L)$ 为荧光发射效率, $K(L)$ 为吸收系数, 与冠层结构有关, $I(L)$ 为在累积叶面积指数为 L 处的辐照度。入射光激发的 SIF 在冠层中的传输过程类似于式 (4) 中入射光的衰减过程。模型假设叶绿素含量在冠层中也呈指数型衰减。该模型会低估散射部分的 SIF, 尤其是近红外波段的 SIF。

Rosema 等 (1991) 将 KMF 模型与 SAILH 模型结合建立了 FLSAIL 模型, 同时用倍增法求解替换了原来的解析解, 提高了模型模拟效率。但由于缺少大气辐射传输模型的耦合, FLSAIL 模型只用来模拟激光诱导的冠层荧光。Miller 等 (2005) 随后也在 SAIL 模型的基础上建立了 FluorSAIL 模型。该模型结合了大气辐射传输模型 MODTRAN4 (Berk 等, 1999), 为冠层辐射传输模型提供了辐射输入, 波段范围为 400—1000 nm, 光谱分辨率为 1 nm。FluorSAIL 模型的叶片输入参数来自于 FluorMODleaf 模型所输出的叶片反射率、透过率和描述荧光发射的两个矩阵, 最后模拟得到冠层尺度的 SIF。

同样基于SAIL模型建立的冠层SIF模型还有SCOPE(Soil Canopy Observation, Photochemistry and Energy fluxes)(van der Tol等, 2009)模型。SCOPE模型将辐射传输与能量平衡过程相结合, 模拟0.4—50 μm 波段范围的冠层反射光和SIF, 输入参数包括叶片光学和结构参数、植被冠层结构参数和微气象条件等。SCOPE模型中对于冠层结构的定义与SAIL模型一致, 即定义13个叶倾角、36个叶片方位角($5^\circ, 15^\circ, \dots, 355^\circ$), 冠层垂直方向分为60层。由于叶片对太阳光的截获取决于叶片相对于太阳的方向, 模型中将光照叶片分为 $60 \times 13 \times 36$ 个元素, 而阴影叶片只分为60个元素, 同时将土壤分为光照和阴影两部分。光照叶片所发射出的SIF可表达为

$$\pi L_{\text{ls}}^{\text{f}}(x, \lambda_{\text{f}}, \theta_1, \varphi_1) = \phi'_{\text{fs}}(x, \theta_1, \varphi_1) \cdot \int_{400}^{750} \left(\begin{aligned} & \mathbf{w}_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}, \theta_1, \varphi_1) E_{\text{sun}}(\lambda_{\text{e}}) + \\ & \mathbf{v}_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}, \theta_1, \varphi_1) E^{-}(x, \lambda_{\text{e}}) + \\ & \mathbf{v}'_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}, \theta_1, \varphi_1) E^{+}(x, \lambda_{\text{e}}) \end{aligned} \right) d\lambda_{\text{e}} \quad (6)$$

式中, θ_1 和 φ_1 分别为叶倾角和叶片方位角, x 为在冠层中的相对深度, 取值范围 $[-1, 0]$, λ_{e} 和 λ_{f} 分别为荧光的激发和发射波段, $\phi'_{\text{fs}}(x, \theta_1, \varphi_1)$ 为光照叶片荧光发射矩阵的修正因子, 决定SIF的波段分布, E_{sun} , E^{-} , E^{+} 分别为入射的太阳直射光, 天空向下和向上的散射光辐射通量密度($\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$)。其中 \mathbf{v}_{f} , \mathbf{v}'_{f} , \mathbf{w}_{f} 3个系数表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}, \theta_1, \varphi_1) &= \left| f_{\text{o}} \right| \frac{\mathbf{M}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}) + \mathbf{M}'(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}})}{2} + \\ & f_{\text{o}} \frac{\mathbf{M}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}) - \mathbf{M}'(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}})}{2} \cos \theta_1 \\ \mathbf{v}'_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}, \theta_1, \varphi_1) &= \left| f_{\text{o}} \right| \frac{\mathbf{M}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}) + \mathbf{M}'(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}})}{2} - \\ & f_{\text{o}} \frac{\mathbf{M}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}) - \mathbf{M}'(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}})}{2} \cos \theta_1 \\ \mathbf{w}_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}, \theta_1, \varphi_1) &= \left| f_{\text{s}} f_{\text{o}} \right| \frac{\mathbf{M}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}) + \mathbf{M}'(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}})}{2} + \\ & f_{\text{s}} f_{\text{o}} \frac{\mathbf{M}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}) - \mathbf{M}'(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}})}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{M}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}})$ 和 $\mathbf{M}'(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}})$ 分别为前向和后向荧光发射矩阵, f_{o} 和 f_{s} 分别为观测方向和光照方向叶面积投影因子。阴影叶片发射的SIF可以类似表示为

$$\pi L_{\text{id}}^{\text{f}}(x, \lambda_{\text{f}}) = \phi'_{\text{id}}(x) \cdot \int_{400}^{750} \left(\begin{aligned} & \mathbf{v}_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}) E^{-}(x, \lambda_{\text{e}}) + \\ & \mathbf{v}'_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}) E^{+}(x, \lambda_{\text{e}}) \end{aligned} \right) d\lambda_{\text{e}} \quad (8)$$

