



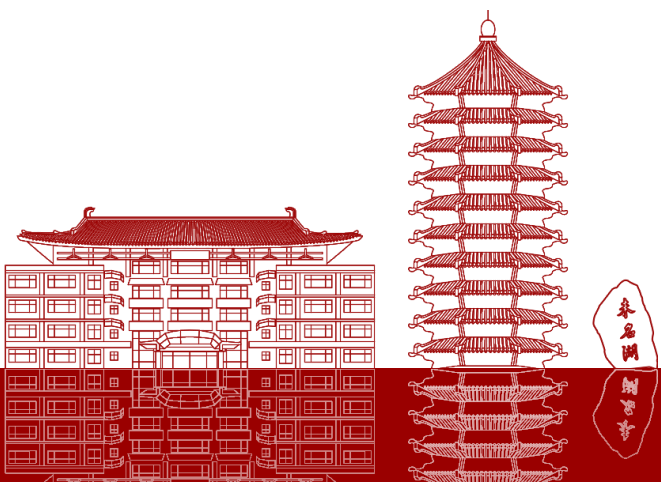
遥感吸收光合有效辐射比例

范闻捷

fanwj@pku.edu.cn

北京大学遥感与地理信息系统研究所

2020年7月8日11:10-12:20





主要内容

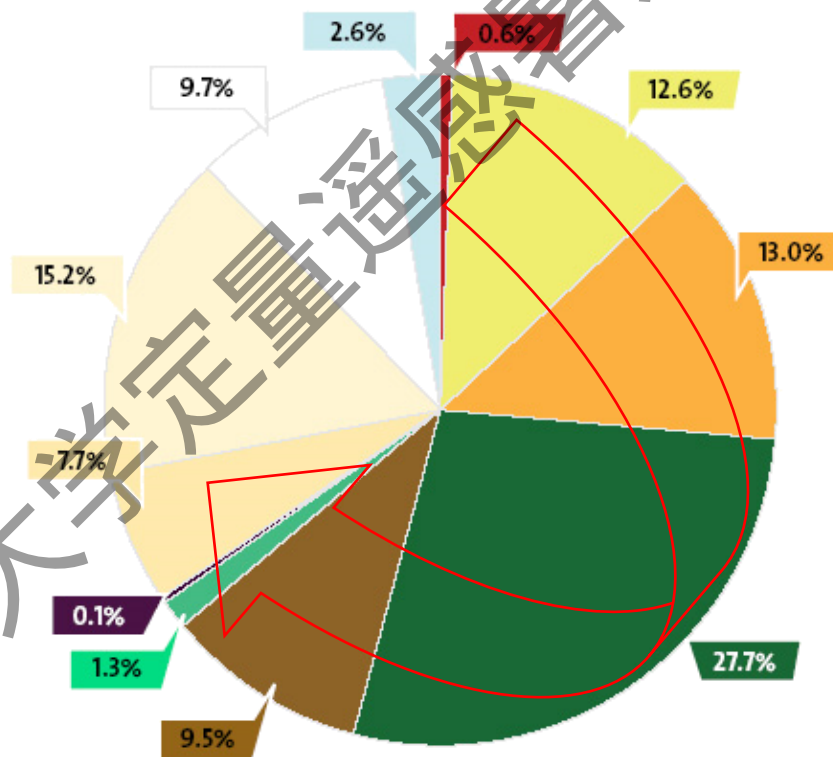
1. 概述
2. FAPAR野外测量
3. FAPAR 经验反演方法
4. 代表性遥感FAPAR反演算法简介
5. FAPAR产品与反演精度



概述——研究意义

植被——陆地表面最重要的土地覆盖类型

Land Cover types	Label
Artificial Surfaces	01
Cropland	02
Grassland	03
Tree Covered Areas	04
Shrubs Covered Areas	05
Herbaceous vegetation, aquatic or regularly flooded	06
Mangroves	07
Sparse vegetation	08
Baresoil	09
Snow and glaciers	10
Water bodies	11

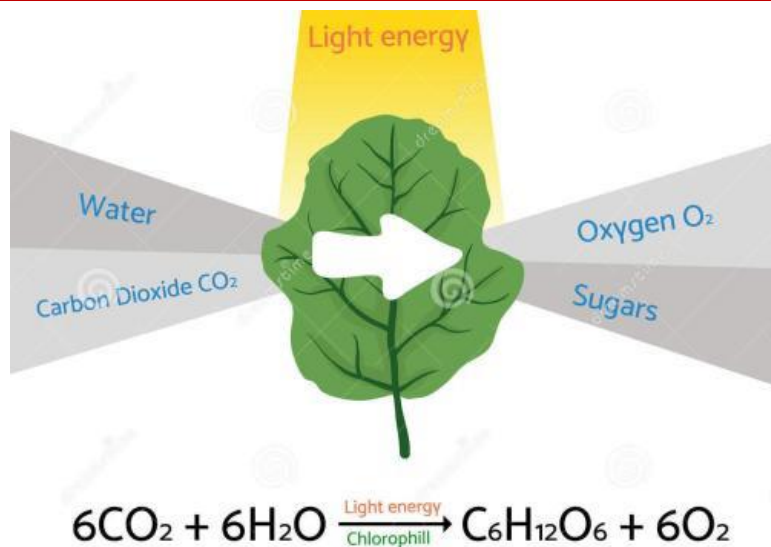


<http://www.fao.org/> (Mar-17-2014)



Table 1 – GLC-SHARE land cover legend

概述——研究意义



- 光合有效辐射吸收比例。（The fraction of absorbed photosynthetically active radiation, FAPAR）是表征植被生长状态的关键参数，影响着植被许多生理过程，如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获量估算等

