

国产卫星的叶绿素荧光 遥感反演研究

刘良云

中国科学院遥感与数字地球研究所

2018年11月13日·成都

报告提纲

1. 叶绿素荧光简介

2. 叶绿素荧光反演原理与算法

3. TanSat卫星叶绿素荧光反演与产品

4. FY3D卫星叶绿素荧光反演初探

1. 叶绿素荧光简介

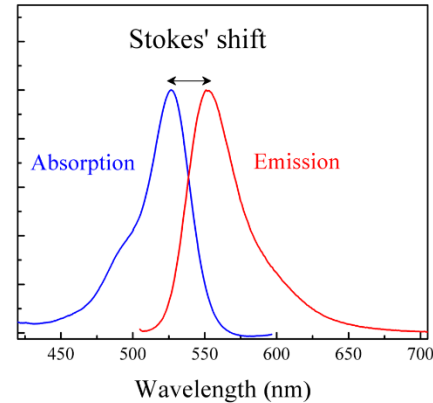
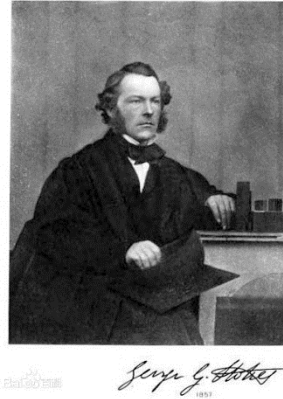
叶绿素荧光是近十年植被遥感领域最亮点的研究前沿，也是一个古老的科学问题



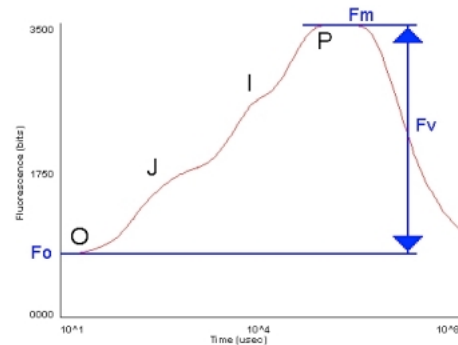
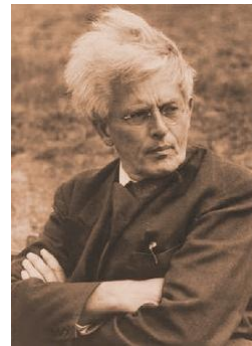
1834年 传教士Brewster观察到月桂叶子的乙醇提取液在透射光下由绿色变为红色



1874年 Müller发现叶绿素溶液稀释后，荧光强度比活体叶子的荧光强得多，并提出叶绿素荧光和光合作用之间可能存在相反的关系



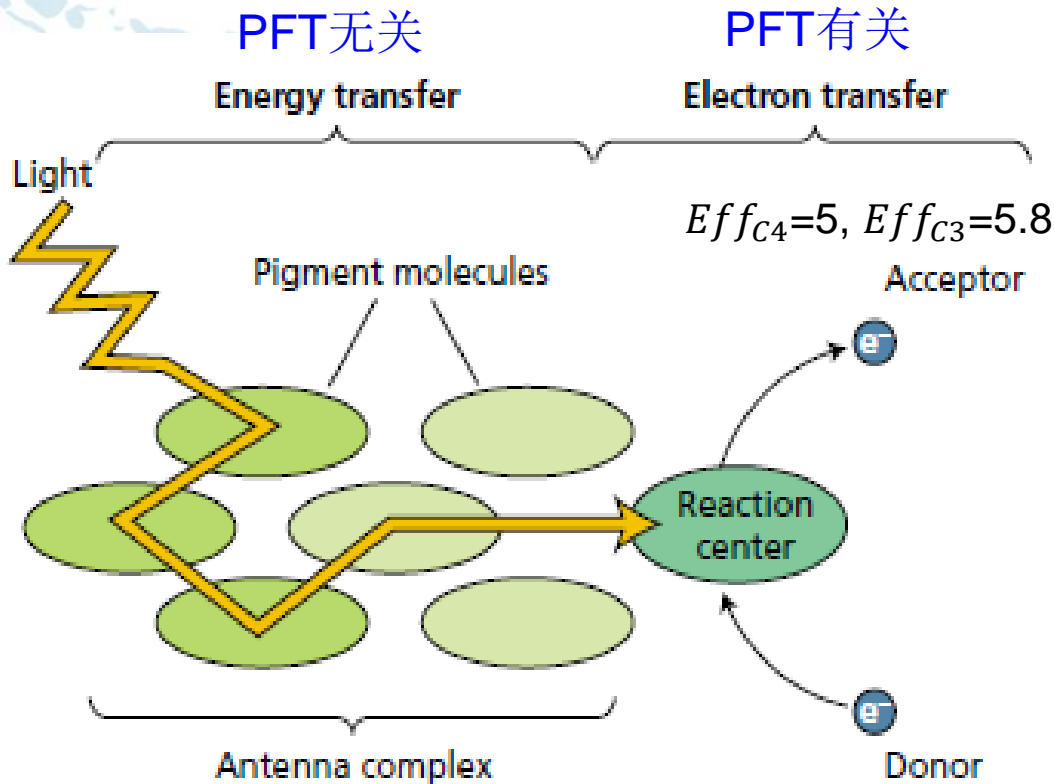
1852年 Stokes认识到荧光是一种光发射现象，并首次使用了“fluorescence”一词



1931年 Kautsky和Hirsch用肉眼观察并记录了叶绿素荧光诱导现象，发现叶绿素荧光强度随时间而变化，并与CO₂的固定有关

1. 叶绿素荧光简介

光合作用电子传递速率与荧光均发生在光反应过程中。光照冠层尺度，非胁迫情况下，电子传递损失是稳定。释放的荧光越强，电子传递速率高，**GPP**也越高。



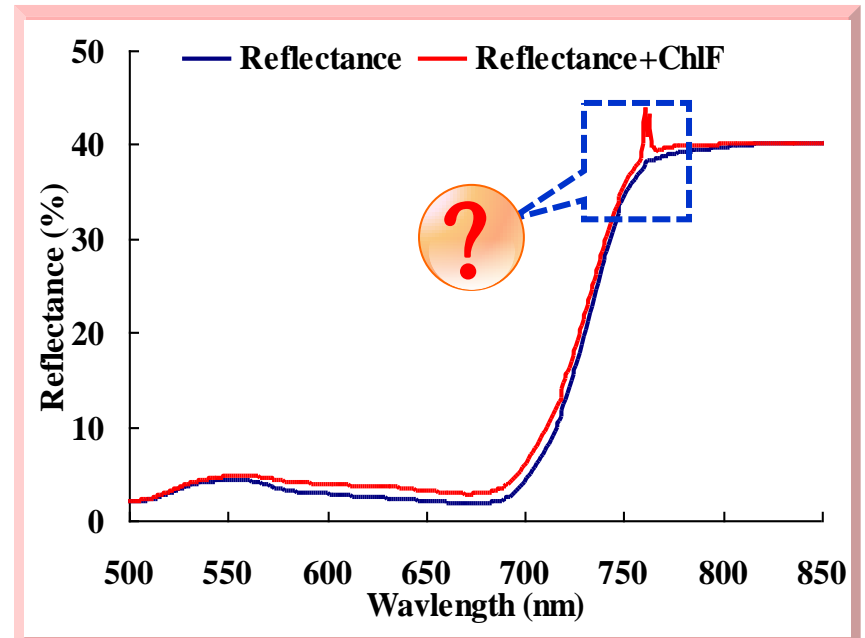
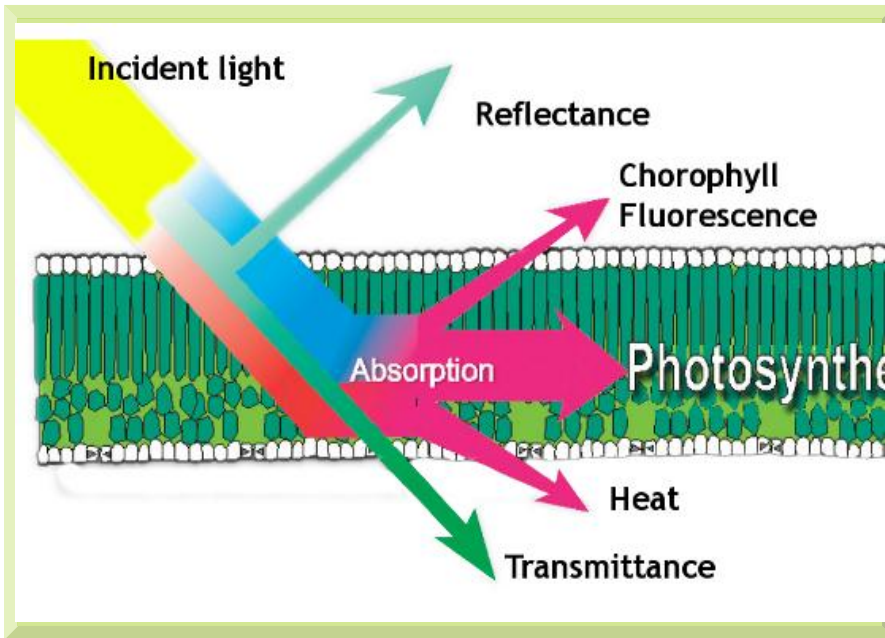
激发能从吸光叶绿素转移到反应中心的物理机制是荧光共振能量传递，借助这种机制，激发能以非辐射的方式从一个分子转移到另一个分子。转移过程中部分能量以长波荧光方式释放出来。

碾米机与跷跷板

1. 叶绿素荧光简介

叶绿素荧光不足入射能量1%，且与反射光混叠在一起，难以独立探测。

遥感器接收到的植被反射方向的光谱信号中，既包括日光诱导叶绿素荧光的贡献，也包括植被冠层对太阳入射光的反射光谱的贡献。SIF是发射光谱，与植物光合作用能力、受胁迫状况、生理状况相关，研究和探测这种自然条件下光合作用的荧光特性具有重要的科学意义和应用价值。



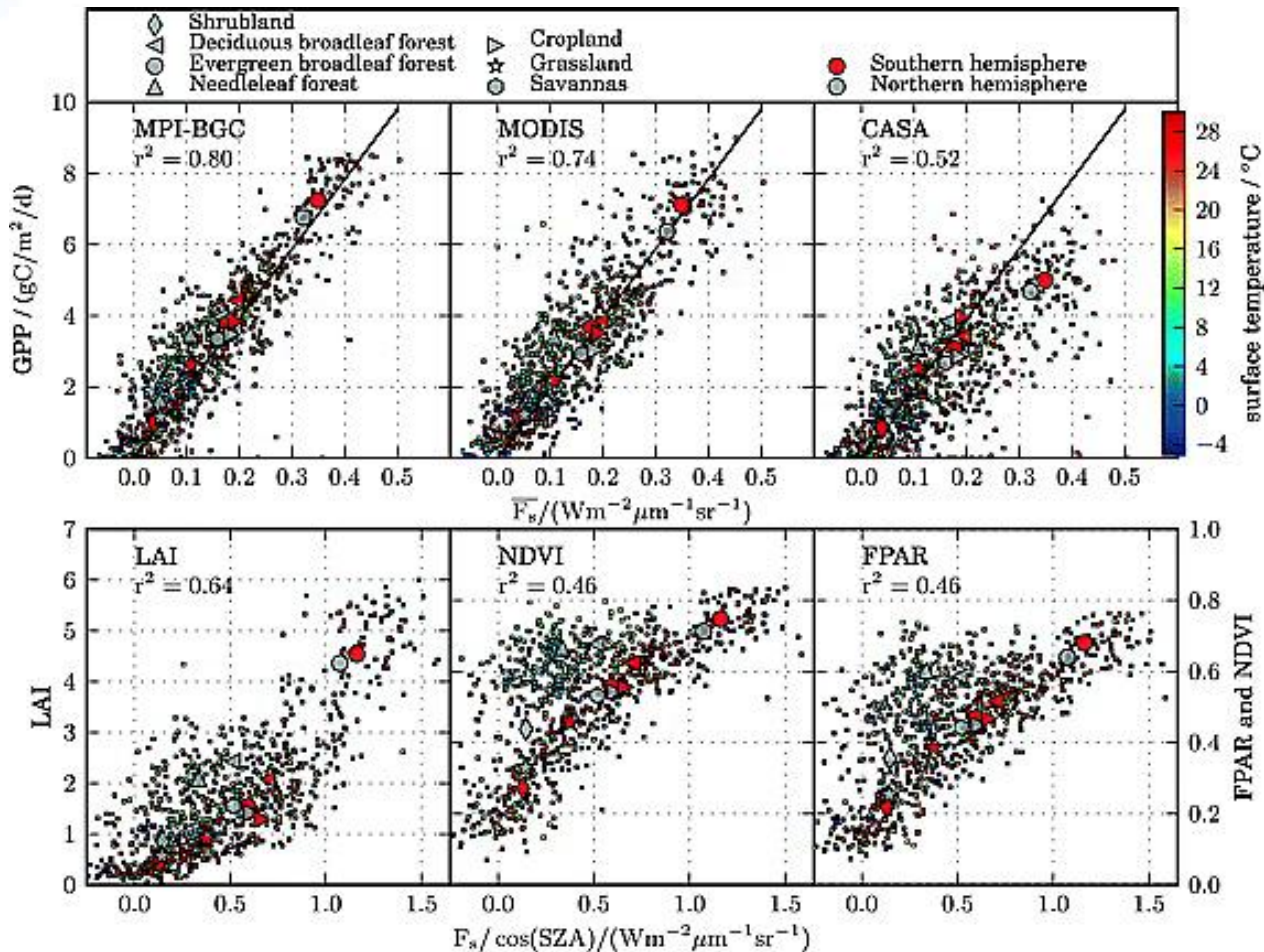
- 问题：**
- 1、760nm波长处的高光谱分辨率反射光谱为什么存在尖峰？
 - 2、叶绿素荧光作用及其光谱探测与应用？