式中, $\phi'_{\text{id}}(x)$ 为阴影叶片荧光发射矩阵的修正因子, E^{-} , E^{+} 分别为天空向下和向上的散射光辐射通量密度。 $\mathbf{v}_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}})$ 和 $\mathbf{v}'_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}})$ 分别为荧光散射系数, 为叶片所有方向散射系数的平均值:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}) &= \frac{1}{36} \sum_{13\theta_1} f(\theta_1) \sum_{36\varphi_1} \mathbf{v}_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}, \theta_1, \varphi_1) \\ \mathbf{v}'_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}) &= \frac{1}{36} \sum_{13\theta_1} f(\theta_1) \sum_{36\varphi_1} \mathbf{v}'_{\text{f}}(\lambda_{\text{e}}, \lambda_{\text{f}}, \theta_1, \varphi_1) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $f(\theta_1)$ 为叶倾角分布函数。因此最后冠层上方得到的荧光辐亮度为光照和阴影部分SIF的总和:

$$\pi L_{\text{f}}^{\text{TOC}} = \frac{L}{60} \sum_{60x} \left(\begin{aligned} & \frac{P_{\text{so}}(x)}{36} \sum_{13\theta_1} f(\theta_1) \sum_{36\varphi_1} \pi L_{\text{ls}}^{\text{f}}(x, \lambda_{\text{f}}, \theta_1, \varphi_1) + \\ & [P_{\text{o}}(x) - P_{\text{so}}(x)] \pi L_{\text{id}}^{\text{f}}(x, \lambda_{\text{f}}) \end{aligned} \right) \quad (10)$$

式中, $L_{\text{f}}^{\text{TOC}}$ 为冠层顶部荧光辐亮度, L 为叶面积指数, P_{so} 和 P_{o} 分别为观测到光照叶片和所有叶片的概率, 下标ls和ld分别代表光照和阴影叶片。

SCOPE模型主要分为4个部分:(1) RTMo模块: 计算太阳和天空入射辐射, 并基于SAIL模型模拟植被冠层的辐亮度、净辐射和光合有效辐射;(2) RTMt模块: 通过能量平衡模型输出的植被和土壤温度模拟热辐射;(3) 能量平衡模型: 以RTMo和RTMt模块的输出结果作为输入参数, 计算模拟场景的显热、潜热和土壤热通量, 同时模拟叶片的光合作用和叶片表层温度等;(4) RTMf模块: 采用类似于SAIL模型的方法, 通过输入Fluspect模型的结果和冠层的光合吸收有效辐射模拟SIF在冠层内部的辐射传输。

然而植被冠层叶片属性的垂直分布差异会影响冠层内的辐射收支和SIF在冠层内的相互作用。Yang等(2017)在SCOPE模型的基础上加入了叶片属性的垂直变化, 建立了mSCOPE模型。该模型依旧假设植被冠层水平方向各向均一, 在垂直方向最多可分60层。将mSCOPE模型与SCOPE模型的模拟结果与实测数据对比发现, mSCOPE模型能够更准确地模拟衰老期玉米冠层顶部的反射率和SIF。

3.2 3维模型

由于假设植被冠层水平方向各向均一, 1维冠层SIF模型多适用于农田、草地等简单植被类型的

模拟。而对于森林等较为复杂的植被类型，冠层结构对SIF辐射传输的影响不可忽略，因此需要建立3维场景（图2（b）），模拟非均质结构植被冠层的SIF。在3维辐射传输模型中，会对植被冠层进行不同程度的简化，通常将植被离散为连续的面元或体元，对不同的面元或体元赋予不同的光学属性，使其更贴近于真实植被的表达。3维模型多采用光线追踪的方法来更准确地描述植被冠层内的辐射传输过程。蒙特卡洛光线追踪方法分为前向追踪和逆向追踪：前向追踪从光源出发，追踪光子从光源到观测位置的路径，直到光子散射出场景或者被植被冠层所吸收时停止；逆向追踪从定义的观测位置出发，逆向追踪光子返回光源的过程，求得进入场景的辐射值，运行效率高于前向追踪模型。

目前已有多个模型可进行3维SIF的模拟。Zarco-Tejada等（2013）结合了FluorSAIL和FLIM（Forest Light Interaction Model）（Rosema等，1992）模型，建立了描述非均质植被冠层的SIF模型FluorFLIM。Zhao等（2015a）在WPS模型的前向追踪的基础上加入了“光子扩散”的方法（Thompson和Goel，1998），仅追踪对观测方向有贡献的光子，削减了为达到精度所需的光子数量，提高了计算效率。在WPS模型的基础上，FluorWPS（The Fluorescence model with Weighted Photon Spread method）模型（Zhao等，2016）耦合了Fluspect模

型模拟冠层SIF，其中波段范围为400—1000 nm，光谱分辨率为1 nm，在400—750 nm波段吸收的光子进一步激发的后向SIF表示为

$$Qf_{\text{back}}(\lambda_f) = \int_{400}^{750} \left((Q_{\text{in}}(\lambda_e) + Qf_{\text{in}}(\lambda_e)) \cdot M_{\text{PSI}}(\lambda_e, \lambda_f) + (Q_{\text{in}}(\lambda_e) + Qf_{\text{in}}(\lambda_e)) \cdot \varphi_f \cdot M_{\text{PSII}}(\lambda_e, \lambda_f) \right) d\lambda_e \quad (11)$$

式中， $Q_{\text{in}}(\lambda_e)$ 和 $Qf_{\text{in}}(\lambda_e)$ 为入射的非荧光和荧光光子，单位为 $\text{W}/\mu\text{m}$ ， λ_e 和 λ_f 分别为SIF的激发和发射波段， M_{PSI} 和 M_{PSII} 分别为Fluspect模型计算得到的光系统I和光系统II的荧光发射矩阵， φ_f 为校正系数，与荧光产量效率有关，主要取决于入射光的辐射强度。冠层上方观测到的SIF表示为

$$L_f^s(\lambda_f) = \frac{\sum Qf_s(\lambda_f)}{\pi S_{\text{top}} \cdot \cos\theta_o} \quad (12)$$