生产力估算



植被监测



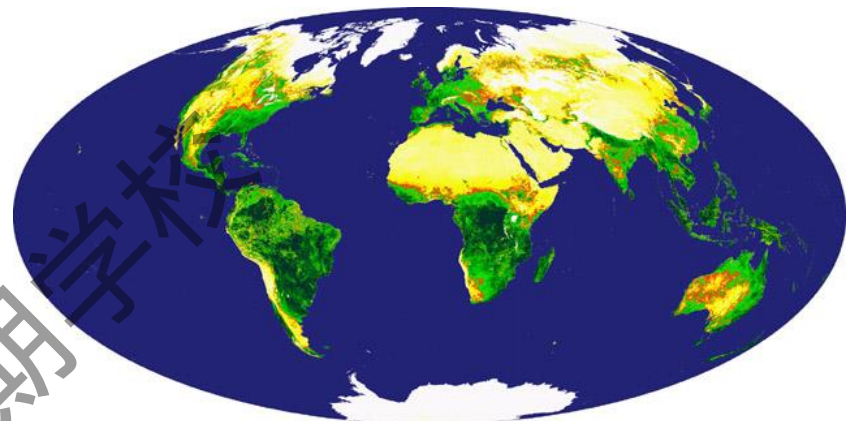
气候变化



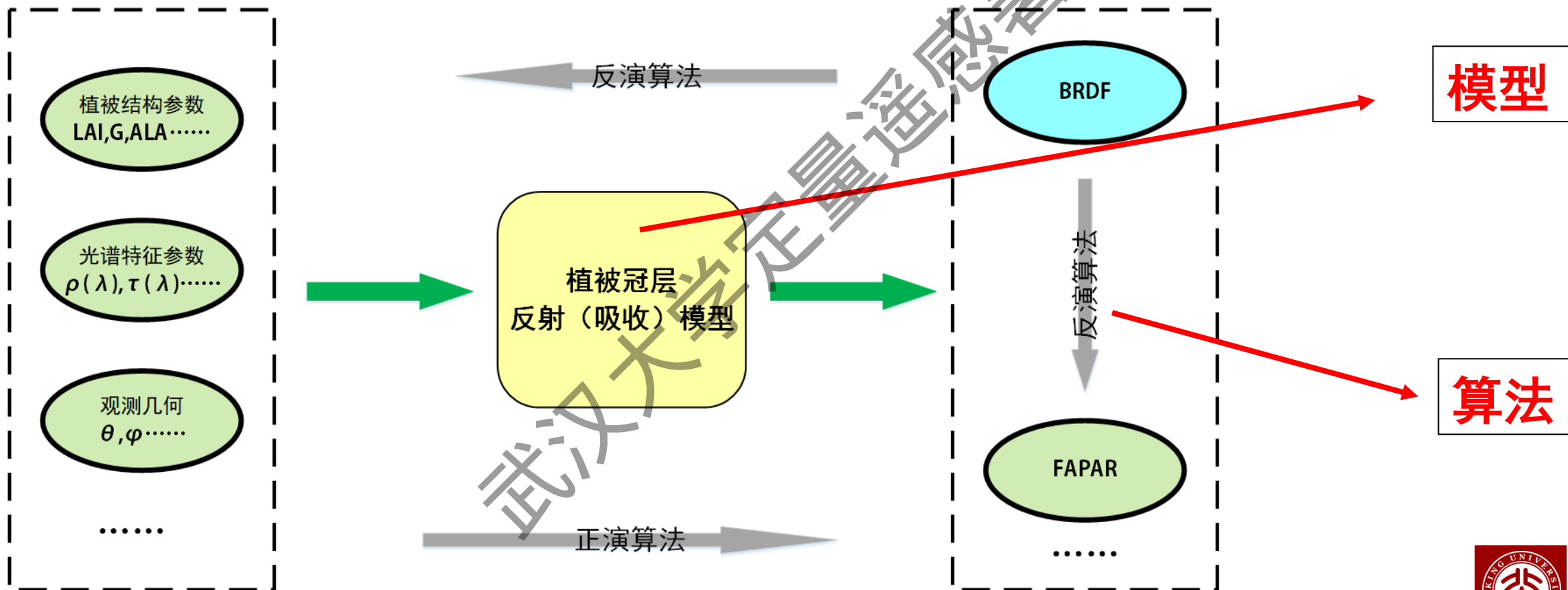
干旱



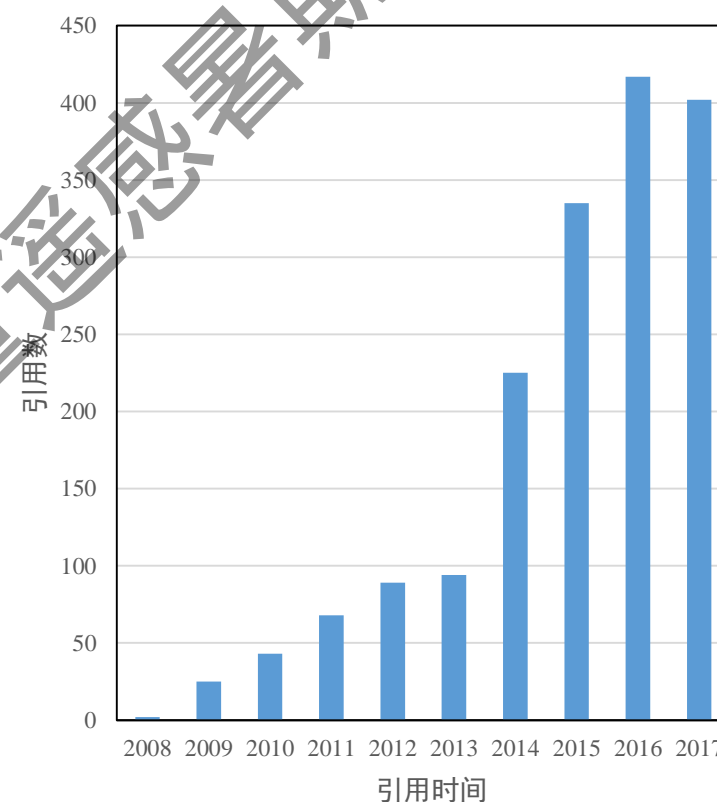
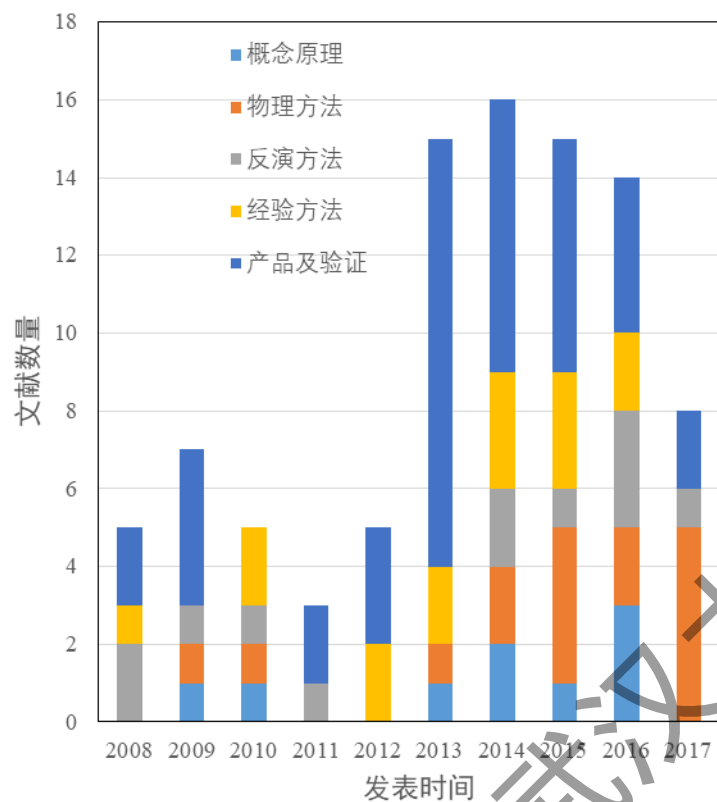
概述——研究意义