2003年开始连续获得5个国家自然科学基金项目的资助。

1. 叶绿素荧光简介

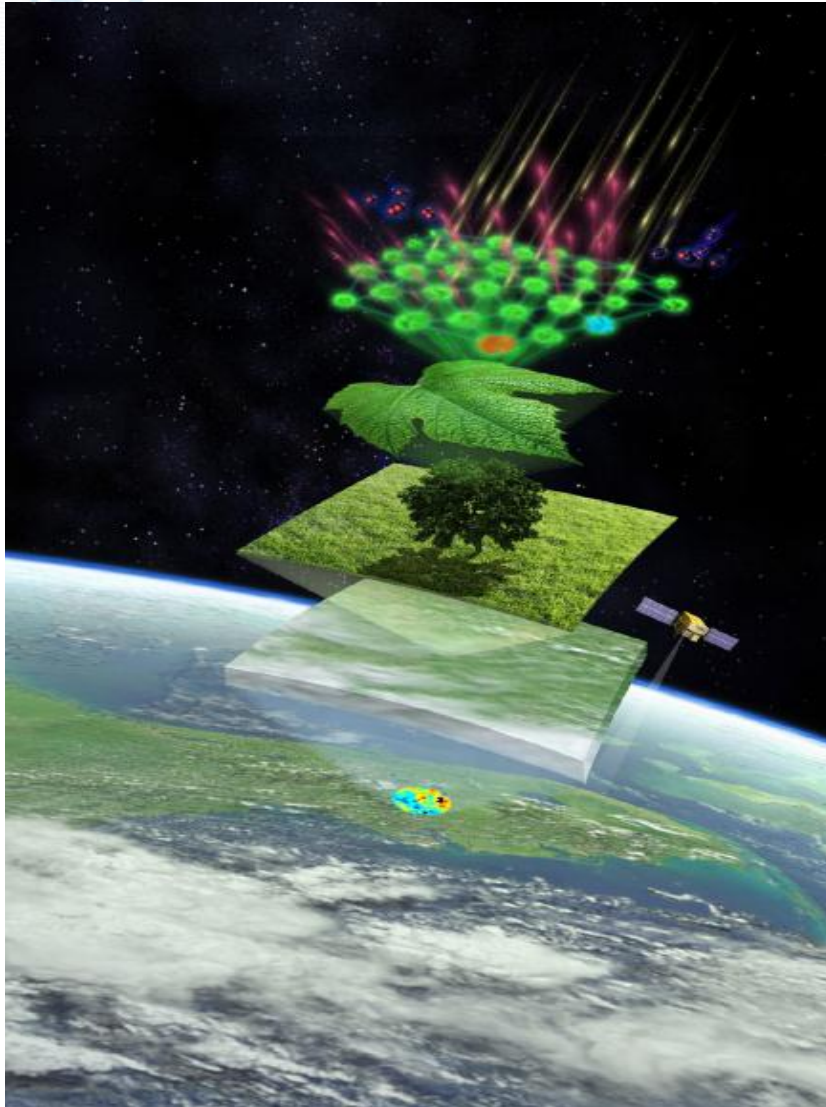
叶绿素荧光是植被光合生产力直接探测新方法

Frankenberg, C., Fisher, J. B., Worden, J., Badgley, G., Saatchi, S. S., Lee, J. E., ... & 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).



1. 叶绿素荧光简介

叶绿素荧光是植被光合生产力直接探测新方法



Equation Chain:
Molecules to the Globe

From PAM fluorometry

$$F_t = F'_m \left(1 - \frac{J_e}{a\text{PAR}_{(PSII)}} \right)$$

$$\text{SIF} \approx F_t \cdot a\text{PAR}$$

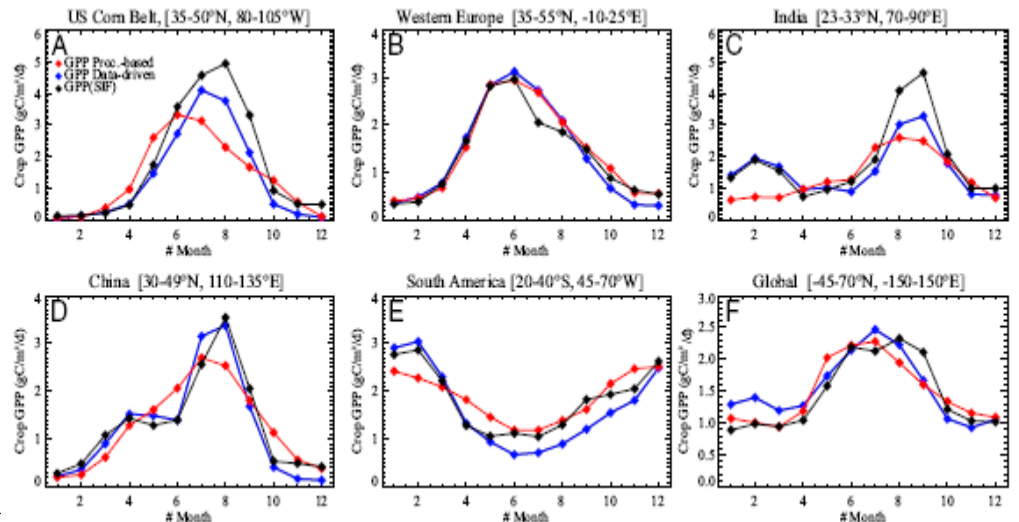
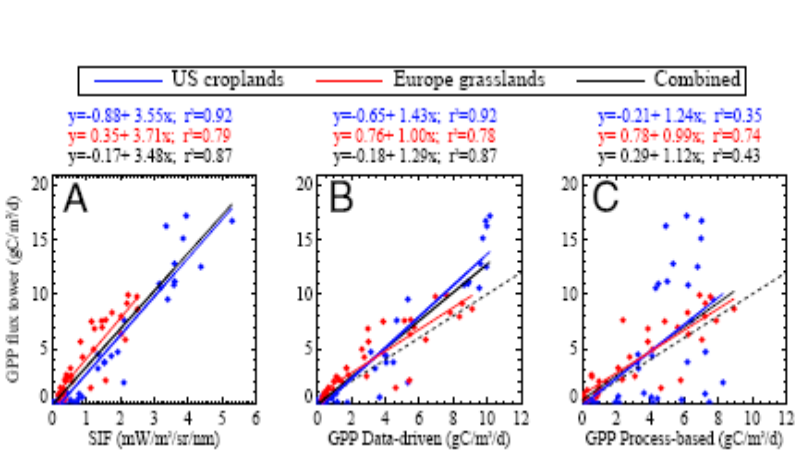
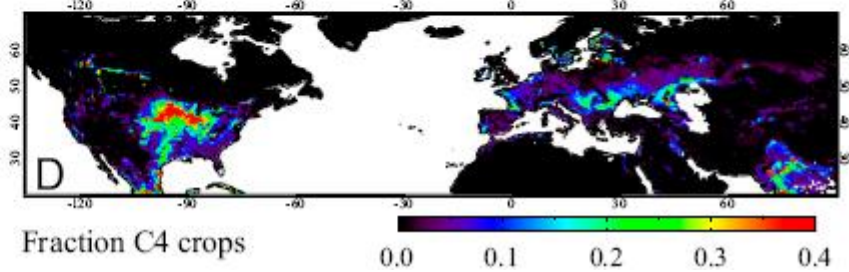
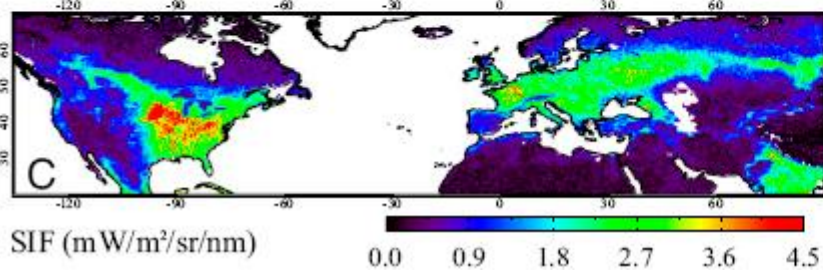
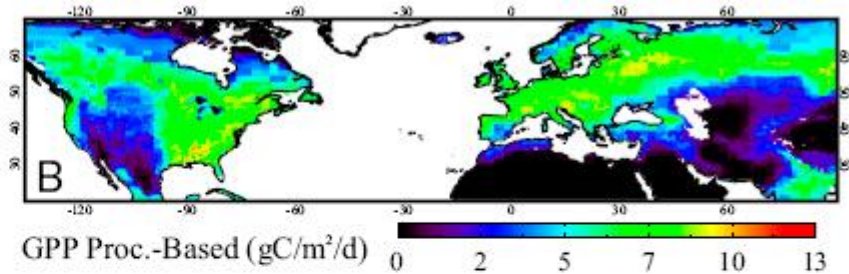
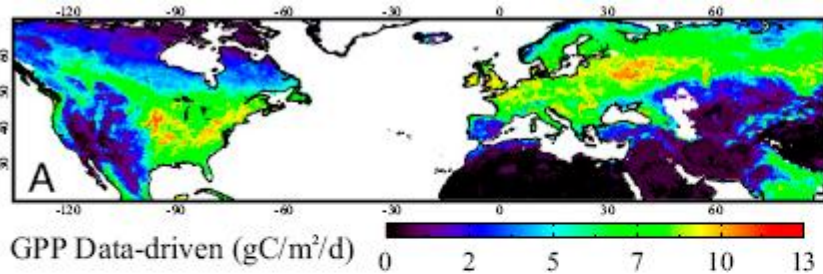
Non-photochemical quenching to the “tipping point”

$$k_{NPQ} = f(x), x = 1 - \frac{J}{J_o}$$

SIF to GPP; from flux sites and satellites

$$\begin{cases} \text{GPP} = \text{PAR} \cdot \text{fPAR} \cdot \epsilon_P \\ \text{SIF} = \text{PAR} \cdot \text{fPAR} \cdot \epsilon_F \\ \text{GPP} = \frac{\epsilon_P}{\epsilon_F} \cdot \text{SIF} \end{cases}$$

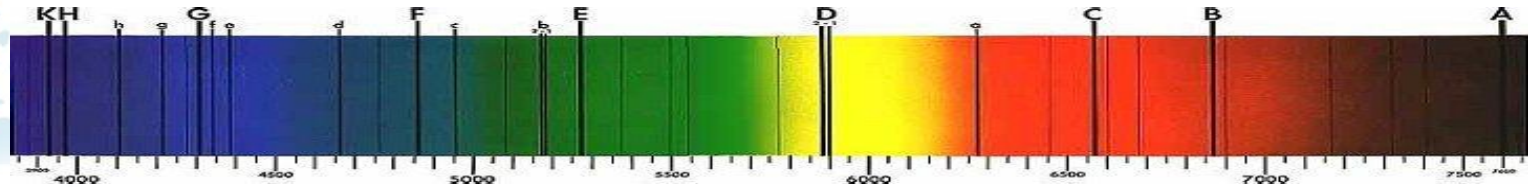
1. 叶绿素荧光简介



Guanter L., Y. Zhang, M. Jung, J. Joiner, M. Voigt, J. A. Berry, C. Frar Zarco-Tejada, J-E. Lee, M. S. Moran, G. Ponce-Campos, C. Beer, G. Camps-Valls, N. Buchmann, D. Gianelle, K. Klumpp, A. Cescatti, J. Baker, and T.J. Griffis. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *PNAS*, 2014/3, doi: 10.1073/pnas.1320008111

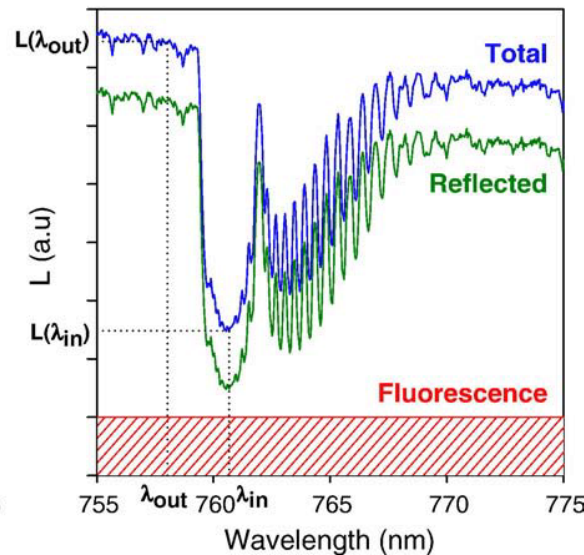
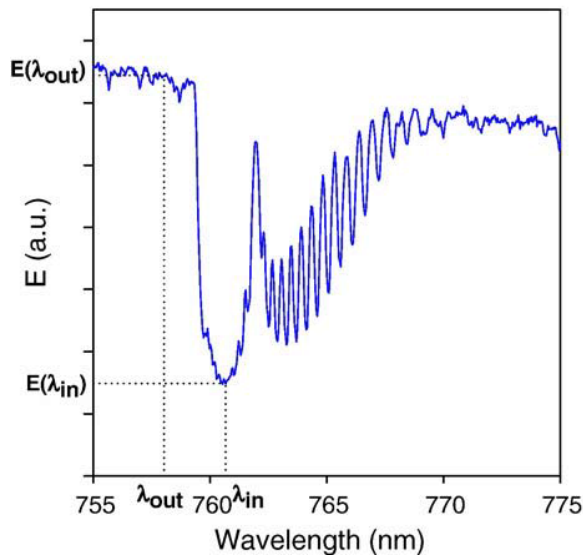
2. 叶绿素荧光反演原理与算法