式中， θ_o 为观测天顶角， S_{top} 为冠层上方平面的面积（ m^2 ）， $Qf_s(\lambda_f)$ 为能到达传感器的叶片发射的SIF（ $\text{W}/\mu\text{m}$ ）。最终得到的SIF分为两部分，一部分由直接发射出的SIF和单次散射SIF组成，另一部分由多次散射SIF和再次激发的SIF所组成。

另一著名的3维辐射传输模型DART（Discrete Anisotropic Radiative Transfer；Gastellu-Etchegorry等，1996）模型目前也耦合了SIF模块，可进行3维SIF的模拟（Gastellu-Etchegorry等，2017）（图3）。

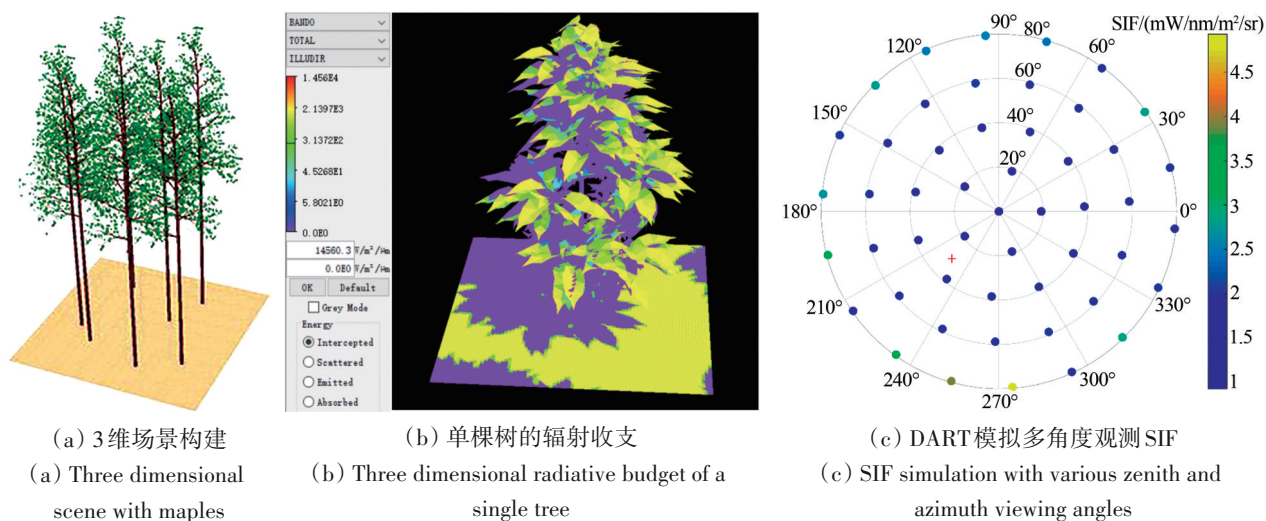


图3 DART模型模拟3维辐射收支和多角度SIF

Fig.3 Simulation of radiative budget and SIF with multiple viewing angles by DART

DART模型将3维场景离散为一系列空间相邻的体元。场景在x、y、z等3个方向相互独立，在垂直方向分异较大，水平方向较为均匀的场景中，可单独增加z轴方向的体元密度，由此节省了计算机内存需求和计算时间。3维场景中包括具有地形的植被、水体、土壤、建筑物等多种元素，由具有不同属性的体元或者面元组成。在计算场景内部辐射传输之前，DART模型根据光学特性和结构参数（如叶绿素含量、LAI等）计算不同类型体元或面元的散射函数，之后通过大气辐射传输模型模拟大气底部（BOA）辐射通量作为场景的入射光。DART模型基于Flux-tracking的方法，通过多次迭代计算整个3维场景的辐射收支。第一次迭代追踪直射光到达场景内部后的辐射分布，第二次迭代追踪散射光的辐射传输，同时模拟单次散射过程，通过多次迭代模拟场景内多次散射过程。DART模型耦合了Fluspect模型模拟叶片前向和后向SIF，并通过同样的辐射传输方法追踪冠层内部SIF，最后得到冠层上方大气底部（BOA）和大气顶部（TOA）的SIF。由于DART模型没有耦合光合作用模型，只能根据先验知识或其他独立的光合作用模型给定荧光量子产量效率。通过模拟连续一定时间间隔冠层内部的瞬时辐射，可以区分阴叶和阳叶，从而得到冠层内阴叶和阳叶SIF的3维分布。用户可以在DART模型的GUI界面中自定义输入参数，建立模拟场景。模型首先运行Direction模块，定义光线追踪方向，之后运行Maket模块，定义场景的维度和元素，然后运行Phase模块模拟元素的结构和光学属性（反射、散射、透射等）。以上所有模块运行结果均保存在xml文件中，最后运行Dart模拟辐射传输过程。

Hernández-Clemente等（2017）在Fluspect模型和FLIGHT模型（North, 1996）基础上开发了FluorFLIGHT 3维SIF模型。该模型通过对不同结构植被冠层SIF的模拟，解释了复杂植被冠层的光照/阴影像元、冠层结构和覆盖度对橡树林SIF的影响。其中FLIGHT模型的输入参数（表2）来自野外测量或者激光雷达数据LiDAR（Light Detection And Ranging）的反演（Bye等, 2017）。该模型将森林结构简化为一系列的几何单元，如椭圆、圆锥等。冠层内叶片的分布由LAI和LIDF决定。类似于FLIGHT模型中对场景中面元（如叶

片等）辐射的计算，FluorFLIGHT模型中对于某一冠层组分（C）的SIF计算公式如下

$$F_c(\lambda) = \sum_{k=400}^{750} (I_0(k) \gamma_F(\Omega_0 \rightarrow \Omega) P_0 + \frac{1}{m} \sum_{\Omega_m} I_m(k) (\Omega_m) \gamma_F(\Omega_m \rightarrow \Omega)) \quad (13)$$