遥感是获取大范围、长时间序列FAPAR的唯一途径



概述



(a) 2008年-2017年SCI收录的FAPAR研究相关文献

(b) 2008年-2017年发表的FAPAR相关文献引用情况

图1 2008-2017年SCI收录的FAPAR研究相关文献及引用情况



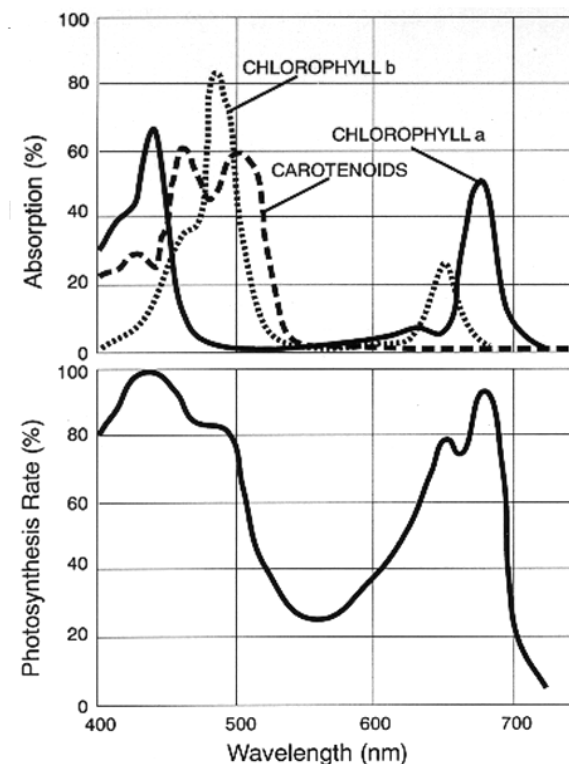
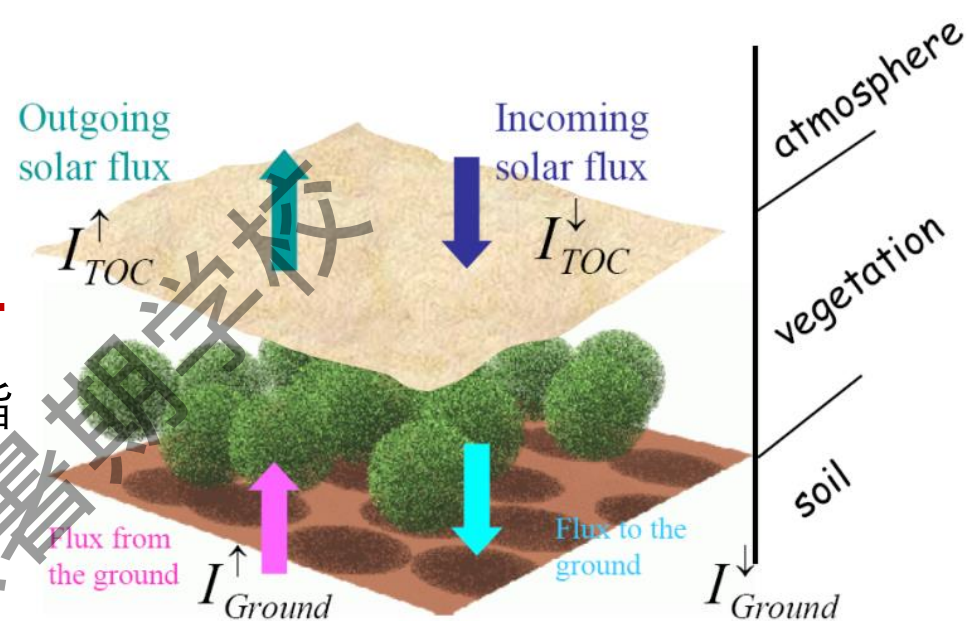
概述——基本概念

- PAR(photosynthetically Active Radiation), 光合有效辐射, 指陆地植被光合作用所能吸收的从400到700 nm的太阳辐射能量。
- APAR(absorbed photosynthetically Active Radiation)吸收光合有效辐射, 植被冠层吸收的参与光合生物量累积的光合有效辐射部分。
- FAPAR(Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation)吸收光合有效辐射比例, 植被吸收的光合有效辐射(PAR)占入射太阳辐射的比例。

- $APAR = FAPAR \times PAR$

$$GPP = \varepsilon \times FPAR \times PAR$$

$$FAPAR = (I_{TOC}^{\downarrow} - I_{Ground}^{\downarrow} + I_{Ground}^{\uparrow} - I_{TOC}^{\uparrow}) / I_{TOC}^{\downarrow}$$



概述——基本概念

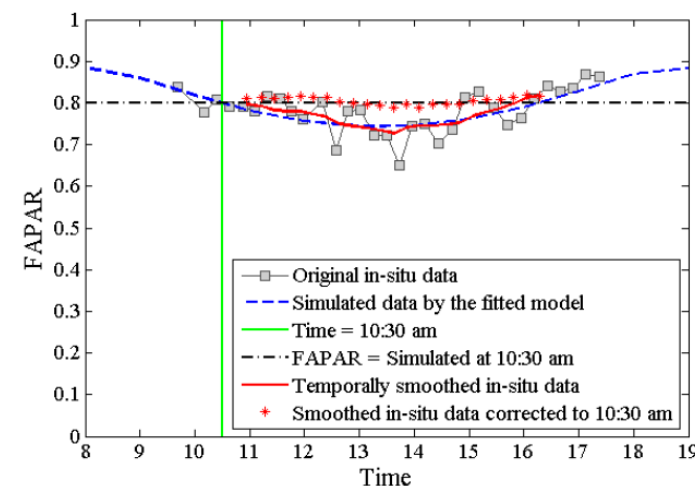
(田定方等, 遥感学报, in press)