- 夫琅禾费暗线填充原理(Fraunhofer Line Discrimination)



A) Solar Irradiance ↓

B) Target Radiance ↑



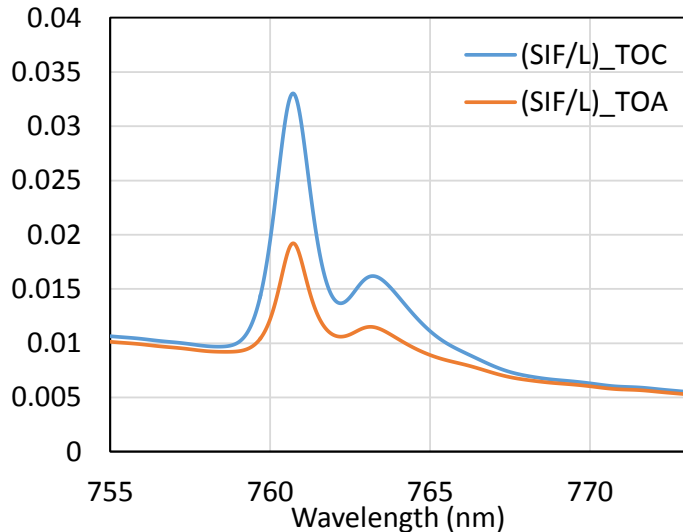
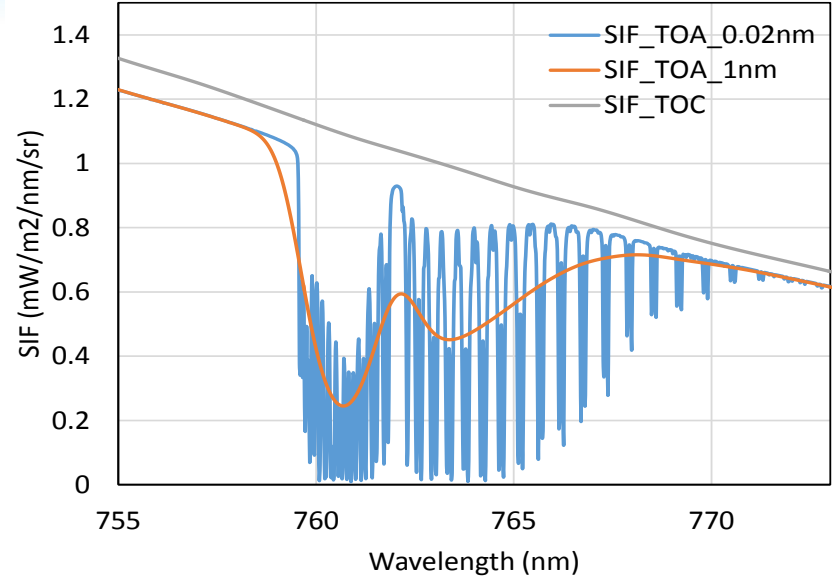
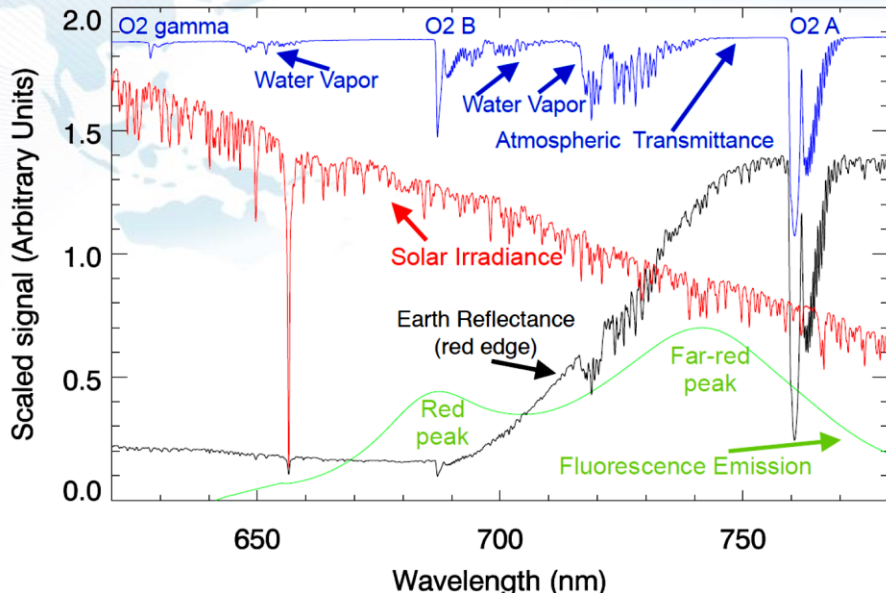
$$\left. \begin{aligned} L_{in} &= I_{in} \cdot R_{in} + FS_{in} \\ L_{out} &= I_{out} \cdot R_{out} + FS_{out} \end{aligned} \right\}$$

$$FS_{in} = \frac{\alpha_R I_{out} L_{in} - I_{in} L_{out}}{\alpha_R I_{out} - \alpha_F I_{in}}$$

Plascyk, J.A., & Gabriel, F.C. (1975). Fraunhofer line discriminator Mk II – Airborne instrument for precise and standardized ecological luminescence measurement. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, 24, 306-313

Alonso, L., Gomez-Chova, L., Vila-Frances, J., Amoros-Lopez, J., Guanter, L., Calpe, J., & Moreno, J. (2008). Improved Fraunhofer Line Discrimination method for vegetation fluorescence quantification. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5, 620-624

2. 叶绿素荧光反演原理与算法



TOC/TOA 荧光相对贡献

$$L_{TOA} = L_0 + \frac{[(E_{dir} \mu_s + E_{dif}) \rho_s / \pi + SIF] T_{\uparrow}}{1 - S \rho_s}$$

物理模型方法
 荧光反演大气校正方案
 数据驱动方法

2. 叶绿素荧光反演原理与算法

$$L_{TOA} = L_0 + \frac{[(E_{dir}\mu_s + E_{dif})\rho_s / \pi + Fs]T_{\uparrow}}{1 - S\rho_s}$$

where L_0 is the atmospheric path radiance, E_{dir} and E_{dif} are the direct and diffuse fluxes of solar irradiance arriving at the surface, μ_s is the cosine of the solar zenith angle, ρ_s is the surface reflectance, S is the atmospheric spherical albedo and T_{\uparrow} is the total transmittance of the atmosphere.

$$\left. \begin{aligned} Y &= \frac{L_{TOA} - L_0}{T_{\uparrow}} \\ X &= \frac{1}{\pi} (E_{dir}\mu_s + E_{dif}) + YS \end{aligned} \right\}$$

Y is the upward radiance at the TOC and X is the downward radiance that reaches the TOC.

$$Y = X\rho_s + Fs$$

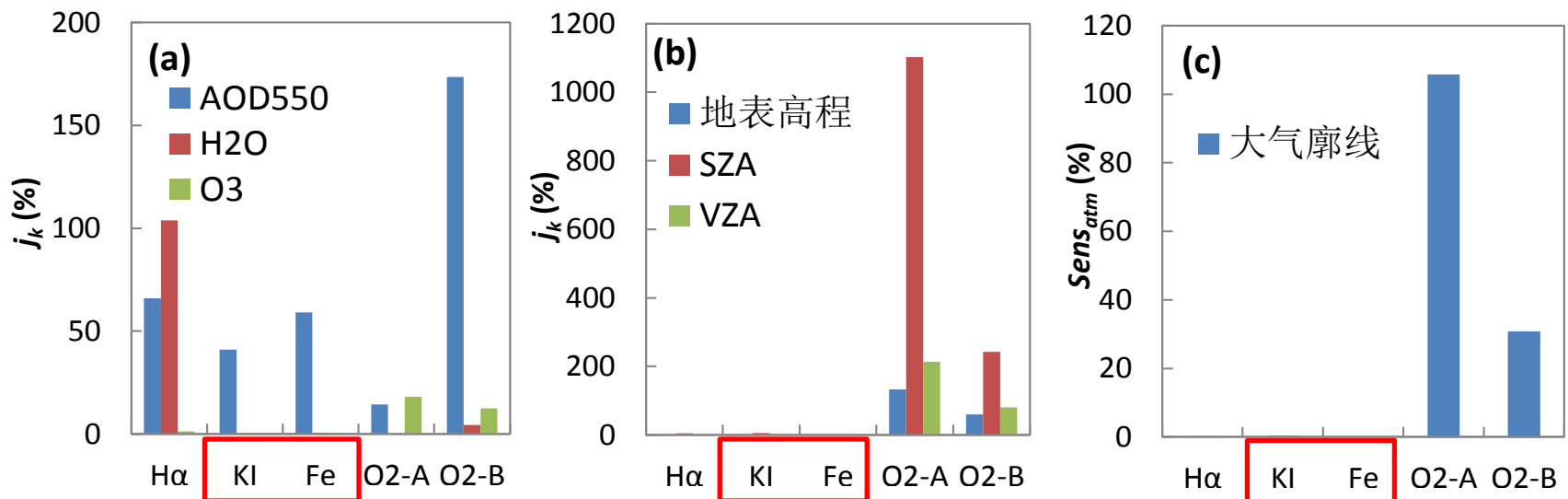
$$Fs = \frac{X_{out}Y_{in} - X_{in}Y_{out}}{X_{out} - X_{in}}$$

2、叶绿素荧光反演原理与算法

目前大气遥感产品和传统辐射传输校正方法无法支持叶绿素荧光高精度反演。

- 利用局部敏感性分析(LSA)的方法对不同波段对各大气参数的敏感性进行了定量评价。

$$par_{norm} = \frac{par}{par_{max} - par_{min}} \quad \delta SIF_{rel} = \frac{|SIF_{pert} - SIF_{exp}|}{SIF_{exp}} \quad \mathbf{J} = [j_k]_{1 \leq k \leq m}, \quad j_k = \frac{\delta SIF_{rel}}{\delta par_{norm,k}}$$



不同波段荧光反演对大气参数的敏感性
Liu et al., 2015 RS

2、叶绿素荧光反演原理与算法

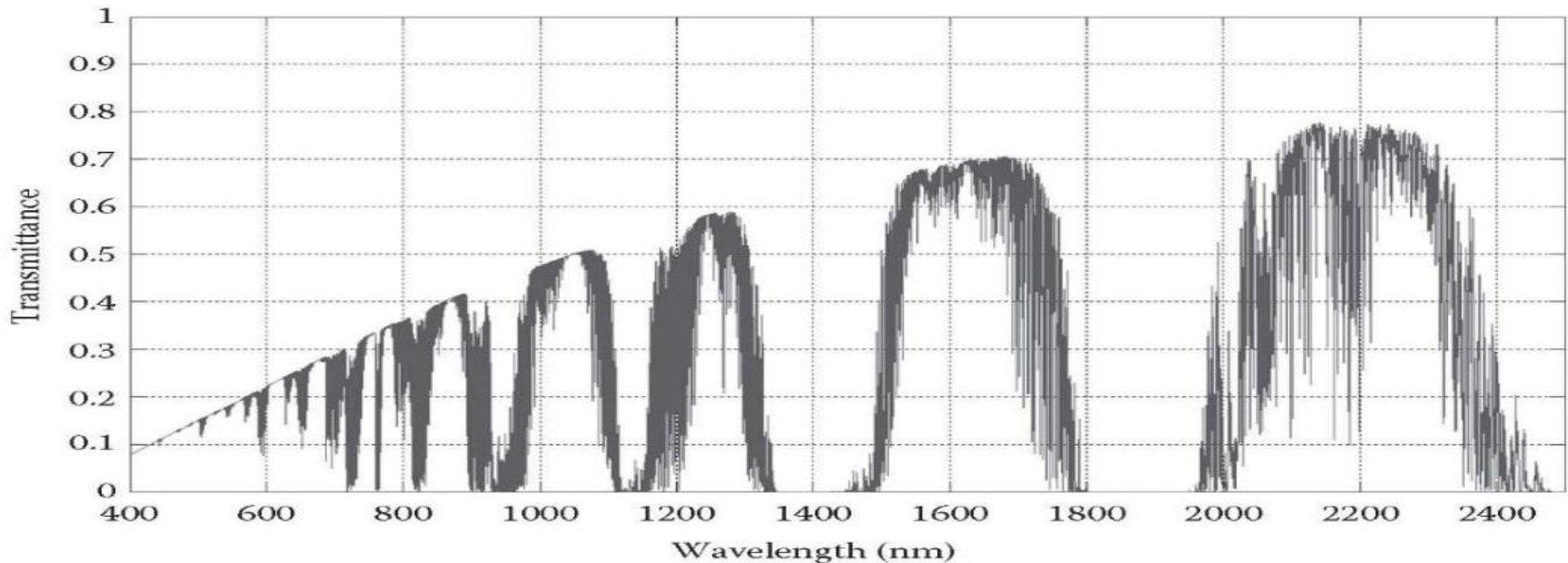
大气校正的目的是什么？

传统：遥感反演大气气溶胶、水汽等 + 大气辐射传输模型

⇒ 大气光学特性（透过率与程辐射）

⇒ TOA 辐亮度转换为地表反射率

好不好？



不同大气状况的大气透过率形状是相似的，用少数几个主成分就可以精确重构大气光学特性。

2. 叶绿素荧光反演原理与算法

数据驱动的叶绿素荧光反演方法

$$L_{TOA} = L_0 + \frac{[(E_{dir} \mu_s + E_{dif}) \rho_s / \pi + F_s] T_{\uparrow}}{1 - S \rho_s}$$



$$F_{TOA} = I_{sol} \cdot \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \sum_{i=0}^3 (\alpha_i \cdot \lambda^i) \cdot \sum_{j=1}^{n_{PC}} (\beta_j \cdot PC_j) + F_s \cdot h_f \cdot T_{\uparrow}, \quad (3)$$

where α_i , β_j , F_s and T_{\uparrow} are the unknowns which are necessary to generate a synthetic measurement. Note that Eq. (3) is