式中，SIF激发光波段为400—750 nm， I_0 为直射光（ $W/m^2/\mu m$ ）， I_m 为来自 Ω_m 方向的散射光（ $W/m^2/\mu m$ ）， Ω_0 为太阳光入射方向向量， Ω 为观测方向向量， m 代表多次散射的次数， λ 为荧光发射波段， k 为荧光激发波段。其中 γ_F 可表示为

$$\gamma_F(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega) = \begin{cases} \pi^{-1} Mb[k, \lambda] |\Omega \cdot \Omega_L|, (\Omega \cdot \Omega_L)(\Omega' \cdot \Omega_L) < 0 \\ \pi^{-1} Mf[k, \lambda] |\Omega \cdot \Omega_L|, (\Omega \cdot \Omega_L)(\Omega' \cdot \Omega_L) > 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中， Mb 、 Mf 分别为光系统I和光系统II的后向和前向荧光发射矩阵之和， Ω_L 为叶片的法向量， Ω' 为光子发射的方向向量。

表2 FLIGHT模型输入参数
Table 2 Input parameters of FLIGHT

参数	符号	最小值	最大值	单位
叶面积指数	L	2.0	6.0	m^2/m^2
一级分支最低高度	H_{\min}	0.0	16.0	m
一级分支最高高度	H_{\max}	0.0	17.0	m
植被覆盖度	F_C	20	80	%
地面倾角	S_y	0	20	(°)
树冠水平半径	E_{xy}	2.0	4.0	m
树冠垂直半径	E_z	2.0	6.0	m

3维冠层尺度SIF模型的发展使得对模拟单棵树SIF的3维分布成为可能，并可以为监测森林生理状态（如胁迫监测）提供依据和判断。然而相较于1维模型，3维模型需要更多的输入参数，且运行速度相对较慢，因此在大场景中的应用会受限。另外，3维模型的反演过程较为复杂，具有挑战性。

4 生态系统尺度SIF模型

植物通过光合作用固定大气中的 CO_2 是建立陆地生态系统碳循环与大气碳库的重要纽带。而在全球气候变暖背景下，气候变化对不同生态系统的影响是目前全球碳循环研究的前沿和热点问题。近年来，遥感技术的发展使得全球尺度SIF的反演

成为可能 (Joiner等, 2013; Frankenberg等, 2014; Wolanin等, 2015)。很多研究也表明SIF与总初级生产力(GPP)有密切的相关关系(Frankenberg等, 2011; Guanter等, 2014)。因此SIF遥感为陆地生态系统GPP估算提供了新的思路和方法。在陆面模式中耦合SIF模型, 对于降低碳循环模拟的不确定性, 预测生态系统对全球气候变化的响应具有重要的意义。

SCOPE模型是较早发展的SIF与光合作用耦合模型, 但该模型的模型结构较为复杂, 计算量较大, 因此SCOPE模型目前在站点尺度对SIF的模拟中应用较多。最近一些研究已成功将SCOPE模型与陆面模式耦合。BETHY (Biosphere Energy Transfer Hydrology; Knorr, 2000) 是基于过程的陆面模式, 是碳循环数据同化系统CCDAS (Carbon Cycle Data Assimilation System; Rayner等, 2005) 的核心部分, 基于能量和水分平衡模拟碳同化以及植物和土壤的呼吸。BETHY主要由以下4个模块组成: (1) 能量和水平衡; (2) 光合作用; (3) 植被物候; (4) 碳平衡。该模型可以描述13种植物功能类型的叶片生长和其他生理过程。通过将BETHY模型中的冠层辐射传输和光合作用模型用SCOPE模型中相应模块的替代, 使得SIF在碳同化系统中的应用成为可能, 并显著减小了模型中GPP估算的不确定性(Koffi等, 2015; Norton等, 2018)。

NCAR CLM4 (National Center for Atmospheric Research Community Land Model version 4; Lawrence等, 2011) 陆面模式用来模拟陆地表面和大气之间的 CO_2 , 水分和能量的交换。该模型通过以下公式实现与SIF的耦合(Lee等, 2015)

$$\text{SIF} = \text{APAR} \times \phi_f \quad (15)$$

式中, APAR为光合有效辐射, 由陆面模式中的辐射传输方程得到; ϕ_f 为荧光产量效率, 即单位吸收光子所产出的荧光光子数量(van der Tol等, 2014)。SIF模型与NCAR CLM4模型的耦合使得模拟全球尺度的SIF成为可能, 且模拟的SIF与GOSAT (Greenhouse gas Observing Satellite) 遥感观测所得到的SIF表现出较为一致的时空分布特征。

Macbean等(2018)基于SIF与GPP之间线性关系的假设, 将GOME-2 (Global Ozone Monitoring

Experiment-2) SIF同化到ORCHIDEE (ORganizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems; Krinner等, 2005) 陆面模式中, 提高了GPP的模拟精度。此外, Qiu等(2019)构建了适用于不同生态系统类型的SIF多次散射高效模拟方法, 将冠层上方的SIF表示为光照和阴影部分所贡献的SIF之和。光照和阴影部分SIF分别表示为

$$\begin{aligned} \text{SIF}_{\text{sun}} &= \alpha_{\text{sun}} \text{SIF}_{\text{e_sun}} + \beta_{\text{sun}} \text{SIF}_{\text{e_sun}} \\ \text{SIF}_{\text{shad}} &= \alpha_{\text{shad}} \text{SIF}_{\text{e_shad}} + \beta_{\text{shad}} \text{SIF}_{\text{e_shad}} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\text{SIF}_{\text{e_sun}}$ 和 $\text{SIF}_{\text{e_shad}}$ 分别为光照和阴影部分叶片发射的SIF ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), α_{sun} 和 β_{sun} 分别为由阳叶发射SIF的消减和散射系数, α_{shad} 和 β_{shad} 分别为由阴叶发射SIF的消减和散射系数, 表示为

$$\alpha_{\text{sun/shad}} = \exp\left(-\frac{G(\theta)\Omega\text{LAI}_{\text{sun/shad}}}{\cos\theta}\right) \quad (17)$$

$$\beta_{\text{sun/shad}} = \rho\Omega(1.1 - 0.1\text{LAI}_{\text{sun/shad}})\exp(-\cos\theta)$$