黑空FAPAR

白空FAPAR

- 黑空FAPAR: 植被对直射光光合有效辐射的吸收比率。
- 白空FAPAR: 植被对天空散射光光合有效辐射吸收的FAPAR。
- 蓝空FAPAR: 同时考虑直射光、天空散射光光合有效辐射吸收得到的FAPAR (Liu et al., 2018)。
- 瞬时FAPAR: 某一时刻植被对光合有效辐射的吸收比率, 一般由遥感图像直接反演得到的FAPAR都是瞬时FAPAR。
- 日均FAPAR: 一天不同时刻的植被吸收的光合有效辐射比例的平均值。



Wang et al., 2016



概述——基本概念

(田定方等, 遥感学报, in press)

- **FAPAR**: 植被冠层对光合有效辐射的吸收比率 ($FAPAR_{\text{canopy}}$)
- **$FAPAR_{\text{foliage}}$ ($FAPAR_{\text{green}}$)**: 植被中的绿色叶片对光合有效辐射的吸收比率 (Braswell et al., 1996)

$$FAPAR_{\text{foliage}} = FAPAR_{\text{canopy}} - FAPAR_{\text{wood}}$$

- **$FAPAR_{\text{chl}}$** : 植被中叶绿素对光合有效辐射的吸收比率 (Zhang et al., 2005)

$$FAPAR_{\text{chl}} = FAPAR_{\text{foliage}} - FAPAR_{\text{non-chl}}$$





主要内容

1. 概述
2. FAPAR野外测量
3. FAPAR 经验反演方法
4. 代表性遥感FAPAR反演算法简介
5. FAPAR产品与反演精度

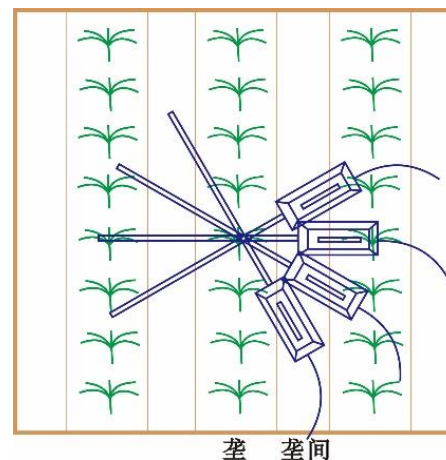


FAPAR野外测量

- SUNSCAN冠层分析系统 (SUNSCAN Canopy Analysis System)
- ACCUPAR 植物群体分析仪



SUNSCAN探测器
漫射系数传感器
(Beam fraction
Sensor, BFS)
DCT1型掌上电脑
(The Work-about)
一个三脚支架



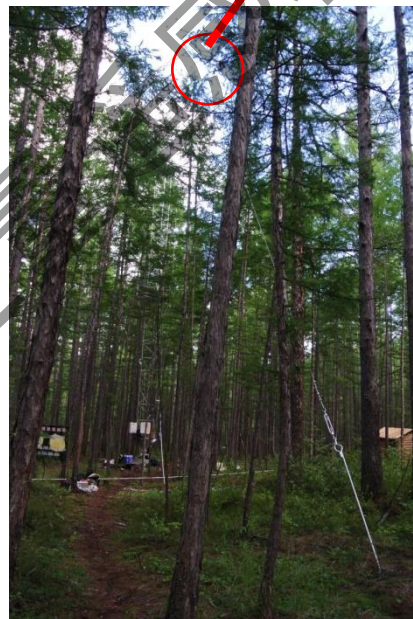
$$FAPAR = (I_{TOC}^{\downarrow} - I_{Ground}^{\downarrow} + I_{Ground}^{\uparrow} - I_{TOC}^{\uparrow}) / I_{TOC}^{\downarrow}$$

FAPAR野外测量

- 无人机与塔基观测 (zhao et al., 2016)



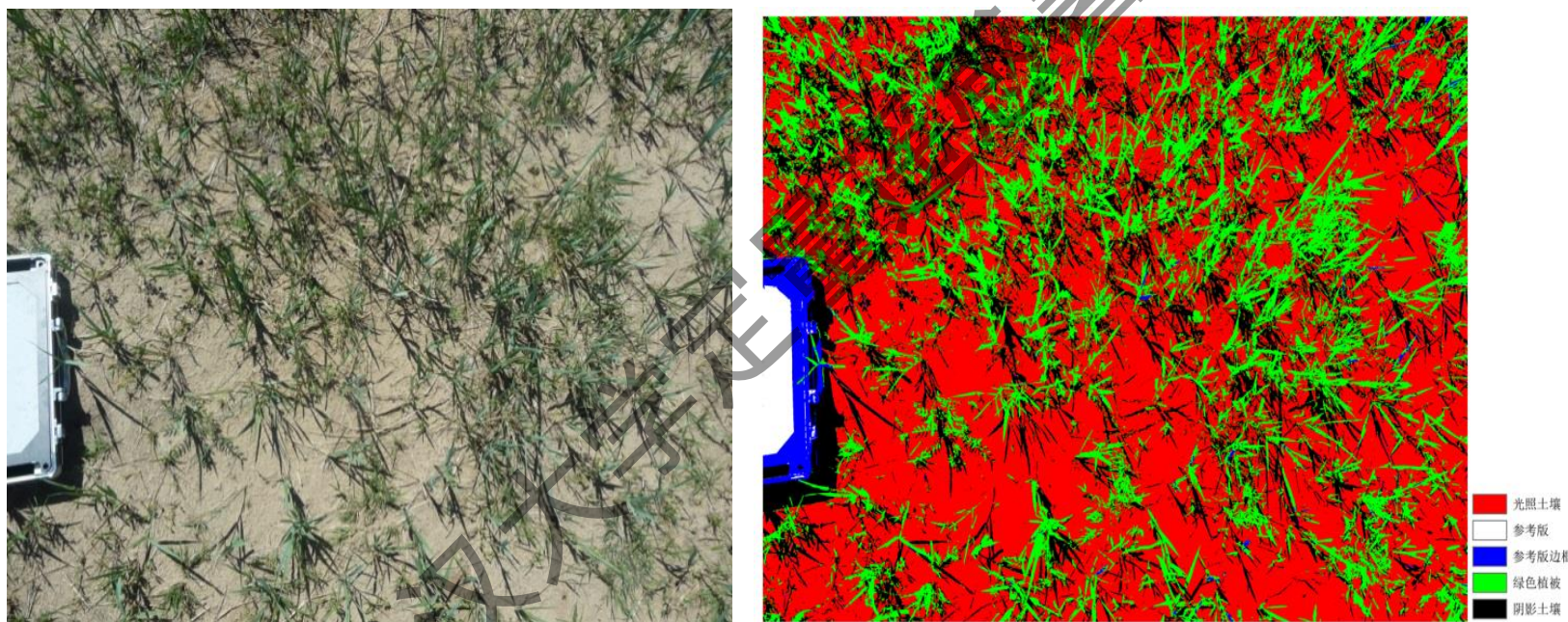
PQS1光量子辐射表传感器



林下Sunscan同步测量

FAPAR野外测量

- 低矮植被(如冠层高度小于20cm)(Liu et al., 2013)