3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

具备荧光探测潜力的主要卫星传感器技术指标

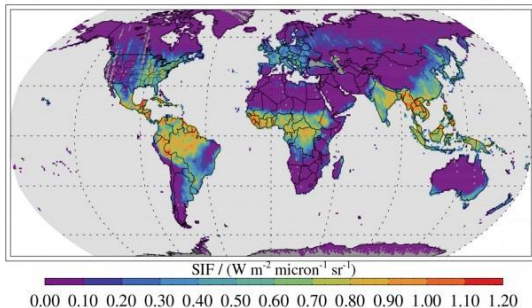
| 卫星/传感器 | SR (nm) | 信噪比 | 波段范围 (nm) | 空间采样方式 | 空间分辨率 (km) | 发射时间 | 参考文献 |
|-------------------|---------|----------|-----------|--------|------------|--------|--------------------------|
| GOSAT TANSO-FTS | 0.025 | 300 | 755-775 | 离散 | 10.5 | 2009.1 | Kuze et al., 2009 |
| OCO-2 | 0.042 | 1000 | 757-775 | 连续 | 1.3×2.25 | 2014.7 | Frankenberg et al., 2014 |
| ENVISAT SCIAMACHY | 0.48 | 2800 | 650-790 | 连续 | 30×240 | 2002.3 | Lichtenberg et al., 2006 |
| MetOp-A/B GOME-2 | 0.5 | 1000 | 650-790 | 连续 | 40×80 | 2007.1 | Callies et al., 2000 |
| S5P TROPOMI | 0.5 | 500-2000 | 675-775 | 连续 | 7 | (2016) | Guanter et al., 2015 |
| FLEX FLORIS | 0.3 | 300-1200 | 500-780 | 连续 | 0.3 | (2022) | Kraft et al., 2014 |
| S4 series UVN | 0.12 | | 750-775 | 连续 | 8 | (2020) | Meijer et al., 2014 |
| S5 series UVNS | 0.4 | | 685-775 | 连续 | 7 | (2022) | Meijer et al., 2014 |
| TanSat | 0.044 | | 758-778 | 离散 | | 2016 | TanSat |
| GF-5 温室气体 | 0.035 | 300 | 759-769 | 离散 | 10 | 2018 | GF-5 温室气体 |
| FY-3D | 0.025 | 300 | 755-775 | 离散 | | 2017 | FY-3D |
| 陆地生态碳卫星 | 0.3 | 200-800 | 670-780 | 连续 | 2 | (2021) | 陆地生态碳卫星 |

3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

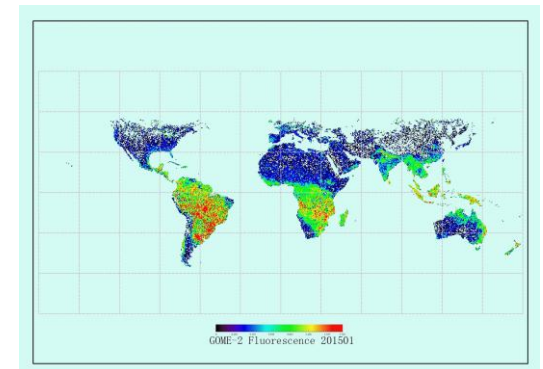
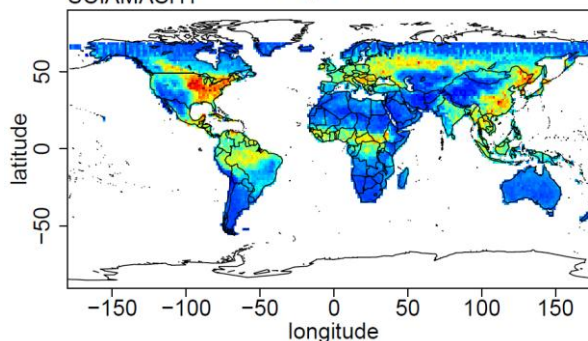
2015年9月ESA宣布荧光探测计划FLEX胜出，并正式确定为Earth Explorer 8的任务，预计2022年提供全球300米荧光遥感产品。

| 单位 | 荧光产品 | 时间 | 分辨率 | 参考文献 |
|---|--------------|-----------|-------------------|-------------------------------|
| NASA | OCO-2荧光产品 | 2014-至今 | 日值 | Frankenberg et al., 2014 |
| http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/OCO-2/data-holdings/oco-2-v7 | | | | |
| GFZ | GOME-2荧光产品 | 200701- | 0.5° x 0.5° 日值 | Köhler, Guanter, et al., 2015 |
| | SCIMACHY荧光产品 | 200208- | 1.5° x 1.5° 日值 | |
| ftp://ftp.gfz-potsdam.de/home/mefe/GlobFluo/ | | | | |
| NASA | GOME-2荧光产品 | 2007-至今 | 0.5° x 0.5° 日值、月值 | Joiner et al., 2013&2016 |
| | SCIMACHY荧光产品 | 2003-2012 | | |
| http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/People/Joiner/ | | | | |

OCO-2 Solar-Induced Fluorescence Aug-Oct 2014



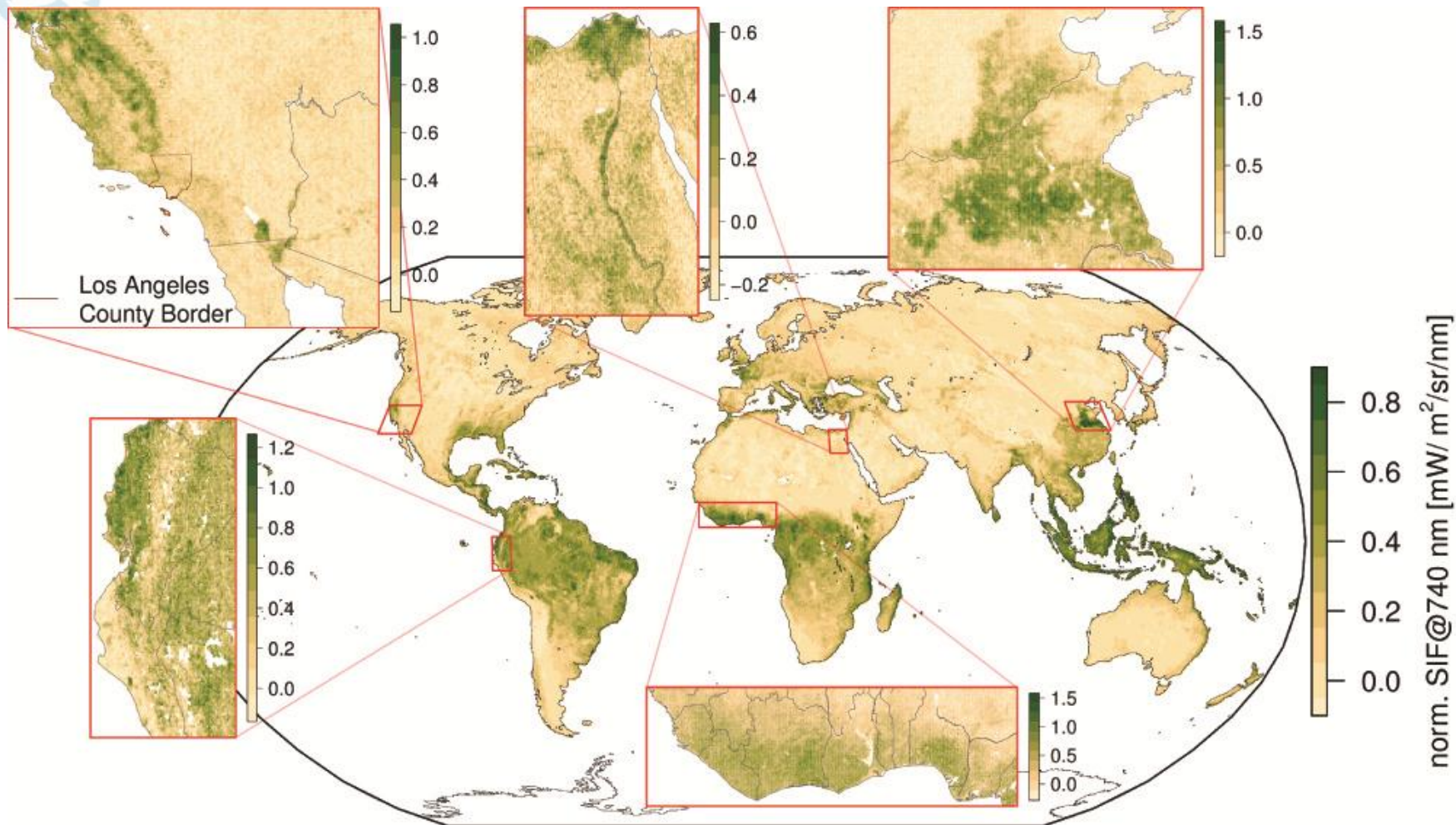
SCIAMACHY July 2011



3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

TROPOMI 荧光

Köhler, P., (2018). Geophysical Research Letters.



3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

2016年12月发射首颗二氧化碳观测科学实验卫星TANSAT，这是暨日本GOSAT卫星和美国OCO-2卫星之后的第三颗全球“嗅碳”卫星。



TanSat卫星的参数设置

| Name | Characters |
|----------------|-----------------|
| Orbit type | Sun-synchronous |
| Altitude | 700 km |
| Inclination | 98° |
| Local time | 13:30 |
| Weight | 620 kg |
| Revisit period | 16 days |

Observation over land;
Push broom;

Observation over ocean;
Sun glint track;

Observation validation;
Surface target track;

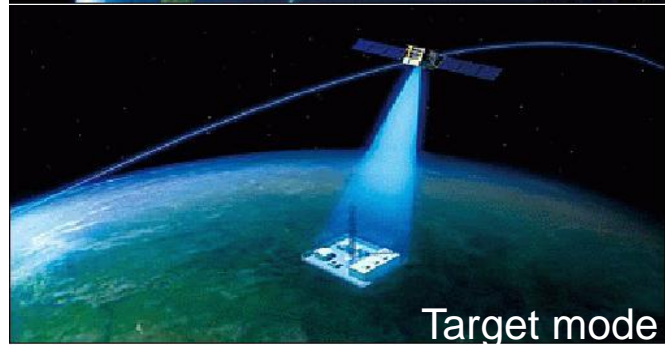
三种成像模式



Nadir mode



Sun-glint mode



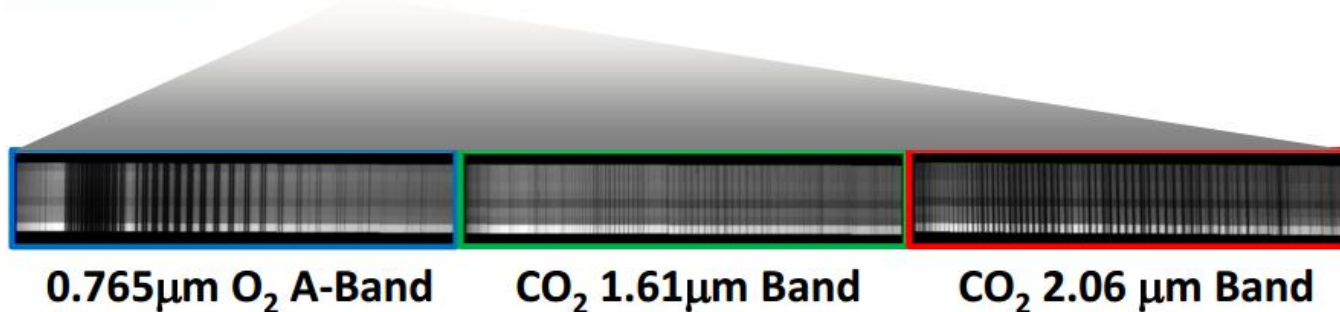
Target mode

3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

- TanSat主要载荷：高光谱二氧化碳探测仪（ACGS）与云和气溶胶探测仪（CAPI）

TanSat-ACGS的参数设置

| Band | O ₂ -A | Weak CO ₂ | Strong CO ₂ |
|--------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|
| Spectral Coverage (nm) | 758-778 | 1594-1624 | 2042-2082 |
| Spectral Resolution (nm) | 0.044 | 0.12 | 0.16 |
| SNR | 360 | 250 | 180 |
| Spatial Resolution | 2 km × 2 km | | |
| Swath | 20 km | | |