式中, θ 为太阳天顶角, Ω 为聚集度指数, LAI为叶面积指数, $G(\theta)$ 为与叶片几何分布有关的函数, ρ 为叶片反射率。耦合该方法的BEPS (Boreal Ecosystem Productivity Simulator; Liu等, 1997; Chen等, 1999) 模式较好地模拟了SIF的全球分布特征, 并利用该模型检验了BEPS模式中叶片和冠层尺度的SIF与GPP之间的关系。

5 结 语

SIF可以作为指示植被光合作用的有效无损探针(Grace等, 2007; Meroni等, 2010), 并可以提高GPP的估算精度(Frankenberg等, 2011; Guanter等, 2014)。有效地模拟叶片、冠层、生态系统尺度的SIF可以更好地理解SIF的产生机理, 以及SIF辐射传输过程中与植被不同组分的相互作用关系。本文从SIF的建模机理出发, 介绍了不同荧光模型之间的相关性以及适用范围, 并做以下几点总结:

(1) SIF建模方法总结。叶片尺度SIF模型的建立基于叶片辐射传输模型, 从基于简单的比尔定律发展为基于K-M理论, 进一步在平板模型的基础上加入SIF的模拟, 提高了对叶片SIF的模拟精度。冠层尺度SIF模型在冠层辐射传输模型的基础上耦合叶片SIF模型, 将叶片SIF模型输出的叶片光学属性和荧光发射矩阵(激发-发射)作为冠层模型的输入。目前的植被冠层SIF模型分为1维和3维模型, 1维模型(如SCOPE模型)假设

冠层各向均一,在水平方向上无限延伸,适用于覆盖度较高且冠层结构简单的植被(如草地、农田等)。而对于空间异质性较高的植被(如森林),1维辐射传输模型难以准确模拟SIF在冠层内部的辐射传输过程。DART、FluorWPS、FluorFLIGHT等3维SIF模型应用光线追踪方法模拟冠层内部的辐射传输,适用于森林等非均质结构SIF的模拟。但这类模型计算量较大,在处理复杂场景时耗时较长。陆地模式可以模拟区域和全球尺度复杂非均质地表的热量和水气交换过程等,进一步估算陆地生态系统的GPP,将SIF与陆面模式耦合可以提高陆地生态系统GPP的估算精度。

(2) 实测数据对于模型的重要性。1) 实测数据作为模型输入:不同尺度SIF模型中的输入参数,如叶片生化参数(叶绿素浓度、叶片干物质含量等)、冠层结构参数(叶面积指数、冠层覆盖度等)等有些可以选择默认值,但当需要准确模拟特定叶片或场景时,野外实地测量数据将成为模型模拟必不可少的输入。2) 实测数据为模型验证提供支持:RAMI(The RAdiative transfer Model Intercomparison)曾开展辐射模型交叉验证的实验(Widłowski等,2015)。除了模型之间的对比,将实测数据与模型结果对比是较为可信的模型验证方式。野外观测与遥感影像提取的SIF为模型的验证提供了数据支撑。叶片和冠层尺度的SIF可以从辐亮度中根据特定的算法提取出来,如光谱拟合法(Spectral Fitting Method, SFM; Meroni等,2010)等,为模型验证提供了更多实测数据。同时观测技术的提升以及观测仪器空间和光谱分辨率的提高为模型的验证提供了更为丰富的实测数据。Pinto等(2017)在植被冠层上方安装了高光谱相机,得到了可以区分不同叶片的SIF图像,为模型的验证提供新的方法。

(3) SIF的重吸收和散射研究。SIF在远红光波段(740 nm附近)多次散射较为明显,在红光波段(685 nm附近)重吸收过程占主导地位(Porcar-Castell等,2014)。由于冠层结构的影响,叶片和冠层尺度SIF在红光和远红光波段的比值会有差异(Cendrero-Mateo等,2015),因此由叶片升尺度到冠层的过程,不仅是简单的尺度变换,还要考虑SIF与冠层各组分相互作用发生的散射和重吸收过程。van der Tol等(2019)在Fluspect模型和SCOPE模型中加入了SIF的散射的模拟,得到

的冠层SIF分为直射光激发SIF、散射光激发SIF和多次散射SIF共3个部分。与实测数据对比发现,加入散射后模型精度有所提高。在3维模型中,光线追踪的方法使得SIF的多次散射过程得到更准确的模拟。

随着SIF遥感产品的发展,野外SIF观测数据的丰富,以及对SIF的产生机理的进一步理解,SIF模型在以下几个方面具有广阔的发展前景:

(1) 模型描述:在叶片尺度,受到广泛应用的Fluspect模型并未考虑叶片内色素不均匀分布的情况,未来叶片SIF模型的发展需要准确地模拟叶片的结构和属性。对于3维辐射传输模型,更准确地描述场景信息是未来模型的发展趋势。LiDAR点云数据可以较详细地记录冠层结构信息。Liu等(2019)将地基激光雷达扫描得到的树林场景信息通过对树干和叶片的重建,与DART模型相结合模拟冠层3维SIF分布。

(2) 模型反演:通过获取地物光谱数据和SIF来反演植被结构和生理生化参数具有重要意义,然而辐射传输模型的反演过程较为复杂且反演效率低,对于3维辐射传输模型来说,由于场景相较于1维辐射传输模型更加复杂,增加了模型反演的难度。将辐射传输模型与机器学习结合可以为模型反演提供新的解决思路和机遇。