利用数字相机，获取垂直向下照片，照片内放置一个参考板。由于参考板反射率已知，可以近似推算冠层FAPAR计算相关的冠层表面入射、反射PAR和土壤背景表面入射、反射PAR，计算得到FAPAR。

主要内容

1. 概述
2. FAPAR野外测量
3. FAPAR 经验反演方法
4. 代表性遥感FAPAR反演算法简介
5. FAPAR产品与反演精度

FAPAR经验反演方法

- 基于LAI的经验反演方法

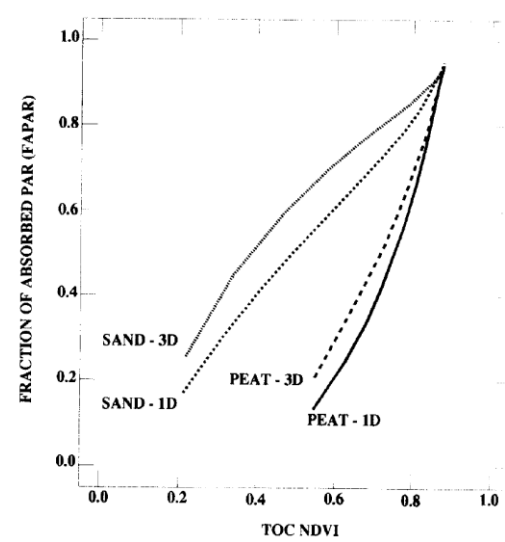
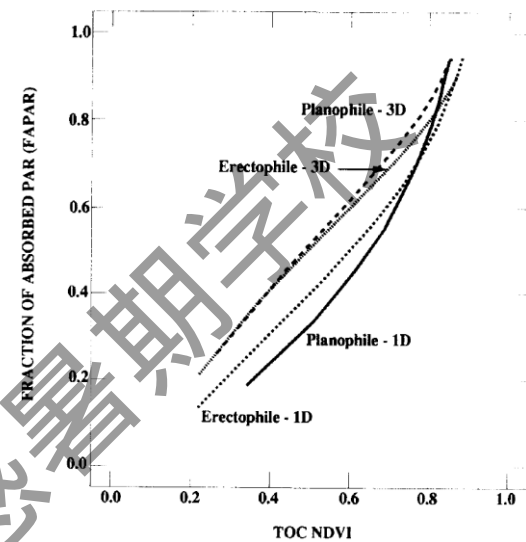
$$FPAR = 1 - e^{-K \times LAI}$$

- 基于与植被指数建立经验关系

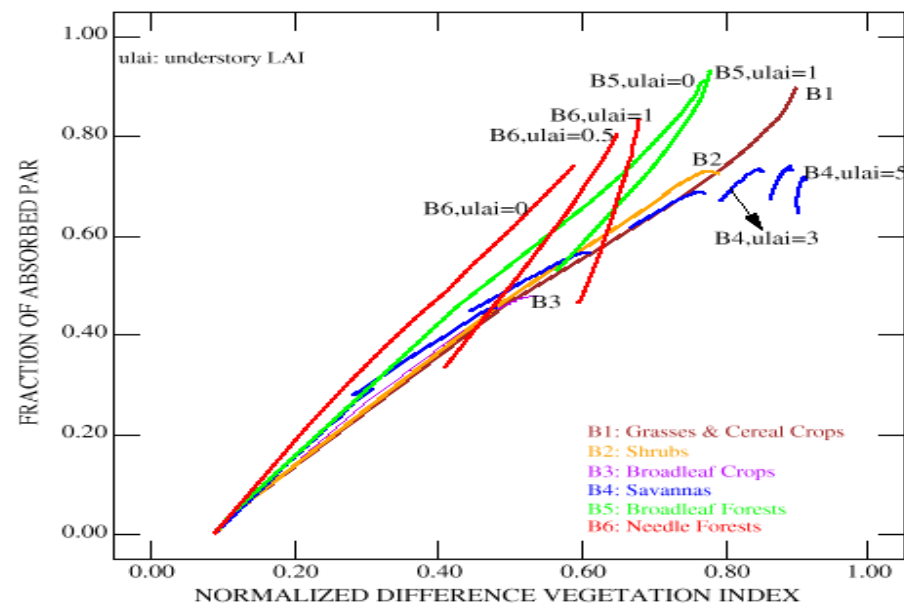
$$FAPAR = \min((SR - SR_{\min}) / (SR_{\max} - SR_{\min}), 0.95)$$