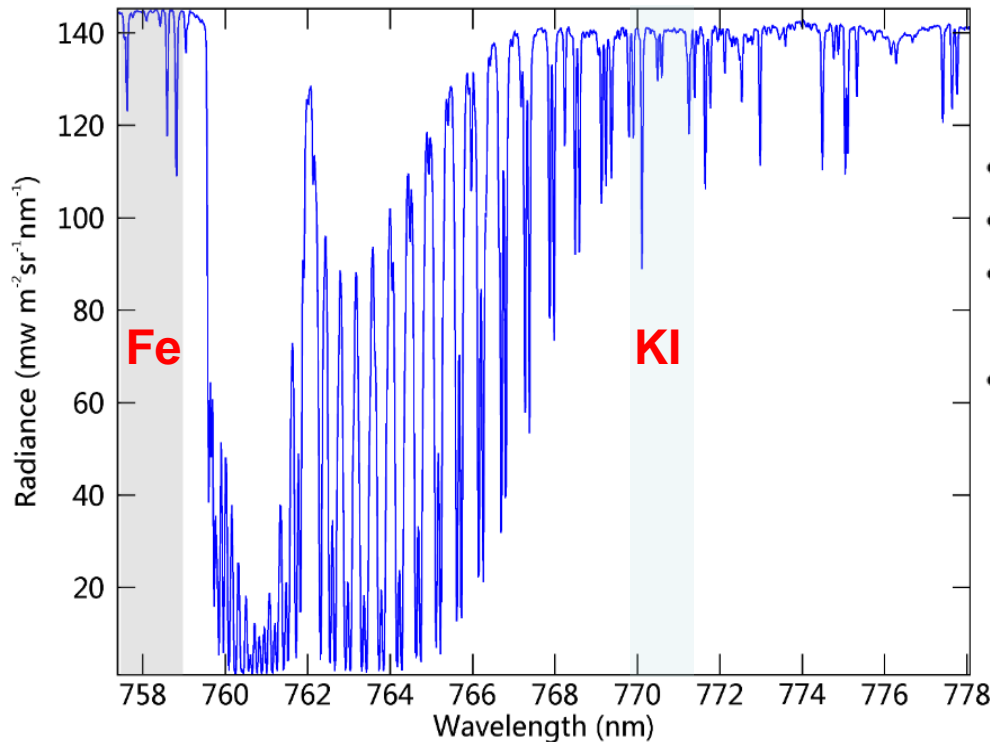


TanSat-CAPI的参数设置

| Band | Spectral coverage (nm) | SNR | Polarization angle (°) | FOV | No of pixels |
|------|------------------------|-----|------------------------|-----------------|--------------|
| 1 | 365-408 | 260 | | 400 km x 0.5 km | 1600 |
| 2 | 660-685 | 160 | 0/60/120 | | 1600 |
| 3 | 862-877 | 400 | | | 1600 |
| 4 | 1360-1390 | 180 | | | 800 |
| 5 | 1628-1654 | 110 | 0/60/120 | | 800 |

3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

- **TanSat L1B 辐亮度光谱**



$$Radiance = \sum_{i=0}^6 c_i (Dn - Dn_{dark})^i$$

- Radiance-ACGS radiance in Level 1B data;
- c_i - Radiometric calibration gain;
- Dn -The digital number of ACGS's response in observational model;
- Dn_{dark} - The digital number of dark signal of ACGS;

$$\lambda = \sum_{i=0}^5 C_i \cdot P^i$$

利用**Fe(758nm)**、**KI(771nm)**太阳
Franhofer线可以实现荧光的高精度反演

- P refers to the pixel number
- C_i refers to the dispersion coefficients

3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

- SVD分解原理

$$L_{TOA} = I_0^\lambda \mu \left[\rho_0^\lambda + \frac{\rho_s^\lambda \cdot T_{\downarrow\uparrow}^\lambda}{\pi} \right] + SIF_{TOA}^\lambda$$



$$R_{TOA} = \sum_{i=1}^{n_v} \omega_i v_i + F_s^{TOA} \cdot I$$

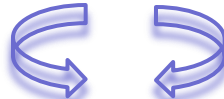


$$M = U \Sigma V^T$$



$$Ax = L_{TOA}$$

普通最小二乘



$$A = [V, I] \quad x = [\omega_i, SIF_{TOA}]^T$$

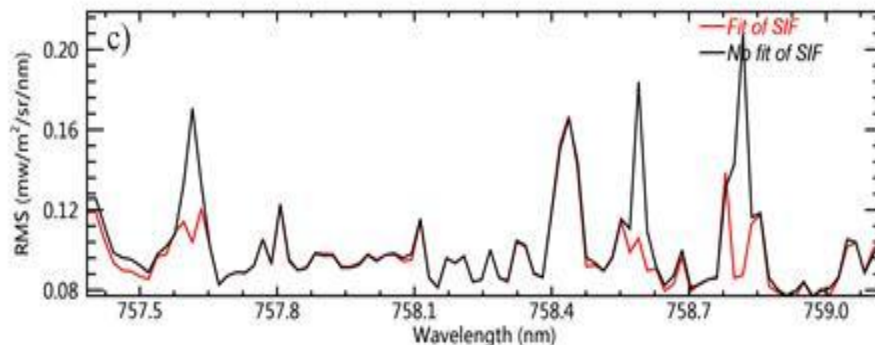
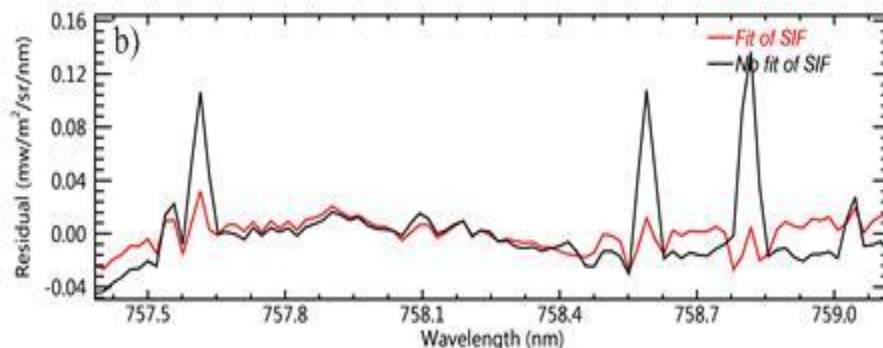
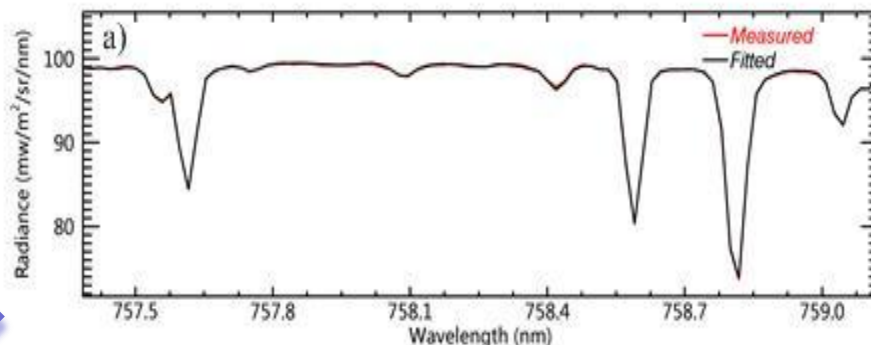
在微小的波段范围内(<2nm), SIF-free组分— $I_0^\lambda \mu \left[\rho_0^\lambda + \frac{\rho_s^\lambda \cdot T_{\downarrow\uparrow}^\lambda}{\pi} \right]$ 可利用奇异向量拟合, 其中 v_i 为利用非植被地表辐亮度光谱提取的奇异值, ω_i 为对应的权值。通过最小二乘法求解。

3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

• SIF 反演精度

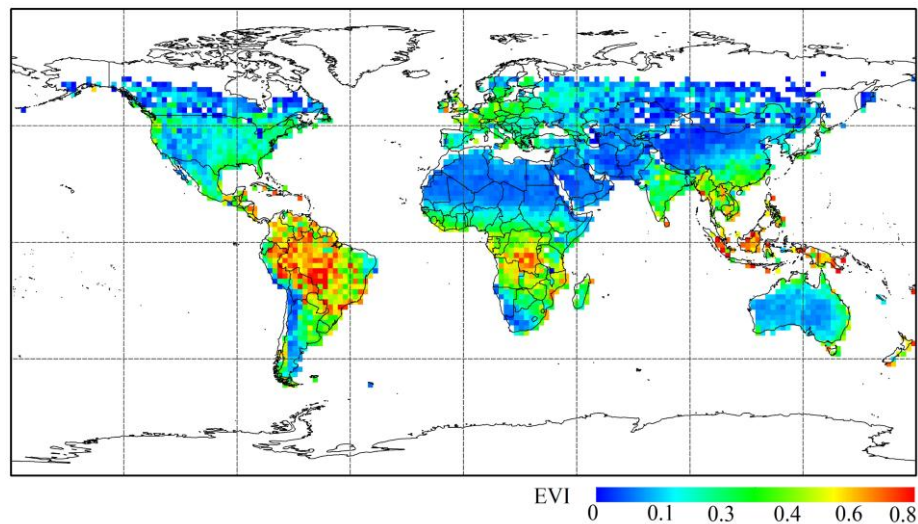
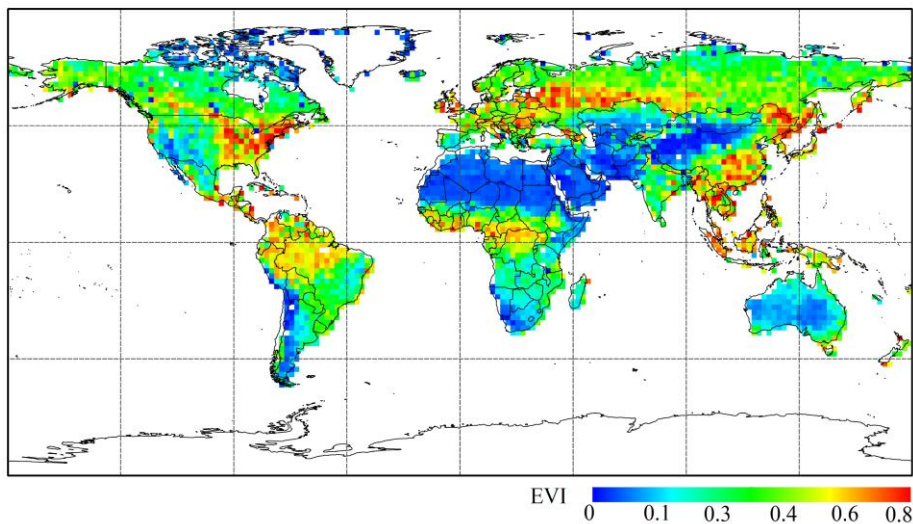
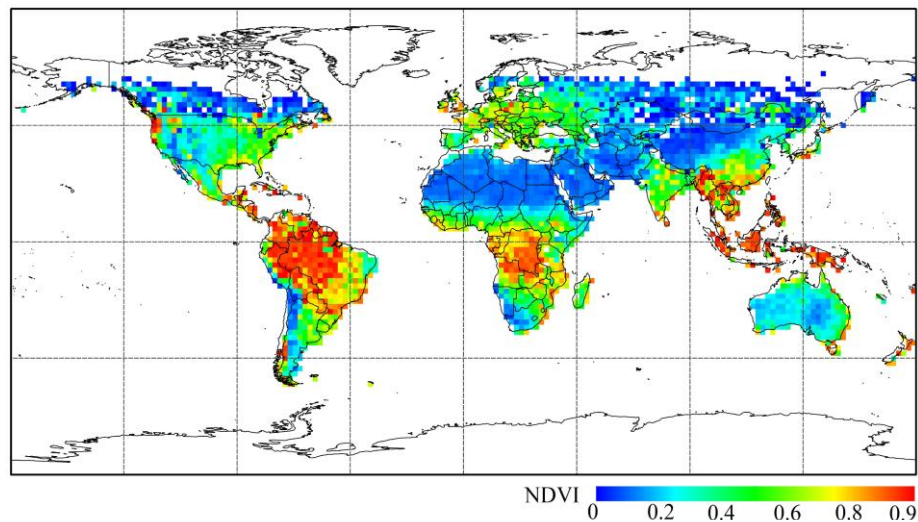
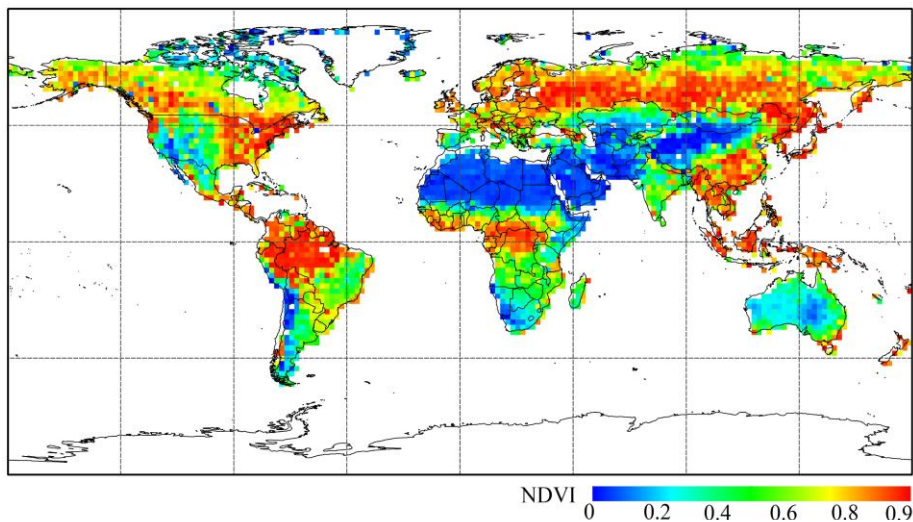
- a) 利用前向模型和反演的SIF数据，拟合的TOA辐亮度；
- b) 拟合光谱与测量光谱的差值（考虑SIF与不考虑SIF的两种情况下）；
- c) 为消除误差的正负抵消效果，计算了所有误差的RMS