参考文献(References)

- Allen W A, Gausman H W and Richardson A J. 1970. Mean effective optical constants of cotton leaves. *Journal of the Optical Society of America*, 60(4): 542-547 [DOI: 10.1364/JOSA.60.000542]
- Allen W A, Gausman H W, Richardson A J and Thomas J R. 1969. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf. *Journal of the Optical Society of America*, 59(10): 1376-1379 [DOI: 10.1364/JOSA.59.001376]
- Baret F, Andrieu B and Guyot G. 1988. A simple model for leaf optical properties in visible and near-infrared: application to the analysis of spectral shifts determinism//Lichtenthaler H K, ed. *Applications of Chlorophyll Fluorescence in Photosynthesis Research, Stress Physiology, Hydrobiology and Remote Sensing: An introduction to the Various Fields of Applications of the in vivo Chlorophyll Fluorescence Also Including the Proceedings of the First International Chlorophyll Fluorescence Symposium Held in the Physikzentrum*. Dordrecht: Springer: 345-351 [DOI: 10.1007/978-94-009-2823-7_43]
- Berk A, Anderson G P, Bernstein L S, Acharya P K, Dothe H, Matthew M W, Adler-Golden S M, Chetwynd Jr J H, Richtsmeier S C, Pukall B, Allred C L, Jeong L S and Hoke M L. 1999. MODTRAN4

- radiative transfer modeling for atmospheric correction//Proceedings of the SPIE 3756, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III. Denver, CO, United States: SPIE [DOI: 10.1117/12.366388]
- Bonham J S. 1986. Fluorescence and Kubelka-Munk theory. *Color Research and Application*, 11(3): 223-230 [DOI: 10.1002/col.5080110310]
- Bye I J, North P R J, Los S O, Kljun N, Rosette J A B, Hopkinson C, Chasmer L and Mahoney C. 2017. Estimating forest canopy parameters from satellite waveform LiDAR by inversion of the FLIGHT three-dimensional radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 188: 177-189 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.048]
- Cendrero-Mateo M P, Carmo-Silva A E, Porcar-Castell A, Hamerlynck E P, Papuga S A and Moran M S. 2015. Dynamic response of plant chlorophyll fluorescence to light, water and nutrient availability. *Functional Plant Biology*, 42(8): 746-757 [DOI: 10.1071/FP15002]
- Chen J M, Liu J, Cihlar J and Goulden M L. 1999. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Ecological Modelling* 124(2): 99-119. [DOI: 10.1016/S0304-3800(99)00156-8].
- Disney M I, Lewis P and North P R J. 2000. Monte Carlo ray tracing in optical canopy reflectance modelling. *Remote Sensing Reviews*, 18(2/4): 163-196 [DOI: 10.1080/02757250009532389]
- Feret J B, François C, Asner G P, Gitelson A A, Martin R E, Bidol L P R, Ustin S L, le Maire G and Jacquemoud S. 2008. PROSPECT-4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sensing of Environment*, 112(6): 3030-3043 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.02.012]
- Franck F, Juneau P and Popovic R. 2002. Resolution of the Photosystem I and Photosystem II contributions to chlorophyll fluorescence of intact leaves at room temperature. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1556(2/3): 239-246 [DOI: 10.1016/S0005-2728(02)00366-3]
- 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. 2011. 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, 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. 2011. 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, 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]
- Fukshansky L and Kazarinova N. 1980. Extension of the Kubelka - Munk theory of light propagation in intensely scattering materials to fluorescent media. *Journal of the Optical Society of America*, 70(9): 1101-1111 [DOI: 10.1364/josa.70.001101]
- Gastellu-Etchegorry J, Lauret N, Yin T G, Landier L, Kallel A, Malenovsky Z, Bitar A A, Aval J, Benhmida S, Qi J B, Medjdoub G, Guilleux J, Chavanon E, Cook B, Morton D, Chrysoulakis N and Mitraka Z. 2017. DART: recent advances in remote sensing data modeling with atmosphere, polarization, and chlorophyll fluorescence. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(6): 2640-2649 [DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2685528]
- 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]
- Grace J, Nichol C, Disney M, Lewis P, Quaife T and Bowyer P. 2007. Can we measure terrestrial photosynthesis from space directly, using spectral reflectance and fluorescence? *Global Change Biology*, 13(7): 1484-1497 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01352.x]
- Guanter L, Zhang Y G, Jung M, Joanna J, Voigt M, Berry J A, Frankenberg C, Huete A R, Zarco-Tejada P, Lee J E, Moran M S, Ponce-Campos G, Beer C, Camps-Valls G, Buchmann N, Gianelle D, Klumpp K, Cescatti A, Baker J M and Griffis T J. 2014. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(14): E1327-E1333 [DOI: 10.1073/pnas.1320008111]
- 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]
- 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]
- Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, Yoshida Y, Corp L and Middleton E M. 2011. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. *Biogeosciences*, 8(3): 637 - 651 [DOI: 10.5194/bgd-7-8281-2010]
- 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]
- 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(10): 2803 - 2823 [DOI: 10.5194/amt-6-2803-2013]
- Knorr W. 2000. Annual and interannual CO₂ exchanges of the terrestrial biosphere: process-based simulations and uncertainties. *Global Ecology and Biogeography*, 9(3): 225-252 [DOI: 10.1046/j.1365-