CASA 模型

$$FAPAR = 1.2 \times NDVI - 0.18$$



Myneni & Williams, 1994



基于植被指数或LAI的FAPAR不同算法（高彦华，2007）

算法	R ²	取得经验值方法	植被类型	参考文献
$FAPAR=1.2 \times NDVI-0.18$	0.974	PAR 测量	春小麦，生长阶段	Hatfield et al.,1984
$FAPAR=0.6-(2.2 \times NDVI)+(2.9 \times NDVI^2)$	-	PAR 测量	玉米，生长阶段	Gallo et al.,1985
$FAPAR=1.408 \times NDVI-0.396$	0.92	PAR 测量	Alfalfa	Pinter,1993
$FAPAR=1.25 \times NDVI-0.025$	-	Max/Min	热带雨林/沙漠	Ruimy et al.,1994
$FAPAR=0.279 \times SR-0.294$	-	Max/Min	冬季Alaska/理论最大值	Helman and Keeling,1989
$FAPAR=0.171 \times SR-0.186$	-	Max/Min	高植被/沙漠	Sellers et al.,1994
$FAPAR=0.248 \times SR-0.268$	-	Max/Min	矮植被/沙漠	Sellers et al.,1994
$FAPAR=1.24 \times NDVI-0.23$	-	1D辐射传输方程	-	Breret et al.,1989
$FAPAR=1.164 \times NDVI-0.143$	0.92	1D辐射传输方程	-	Myneni and Williams,1994
$FAPAR=1.21 \times NDVI-0.04$	0.99	1D辐射传输方程	-	Goward et al.,1994
$FAPAR=1.67 \times NDVI-0.08$	-	1D辐射传输方程	-	Prince and Goward,1995
$FAPAR=0.105-(0.323 \times NDVI)+(1.168 \times NDVI^2)$	0.85	1D辐射传输方程	-	Moreau and Li,1996
$FAPAR=3.257 \times SAVI-0.07$	0.86	1D辐射传输方程	-	Moreau and Li,1996
$FAPAR=0.846 \times NDVI-0.08$	0.92	3D辐射传输方程	稀疏植被	Myneni et al.,1992
$FAPAR=1.723 \times MSAVI-0.137$	0.968	3D辐射传输方程	热带稀疏草原植被	Begue and Myneni,1996
$FAPAR=2.213 \times (\Delta MSAVI)^{**}$	0.931	3D辐射传输方程	热带稀疏草原植被	Begue and Myneni,1996
$FAPAR=1.71 \times (\Delta NDVI)^{**}$	0.931	3D辐射传输方程	热带稀疏草原植被	Begue and Myneni,1996
$FAPAR=1-e^{(LAI(-K))}$	-	比尔朗伯定律	-	Gower et al.,1999
$FAPAR=\min(\frac{SR-SR_{min}}{SR_{max}-SR_{min}},0.95)$ 其中: $SR=(1+NDVI)/(1-NDVI)$	-	CASA 模型	-	Potter et al.,1993

$\Delta^{**}i$ 为初始和最终 植被指数之差



FAPAR和常见植被指数的FAPAR经验算法(2008-2019 (田定方等, 遥感学报, in press))

指数形式 [◊]	FAPAR 和指数的关系 [◊]	主要文献 [◊]
$MTVI2 = \frac{1.5 \times [1.2 \times (b_{NIR} - b_G) - 2.5 \times (b_R - b_G)]}{\sqrt{(2b_{NIR} + 1)^2 - (6b_{NIR} - 5\sqrt{b_R}) - 0.5}}$	$FPAR = a - [(b - MTVI2)/c]^d$	Liu et al., 2008 [◊]
$OSAVI = \frac{1.16 \times (b_{NIR} - b_R)}{b_{NIR} + b_R + 0.16}$	$FPAR = a + bOSAVI$	Liu et al., 2008 [◊]
$VARI = \frac{b_G - b_R}{b_G + b_R - b_B}$	$FPAR = a + bVARI$	Cristiano et al., 2010 [◊]
$MTCI = \frac{b_{753.75} - b_{708.75}}{b_{708.75} - b_{681.25}}$	$FPAR_{chl} = a + bMTCI$	Ogutu & Dash, 2013 [◊]
$GNDVI = \frac{b_{800} - b_{550}}{b_{800} + b_{550}}$	$FPAR = a \times e^{bGNDVI}$	Tan et al., 2013 [◊]
$NDVI^* = \frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_S - NDVI_0}$	$FPAR = a + bNDVI^*$	Tan et al., 2013 [◊]
$WDRVI_{green} = \frac{0.3b_{NIR1} - b_G}{0.3b_{NIR1} + b_G} \times \frac{1 - 0.3}{1 + 0.3}$	$FPAR_{chl} = a + bWDRVI_{green}$	Zhang et al., 2014c [◊]
$CI_{green} = \frac{b_{NIR1}}{b_{GREEN}} - 1 \times \frac{b_{NIR1}}{b_{GREEN}} - 1$	$FPAR_{chl} = a + bCI_{green}$	Zhang et al., 2014c [◊]



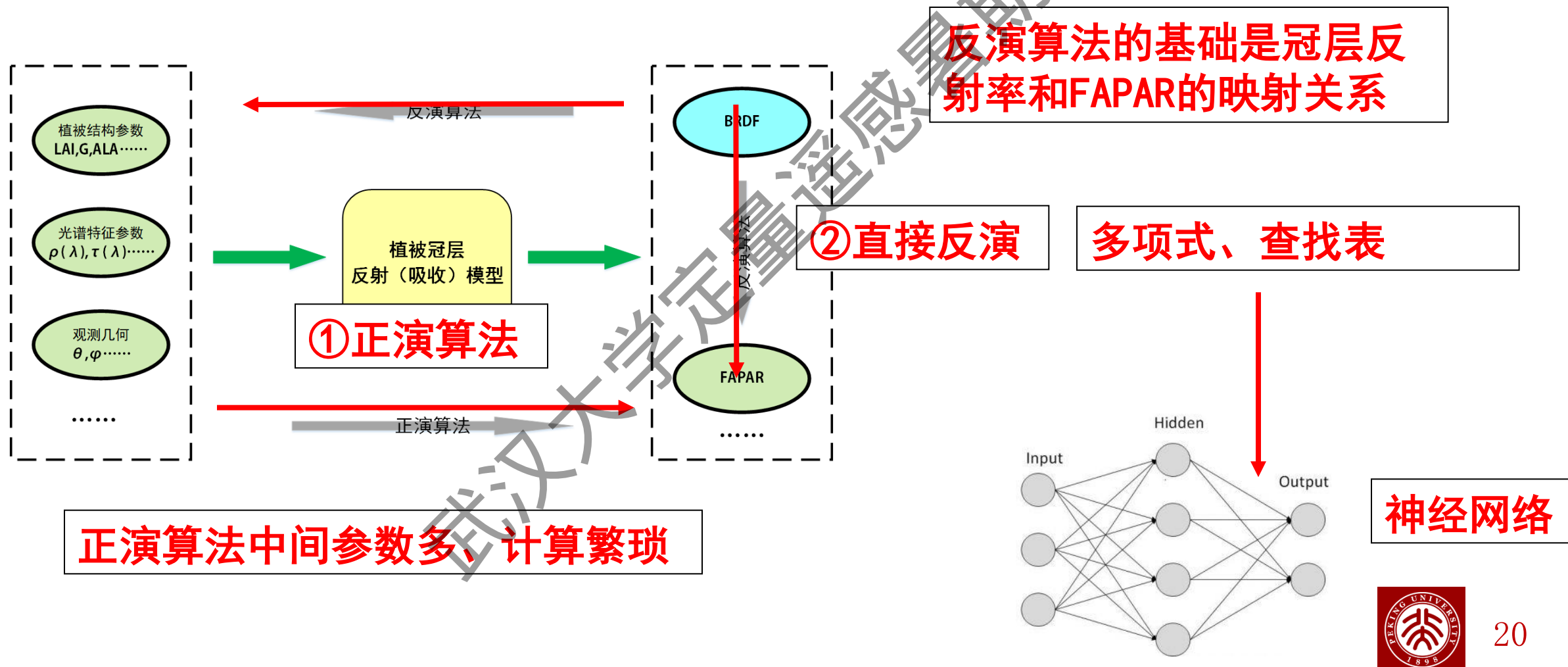
主要内容

1. 概述
2. FAPAR野外测量
3. FAPAR 经验反演方法
4. 代表性遥感FAPAR反演算法简介
5. FAPAR产品与反演精度

代表性遥感FAPAR反演算法

- MODIS FAPAR反演算法
- JRC_FAPAR反演算法
- GLASS FAPAR产品反演算法
- SENTINEL-2 FAPAR产品反演算法

代表性遥感FAPAR反演算法——概述



代表性遥感FAPAR反演算法——MODIS

- 基于三维辐射传输模型 (Knyazikhin et al., 1998; Myneni et al., 1997)