拟合辐亮度与观测辐亮度的平均误差在 -0.03 与 $0.03 \text{ mw m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ 之间，RMS值均小于 $0.1 \text{ mw m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ 。

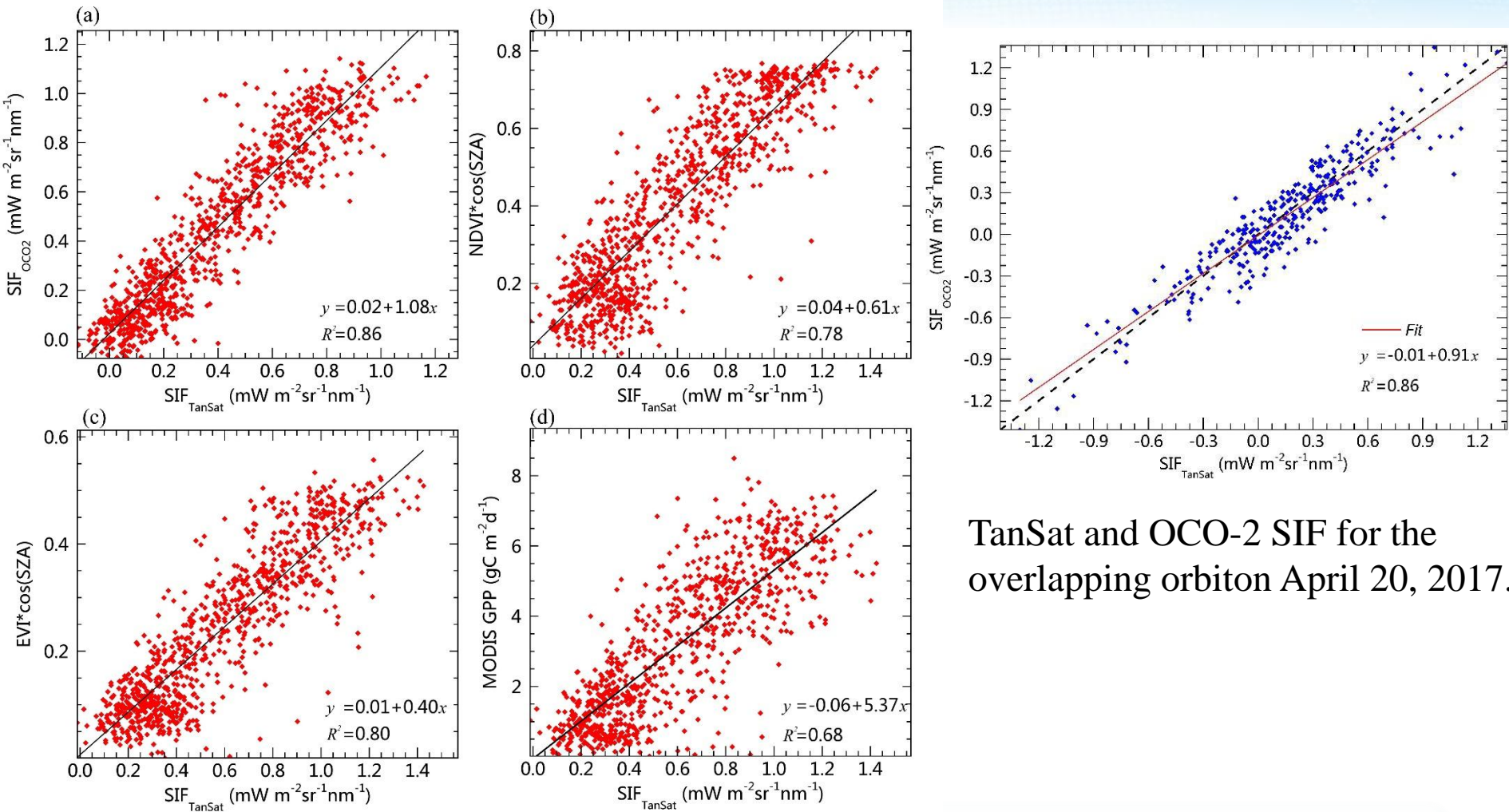


3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

- Global SIF 月值产品



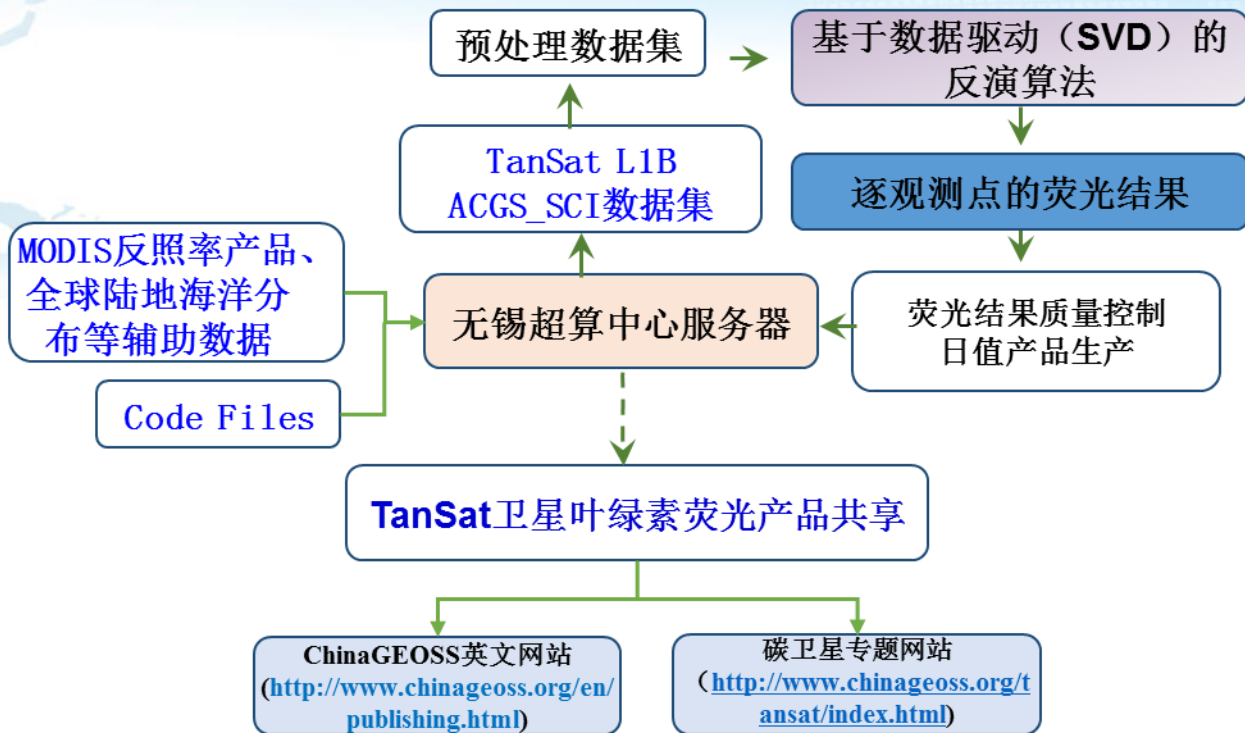
3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产



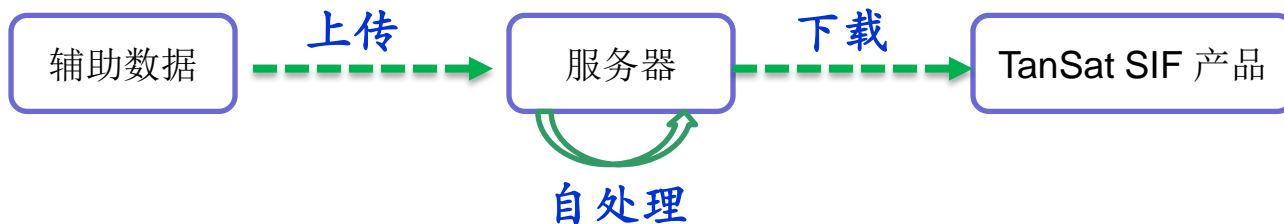
TanSat and OCO-2 SIF for the overlapping orbit on April 20, 2017.

利用NDVI计算变异系数表征网格内地表的异质性，选取地表均匀的数据进行定量比较，发现：
1) TanSat的SIF与OCO-2的SIF产品具有很好的线性关系；
2) 与VIs的一致性表明TanSat SIF可以较好地表征地表植被生产力，相较于NDVI，EVI与TanSat SIF的线性关系更好。

3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

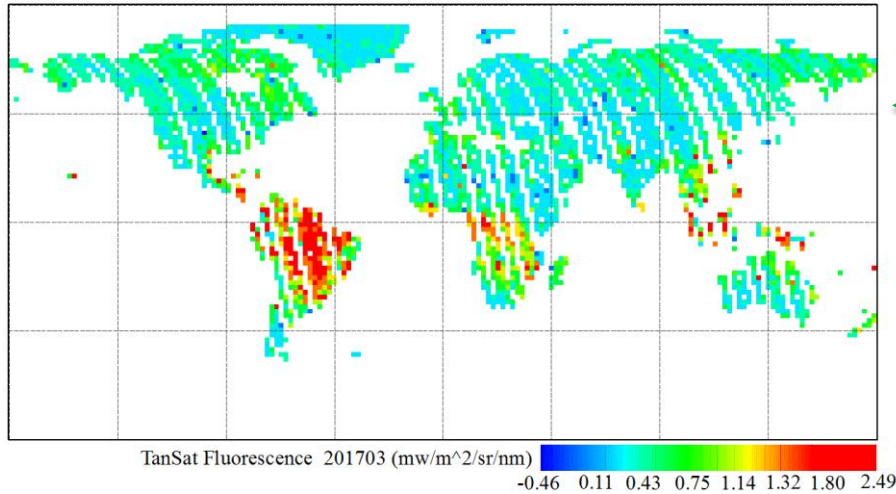


TanSat SIF 产品处理流程



3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

- TanSat SIF 时序月值产品

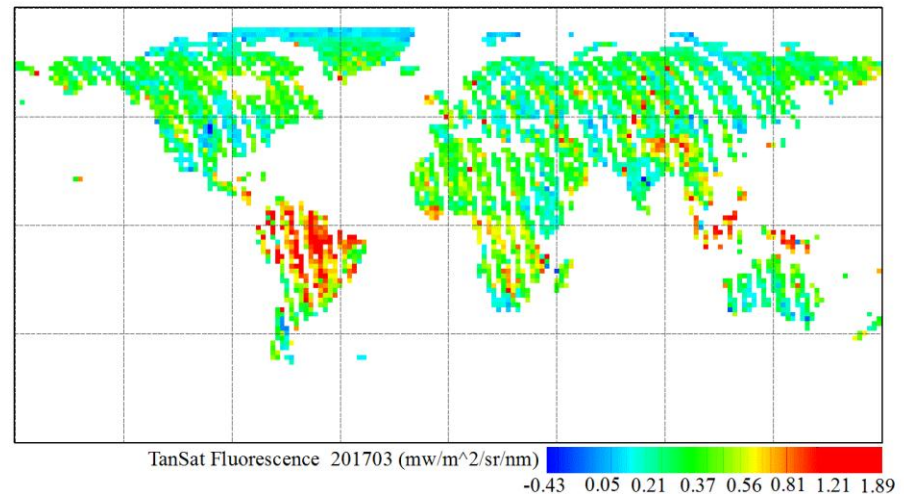


TanSat SIF_758nm

TanSat SIF_771nm

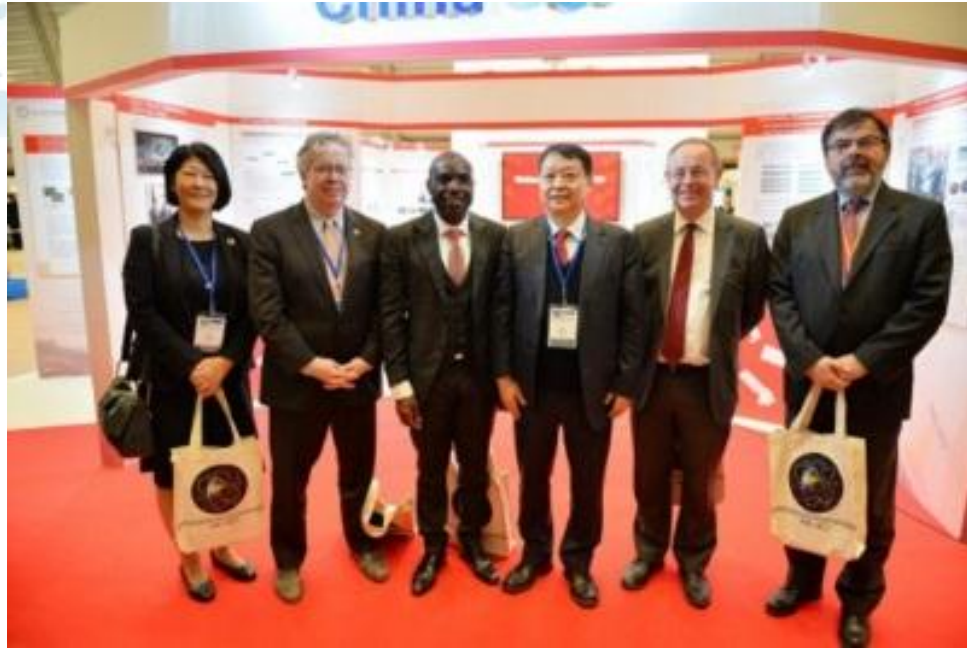
注：月值全球产品的SIF_771nm均值的比SIF_758nm的量级小1.3-1.7倍左右，这是由757nm的荧光值约为771nm荧光的1.5倍左右决定的。

Du SS, Liu LY et al. First global terrestrial solar-induced chlorophyll fluorescence mapping from TanSat satellite observations: algorithm and product assessment. Science Bulletin.