- 2699.2000.00159.x]
- Koffi E N, Rayner P J, Norton A J, Frankenberg C and Scholze M. 2015. Investigating the usefulness of satellite-derived fluorescence data in inferring gross primary productivity within the carbon cycle data assimilation system. *Biogeosciences*, 12(13): 4067-4084 [DOI: 10.5194/bg-12-707-2015]
- Köhler P, Frankenberg C, Magney T S, Guanter L, Joanna 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]
- Krause G H and Weis E. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 42: 313-349 [DOI: 10.1146/annurev.pp.42.060191.001525]
- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, Ogée J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S and Prentice I C. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1): (GB1015 [DOI: 10.1029/2003GB002199])
- Kubelka P and F. Munk, Ein Beitrag zur Optik von Farbanstrichen, *Zeitschrift für technische Physik*, 1931, 593-601
- Kuusik A. 1994. A multispectral canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 50(2): 75-82 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)90035-3]
- Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, Thornton P E, Swenson S C, Lawrence P J, Zeng X B, Yang Z L, Levis S, Sakaguchi K, Bonan G B and Slater A G. 2011. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the community land model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 3(1): M03001 [DOI: 10.1029/2011MS00045]
- Lee J E, Berry J A, van der Tol C, Yang X, Guanter L, Damm A, Baker I and Frankenberg C. 2015. Simulations of chlorophyll fluorescence incorporated into the Community Land Model version 4. *Global Change Biology*, 21(9): 3469-3477 [DOI: 10.1111/gcb.12948]
- Lichtenthaler H K and Rinderle U. 1988. Chlorophyll fluorescence spectra of leaves as induced by blue light and red laser light//Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing. Aussois: ESA Publications Division: 251
- Liu J, Chen J M, Cihlar J and Park W M. 1997. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment*, 62(2): 158-175 [DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00089-8]
- Liu W W, Atherton J, Möttus M, Gastellu-Etchegorry J P, Malenovsky Z, Raunonen P, Åkerblom M, Mäkipää R and Porcar-Castell A. 2019. 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]
- Macbean N, Maignan F, Bacour C, Lewis P, Peylin P, Guanter L, Köhler P, Gómez-Dans J and Disney M. 2018. Strong constraint on modelled global carbon uptake using solar-induced chlorophyll fluorescence data. *Scientific Reports*, 8(1): 1973 [DOI: 10.1038/s41598-018-20024-w]
- Malenovsky Z, Mishra K B, Zemek F, Rascher U and Nedbal L. 2009. Scientific and technical challenges in remote sensing of plant canopy reflectance and fluorescence. *Journal of Experimental Botany*, 60(11): 2987-3004 [DOI: 10.1093/jxb/erp156]
- 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]
- Miller J R, Berger M, Goulas Y, Jacquemoud S, Louis J, Mohammed G, Moise N, Moreno J, Moya I, Pedrés 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)
- 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-Etchegorry 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]
- Moya I, Camenen L, Evain S, Goulas Y, Cerovic Z G, Latouche G, Flexas J and Ounis A. 2004. A new instrument for passive remote sensing: 1. Measurements of sunlight-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 91(2): 186-197 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.012]
- North P R J. 1996. Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4): 946-956 [DOI: 10.1109/36.508411]
- Norton A J, Rayner P J, Koffi E N and Scholze M. 2018. Assimilating solar-induced chlorophyll fluorescence into the terrestrial biosphere model BETHY-SCOPE: model description and information content. *Geoscientific Model Development Discussions*: 1-26 [DOI: 10.5194/gmd-2017-34]
- Olioso A, Méthy M and Lacaze B. 1992. Simulation of canopy fluorescence as a function of canopy structure and leaf fluorescence. *Remote Sensing of Environment*, 41(2/3): 239-247 [DOI: 10.1016/0034-4257(92)90081-T]
- Ounis A, Cerovic Z G, Briantais J M and Moya I. 2001. Dual-excitation FLIDAR for the estimation of epidermal UV absorption in leaves and canopies. *Remote Sensing of Environment*, 76(1): 33-48 [DOI: 10.1016/s0034-4257(00)00190-5]
- Pedrés R, Goulas Y, Jacquemoud S, Louis J and Moya I. 2015. FluorMODleaf: a new leaf fluorescence emission model based on the PROSPECT model. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 155-167 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.019]
- Pinto F, Müller-Linow M, Schickling A, Cendrero-Mateo M P, Ballvora A and Rascher U. 2017. Multiangular observation of canopy sun-induced chlorophyll fluorescence by combining imaging spec-