- 将植被类型分为六类

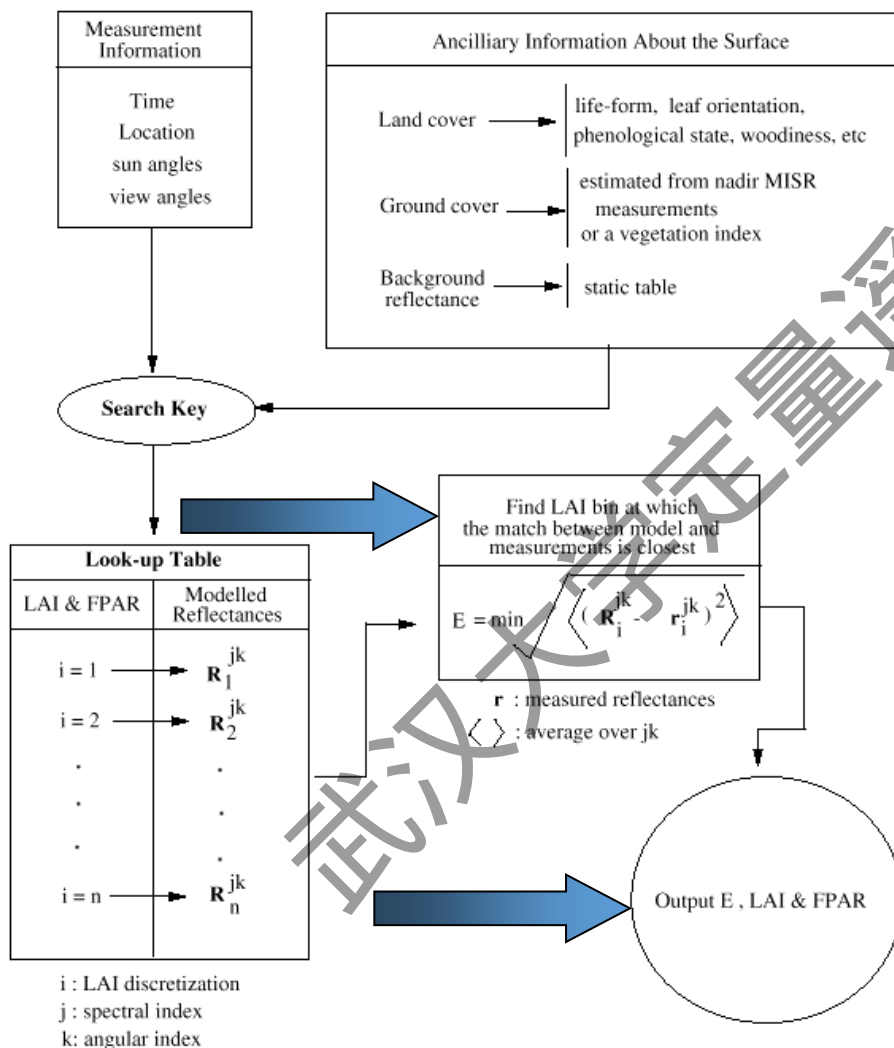
- grasses & cereals
- shrubs
- broadleaf crops
- savanna
- broadleaf forest
- needle forest

	草地和谷 类作物	灌木类	阔叶作 物	草原	阔叶林	针叶林
水平均一 地面覆盖度	否 100%	是 20-60%	不确定 10-100%	是 20-40%	是 >70%	是 >70%
竖直均一 (叶子光谱 和叶倾角)	否	否	否	是	是	是
茎/树干	否	否	否	绿色茎	是	是
下层植被	否	否	否	草地	是	是
植被群聚	轻度 (minimal)	随机 (random)	中度 (regular)	轻度 (minimal)	重度 (sever)	重度 (severe)
冠层阴影	无	部分	无	无	有	有
背景亮度	中度	亮	暗	中度	暗	暗



代表性遥感FAPAR反演算法——MODIS

Look-up Table Based Approach to LAI & FPAR Estimation From Remote Observations



- 当LAI > 5 时，由于LAI 饱和原因，地表反射率对LAI/FAPAR 不敏感，此时只能用该算法。
- 当输入反射率数据的不确定性过大或由于模型构建错误导致不正确的模型BRF 时，三维辐射传输模型算法失效
- 采用备份算法(LAI/FPAR-NDVI 经验关系)

代表性遥感FAPAR反演算法——MODIS

- MODIS Collection 5 FAPAR 产品对算法进行细化，阔叶林和针叶林类被分为落叶和常绿两个亚类。
- 对8种植被类型的FAPAR 查找表算法进行了细化。利用新的随机辐射传输模型可以更好地表达或展示冠层结构以及木本植被类型固有的空间异质性。
- 新的查找表的参数设定保持模型模拟与实测的地表反射率一致，以尽量减少反演异常(高估并且在中等或稠密植被区反演算法失败)，以及LAI 和FAPAR 反演的不一致(在稀疏植被区，LAI 反演正确但FAPAR 高估)。