3、TanSat 荧光卫星反演与产品生产

► TanSat 荧光产品作为两个代表性成果之一亮相GEO



GEO第15届全会

2018.10.29-11.2 日本京都

科技部副部长黄卫
向GEO主要代表赠
送中国地球观测数
据集成果

黄卫副部长与GEO其他三位联合主席、秘书处主任及日本主办方代表共同参观了我国展区，并向各位代表赠送了科技部最新发布的国际首套2017年**30米分辨率全球土地覆盖数据集**与2017年全球大气二氧化碳监测科学试验卫星（**TanSat**）**全球叶绿素荧光数据集**。

4、FY3D 荧光卫星反演初探

2017年11月15日发射FY3D卫星，将接替B星作为我国太阳同步下午轨道天基气象观测的主业务卫星，与FY3C共同组网进一步强化我国极轨气象卫星。

FY3D卫星搭载的仪器

中分辨率光谱成像仪

近红外高光谱温室气体检测仪

微波温度计

微波湿度计

微波成像仪

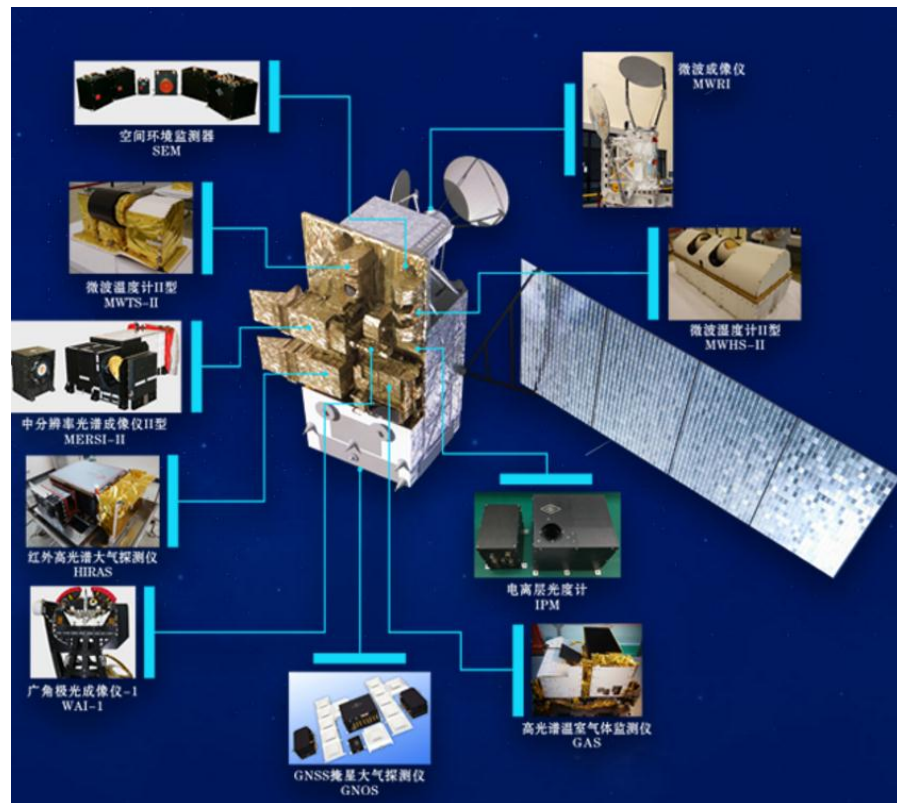
红光高光谱大气探测仪

广角极光成像仪

电离层光度计

空间环境监测仪器

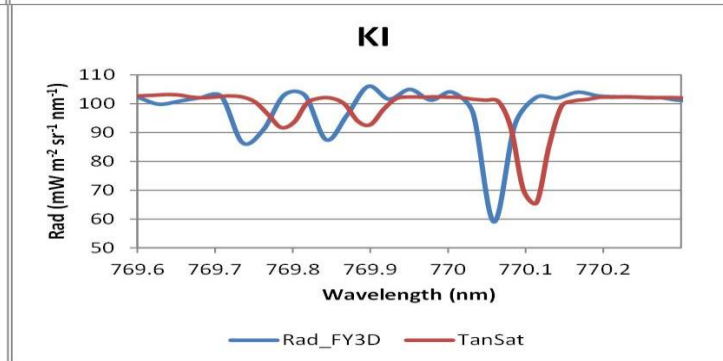
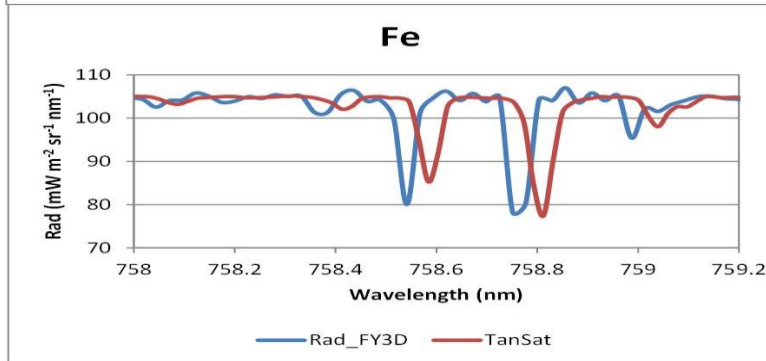
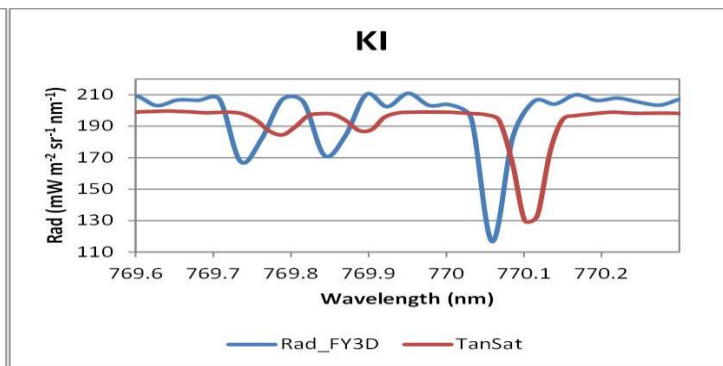
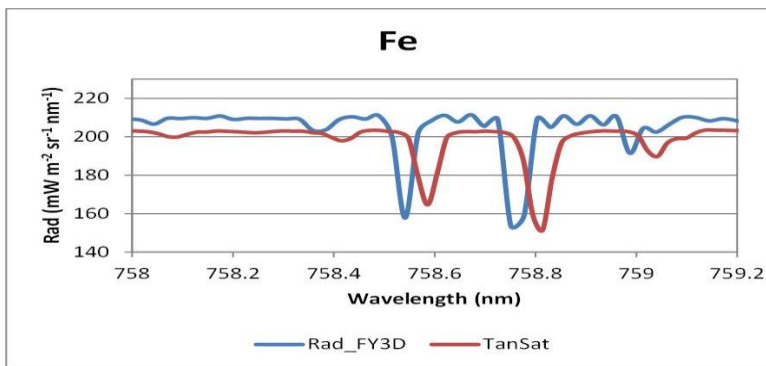
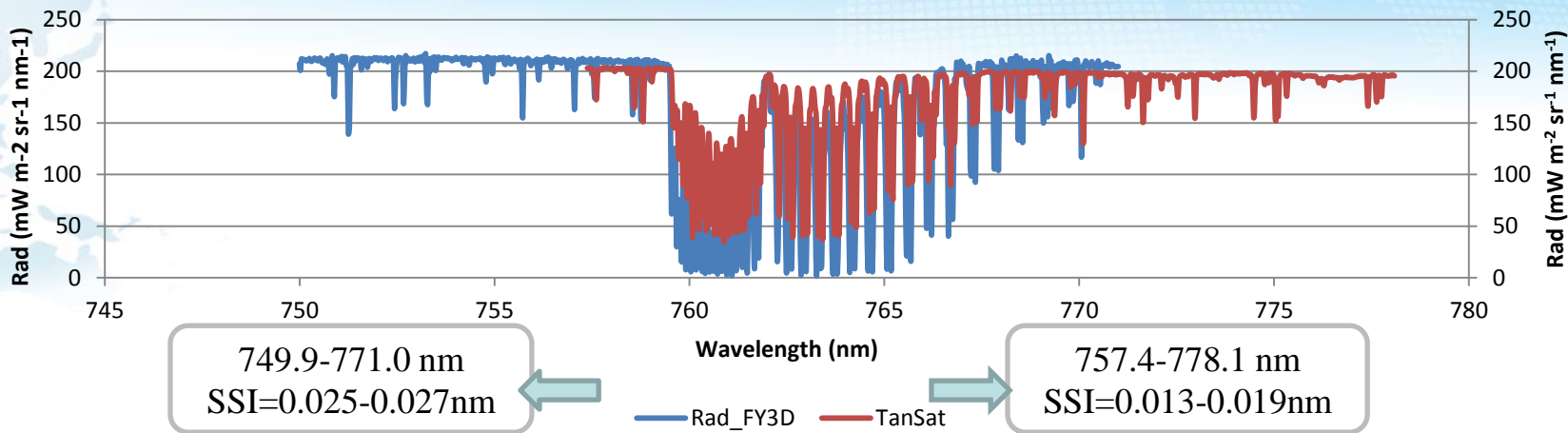
全球导航卫星掩星探测仪



4、FY3D 荧光卫星反演初探

FY_3D ND数据介绍

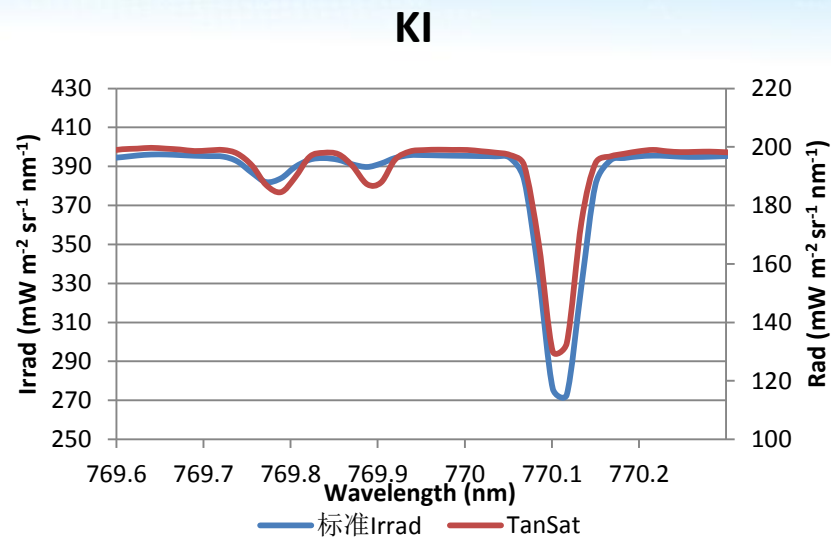
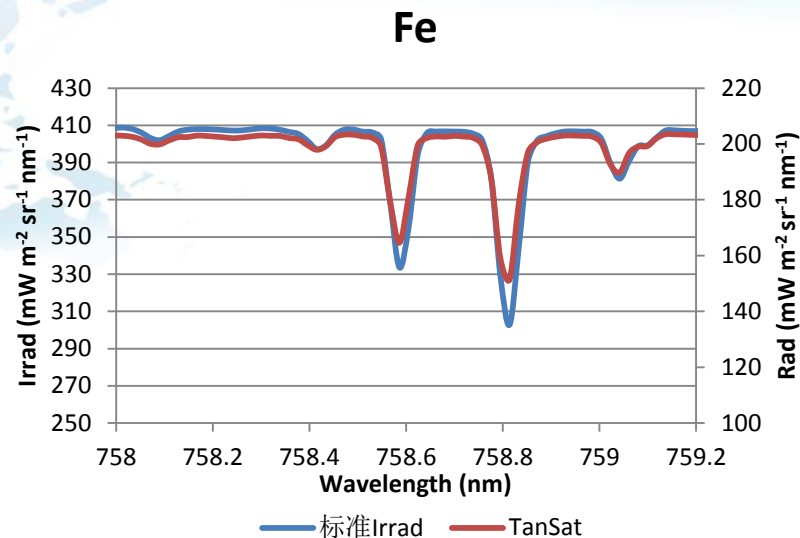
FY3D与TanSat光谱比较