- troscopy and stereoscopy. *Remote Sensing*, 9(5): 415 [DOI: 10.3390/rs9050415]
- 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, Agati G, Alonso L, Cecchi G, Champagne S, Colombo R, Damm A, Daumard F, de Miguel E, Fernandez G, Franch B, Franke J, Gerbig C, Gioli B, Gómez J A, Goulas Y, Guanter L, Gutiérrez-de-la-Cámara Ó, Hamdi K, Hostert P, Jiménez M, Kosvancova M, Lognoli D, Meroni M, Miglietta F, Moersch A, Moreno J, Moya I, Neininger B, Okujeni A, Ounis A, Palombi L, Raimondi V, Schickling A, Sobrino J A, Stellmes M, Toci G, Toscano P, Udelhoven T, van der Linden S and Zaldei A. 2009. 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*, 6(7): 1181-1198 [DOI: 10.5194/bg-6-1181-2009]
- Rayner P J, Scholze M, Knorr W, Kaminski T, Giering R and Widmann H. 2005. Two decades of terrestrial Carbon fluxes from a Carbon Cycle Data Assimilation System (CCDAS). *Global Biogeochemical Cycles*, 19(2): (GB2026 [DOI: 10.1029/2004GB002254])
- Rosema A, Verhoef W, Noorbergen H and Borgesius J J. 1992. A new forest light interaction model in support of forest monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 42(1): 23-41 [DOI: 10.1016/0034-4257(92)90065-r]
- Rosema A, Verhoef W, Schroote J and Snel J F H. 1991. Simulating fluorescence light-canopy interaction in support of laser-induced fluorescence measurements. *Remote Sensing of Environment*, 37(2): 117-130 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90023-y]
- Sušila P and Nauš J. 2007. A Monte Carlo study of the chlorophyll fluorescence emission and its effect on the leaf spectral reflectance and transmittance under various conditions. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 6(8): 894-902 [DOI: 10.1039/B618315H]
- Thompson R L and Goel N S. 1998. Two models for rapidly calculating bidirectional reflectance of complex vegetation scenes: Photon Spread (PS) model and Statistical Photon Spread (SPS) model. *Remote Sensing Reviews*, 16(3): 157-207 [DOI: 10.1080/02757259809532351]
- van der Tol C, Berry J A, Campbell P K E and Rascher U. 2014. Models of fluorescence and photosynthesis for interpreting measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(12): 2312-2327 [DOI: 10.1002/2014JG002713]
- 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 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]
- 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. 1985. Earth observation modeling based on layer scattering matrices. *Remote Sensing of Environment*, 17(2): 165-178 [DOI: 10.1016/0034-4257(85)90072-0]
- Vilfan N, van der Tol C, Muller O, Rascher U and Verhoef W. 2016. Fluspect-B: a model for leaf fluorescence, reflectance and transmittancespectra. *Remote Sensing of Environment*, 186: 596-615 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.09.017]
- Widlowski J L, Mio C, Disney M, Adams J, Andredakis I, Atzberger C, Brennan J, Busetto L, Chelle M, Ceccherini G, Colombo R, Côté J F, Eenmäe A, Essery R, Gastellu-Etchegorry J P, Gobron N, Grau E, Haverd V, Homolová L, Huang H G, Hunt L, Kobayashi H, Koetz B, Kuusk A, Kuusk J, Lang M, Lewis P E, Lovell J L, Malenovský Z, Meroni M, Morsdorf F, Möttus M, Ni-Meister W, Pinty B, Rautiainen M, Schlerf M, Somers B, Stuckens J, Verstraete M M, Yang W Z, Zhao F and Zenone T. 2015. The fourth phase of the Radiative Transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: actual canopy scenarios and conformity testing. *Remote Sensing of Environment*, 169: 418-437 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.016]
- 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]
- 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]
- Zarco-Tejada P J, Catalina A, González M R and Martín P. 2013. Relationships between net photosynthesis and steady-state chlorophyll fluorescence retrieved from airborne hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 136: 247-258 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.05.011]

- 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*, 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 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*, 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]
- Zhao F, Guo Y Q, Huang Y B, Verhoef W, Van der Tol C, Dai B, Liu L Y, Zhao H J and Liu G. 2015a. Quantitative estimation of fluorescence parameters for crop leaves with bayesian inversion. *Remote Sensing*, 7(10): 14179-14199 [DOI: 10.3390/rs71014179]
- 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 and Ni Q. 2018. A model to simulate the radiative transfer of fluorescence in a leaf. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3: 2347-2351 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-2347-2018]

Recent advances in the radiative transfer models of sun-induced chlorophyll fluorescence

ZHAN Chunhui^{1,2}, ZHANG Zhaoying^{1,2}, ZHANG Yongguang^{1,3,4}

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

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

Abstract: Sun-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF) has been recently used as a novel indicator of photosynthesis of vegetation due to its direct relation to vegetation photosynthesis. The mechanism behind the SIF signal is rather complicated. Thus, the physical process and the interaction between SIF and vegetation structure should be understood for better interpretation of SIF data. In this respect, the development of relevant SIF models is the key to improve the understanding and use of SIF signals. In this review, we introduce various SIF models in different scales by clarifying the mechanism behind each model and propose the prospects in the future work.

(1) At the leaf level, fluorescence models are generally based on leaf optical properties models and focus on the simulation of leaf reflectance and transmittance. Several theories can explain the propagation of light in a turbid medium or a simplified blade. The simplest one assumes that light decays exponentially within the blade according to Beer's law. The Kubelka - Munk differential equations are used to solve radiation propagating in a turbid medium, which is followed by the Plate model for dividing the blade into several homogenous layers. The most popular leaf fluorescence model called Fluspect is based on the PROSPECT model, which follows Plate's theory. The key objective is to simulate the re-absorption effect accurately due to the band overlap between SIF emission and chlorophyll absorption.

(2) At the canopy level, fluorescence models incorporate the canopy radiative transfer and leaf fluorescence models, which can be characterized as 1D and 3D models. 1D models, such as FLSAIL, FluorSAIL, and SCOPE, incorporate SAIL model with a leaf fluorescence model and assume the canopy as several horizontally homogenous layers. 3D models, such as DART, FluorWPS, and FluorFLIGHT, simulate the canopy fluorescence in a realistic scene using ray tracing method. They are suitable to heterogeneous vegetation canopies.

(3) At the ecosystem level, these fluorescence models help reduce the uncertainties in simulating carbon cycle and predicting ecological system response to global change by incorporating them with land surface models, such as NCAR CLM4, BEPS, and BETHY.

Despite the advances in the SIF models across multiple scales, further studies are still needed with respect to model development, validation, and inversion. For example, accurate tree positions and canopy structure parameters can be derived from light detection and ranging data, which enables the reconstruction of 3D scenes based on the real landscape. With the development of in situ SIF measurement techniques, SIF models can be validated with the measurements except cross-validation through various models. SIF model inversion is a prospective research area to derive vegetation structure and biochemical parameters through spectral data. The novel machine learning approaches may also provide new opportunities to be incorporated with SIF models to solve inversion problems.

Key words: sun-induced chlorophyll fluorescence, SIF model, radiative transfer model, vegetation structure, multiple scattering

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFA0600202); General Program of National Science Foundation of China (No. 41671421); Jiangsu Provincial Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (No. BK20170018)