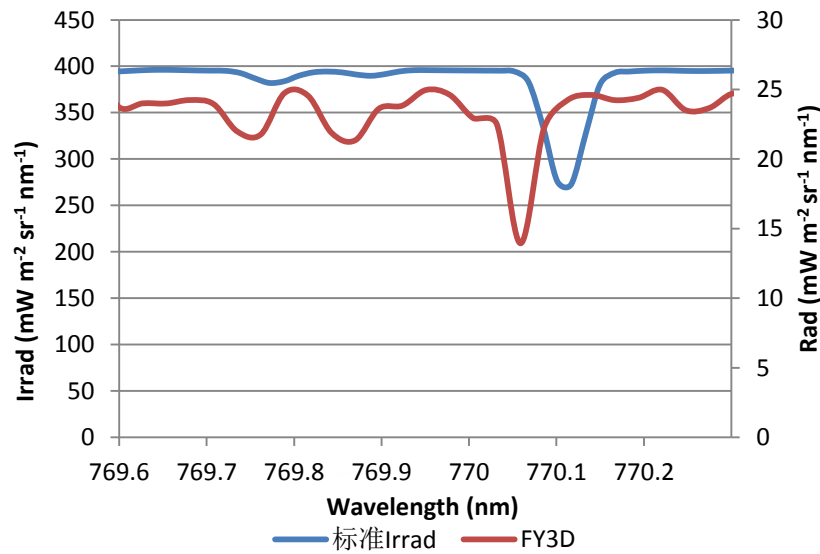
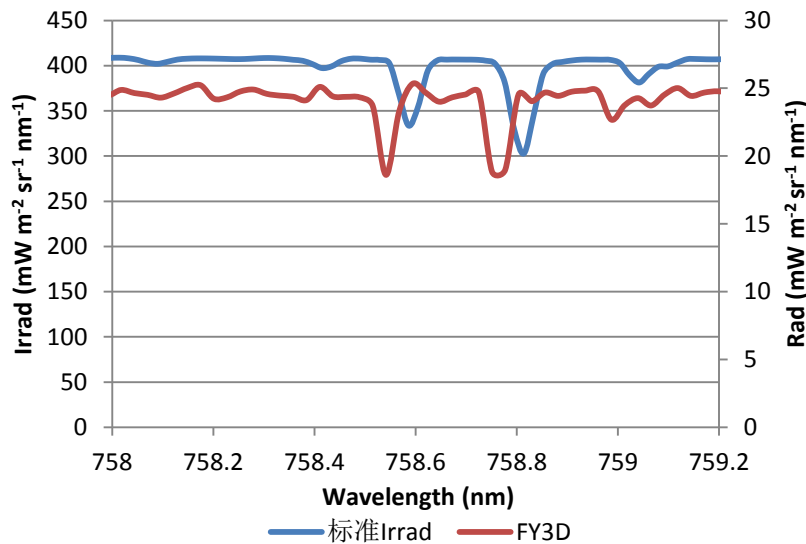
4、FY3D 荧光卫星反演初探

• FY3D、Tansat与标准Irrad对比

TanSat



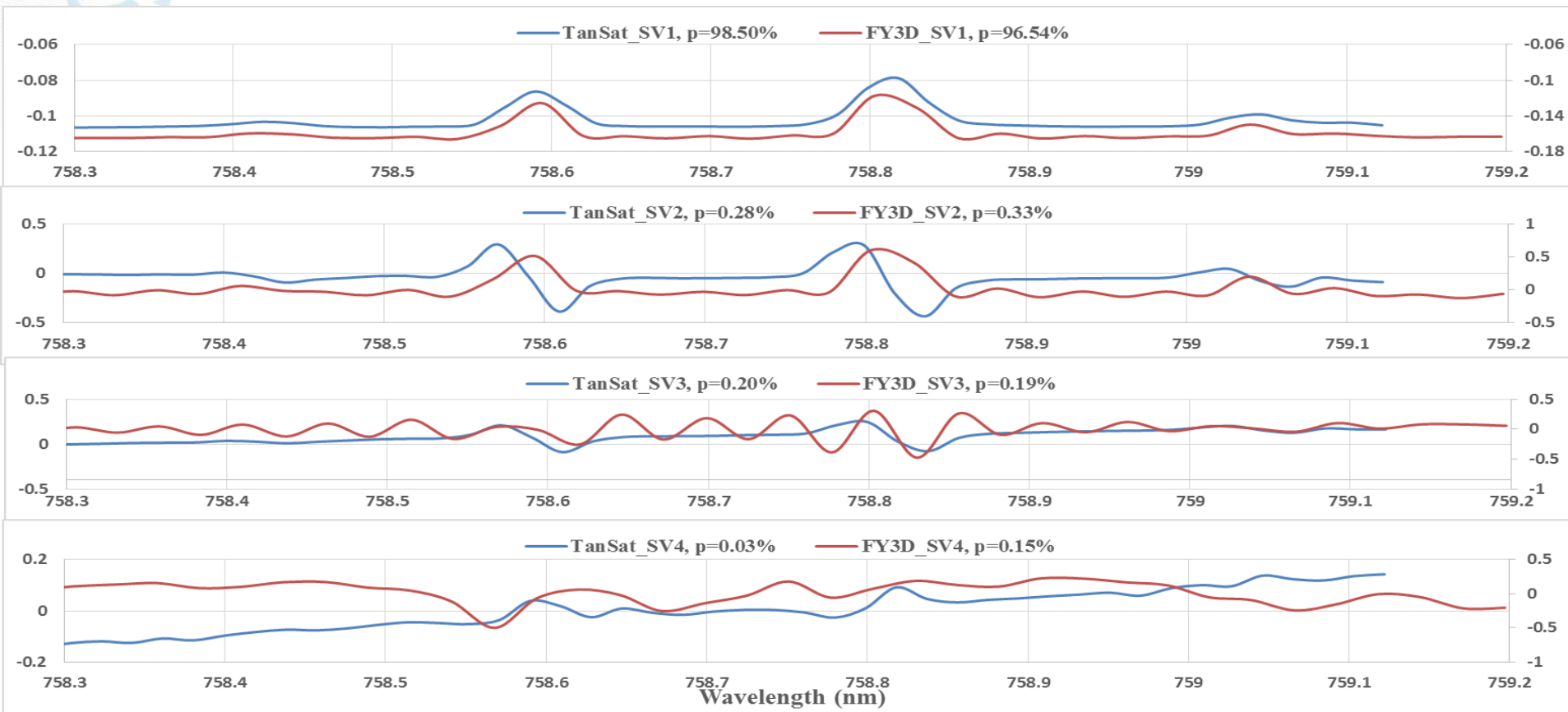
FY3D



4、FY3D荧光卫星反演初探

• FY3D与Tansat的SVD分解结果对比-以Fe吸收线为例

基于FY3D光谱数据与太阳光谱的吸收线的位置匹配，将FY3D光谱数据作光谱线性校正，选取训练样本，进行奇异值分解，结果如下：

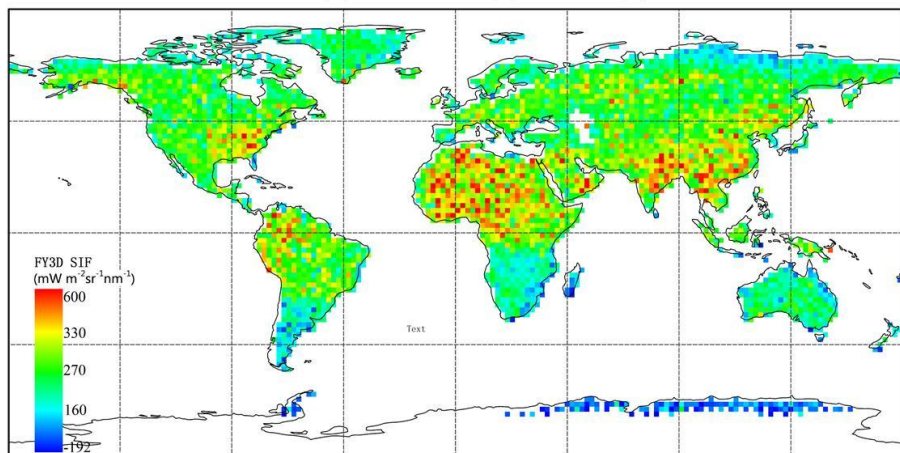


TanSat前四个奇异向量的贡献率>99%;FY3D前四个奇异向量的贡献率>97%。按照算法选取准则，TanSat的前四个主成分可以很好地重构非荧光光谱形状结构；而FY3D由于本身波谱的强烈波动，其产生的奇异向量的波动性很大，奇异向量无法重构光谱。

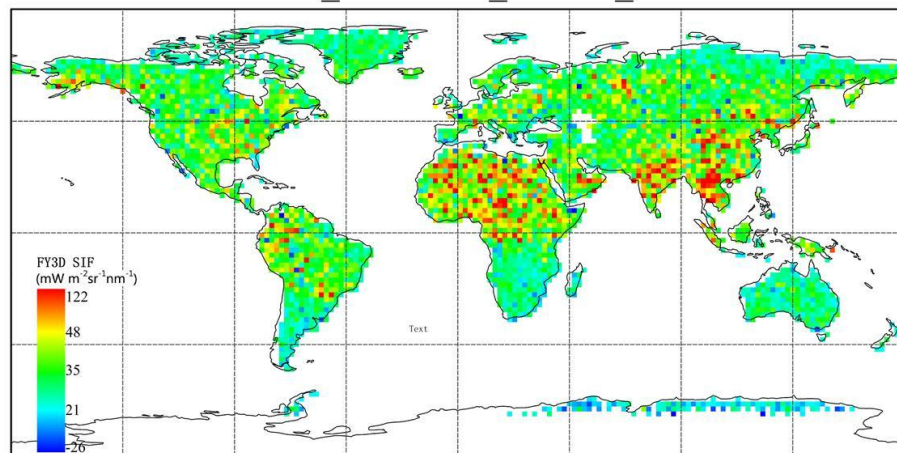
4、FY3D 荧光卫星反演初探

• FY3D的荧光反演结果

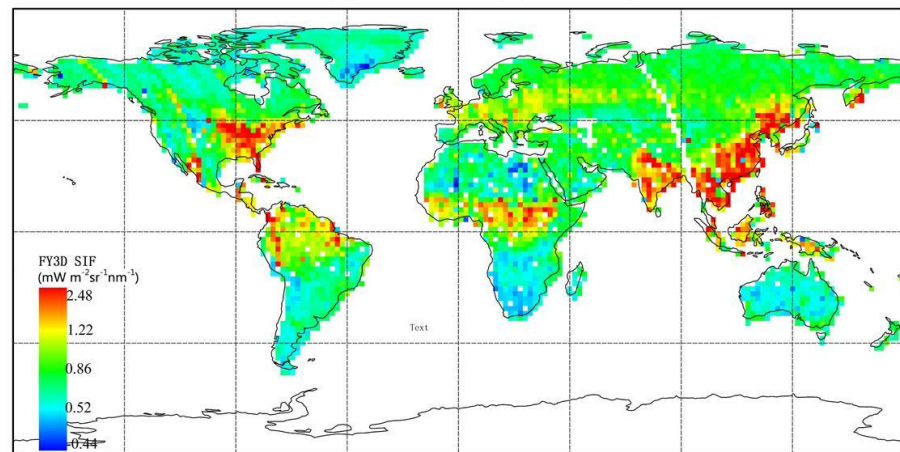
FY3D_GlobalSIF_201808_Fe



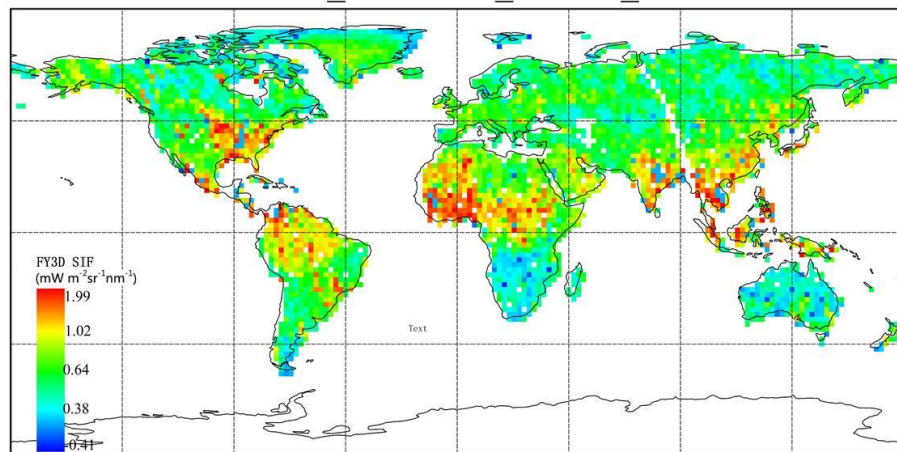
FY3D_GlobalSIF_201808_KI



TanSat_GlobalSIF_201808_Fe



TanSat_GlobalSIF_201808_KI



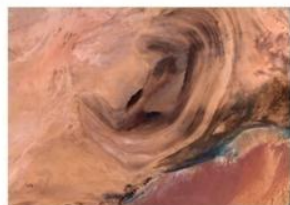
无论是从空间分布还是从荧光反演绝对值角度看，FY3D的荧光反演结果均存在很大的问题。FY3D_GAS数据质量有待提高！



Lesson from TanSat and FY-3D

信噪比是制约国产卫星遥感应用的瓶颈问题，
 $SNR > 200$ @ $10 \text{ mW/m}^2/\text{nm}/\text{sr}$ 是叶绿素荧光
反演的必要条件！

谢谢！



叶绿素荧光，植被光合直接遥感探测的新方法！

中国科学院遥感与数字地球研究所

地址：北京市海淀区邓庄南路9号（100094）

电话：86-10-82178008 传真：86-10-82178009

邮箱：office@ceode.ac.cn

网址：www.radi.cas.cn