代表性遥感FAPAR反演算法——JRC_FAPAR

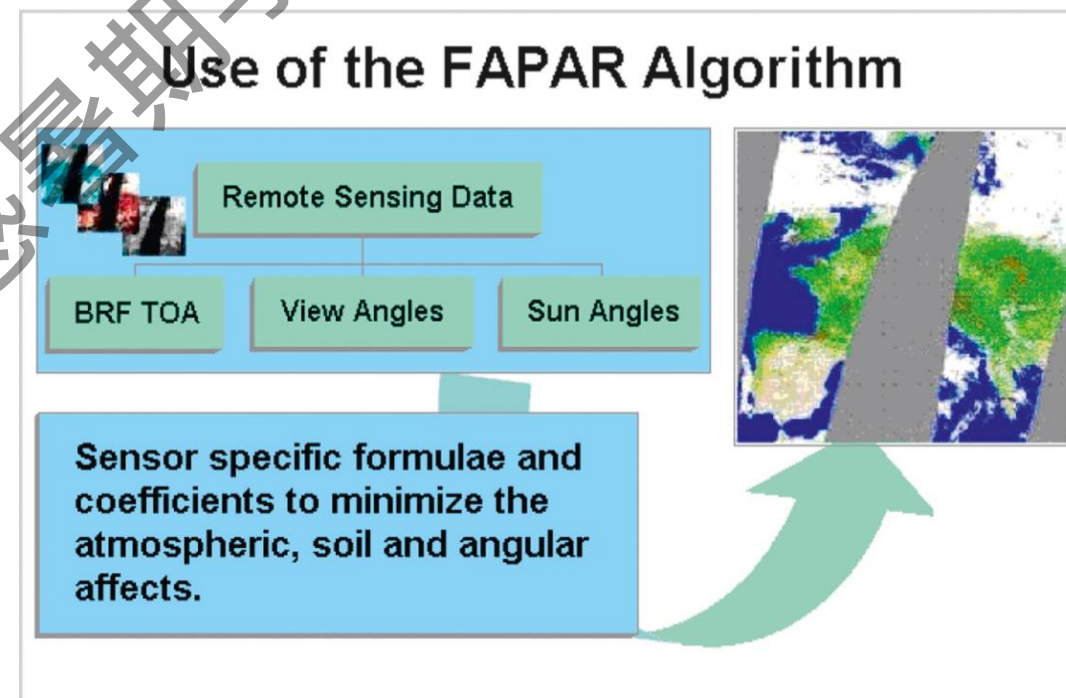
- JRC_FAPAR 是欧空局联合研究中心 (European commission Joint Research Center) 开发的针对欧洲的植被状况的FAPAR产品算法。
- JRC_FAPAR 针对全球的FAPAR 产品分辨率为10km，对欧洲分辨率为2km。

基于：连续植被冠层模型

([Gobron et al., 1997](#))

6S模型模拟陆地表面特征

([Vermote et al., 1997](#))



代表性遥感FAPAR反演算法——JRC_FAPAR

FAPAR算法步骤：

第一：进行大气校正，消除大气及角度的影响；

第二，与数学方法相结合，计算FAPAR值。

$$\text{FAPAR} = g_0(\rho_{\text{Rred}}, \rho_{\text{Rnir}}) = \frac{-l_{01}\rho_{\text{Rnir}} - l_{02}\rho_{\text{Rred}} - l_{03}}{(l_{04} - \rho_{\text{Rred}})^2 + (l_{05} - \rho_{\text{Rnir}})^2 + l_{06}}$$

- l_{0m} ($m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) 是经过优化形成先验值，从而使 $g_0(\rho_{\text{Rred}}, \rho_{\text{Rnir}})$ 值尽可能地接近利用训练数据优化得到的对某一特定的传感器测得的冠层FAPAR值。
- 将蓝光波段、红光、近红外波段及不同视角的亮度等值作为双向反射率因子输入反演算法中。

代表性遥感FAPAR反演算法——GLASS (Xiao et al., 2015)

- 使用入射到土壤部分的PAR 对应的透过率来近似计算FAPAR

$$\text{FAPAR} = 1 - \tau_{\text{PAR}}$$

- 入射到冠层顶部的PAR 包括直射和漫射两部分

$$\tau_{\text{PAR}} = \tau_{\text{PAR}}^{\text{dir}} - \left(\tau_{\text{PAR}}^{\text{dir}} - \tau_{\text{PAR}}^{\text{dif}} \right) \times f_{\text{skyl}}$$

$$\tau_{\text{PAR}}^{\text{dir}} = e^{-\sqrt{a} \times k_c(\varphi) \times \Omega \times \text{LAI}}$$

- 漫射入射PAR 的透过率可以通过直射入射PAR的透过率在各个入射方向上积分获得

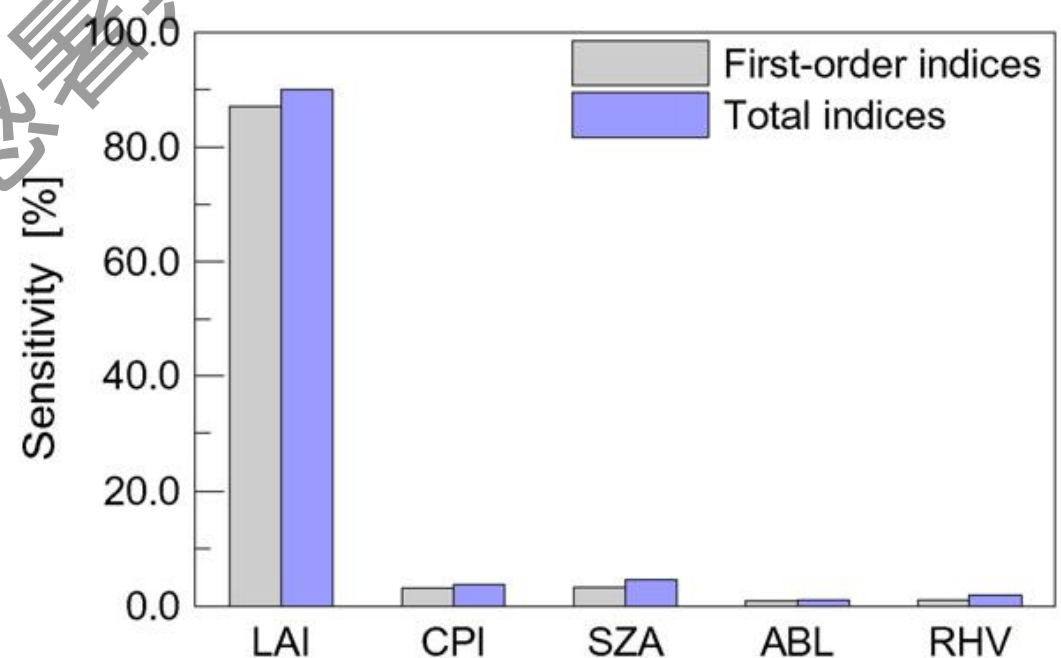
$$\tau_{\text{PAR}}^{\text{dif}} = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau_{\text{PAR}}^{\text{dir}} \sin \varphi \cos \varphi d\varphi$$



代表性遥感FAPAR反演算法——GLASS

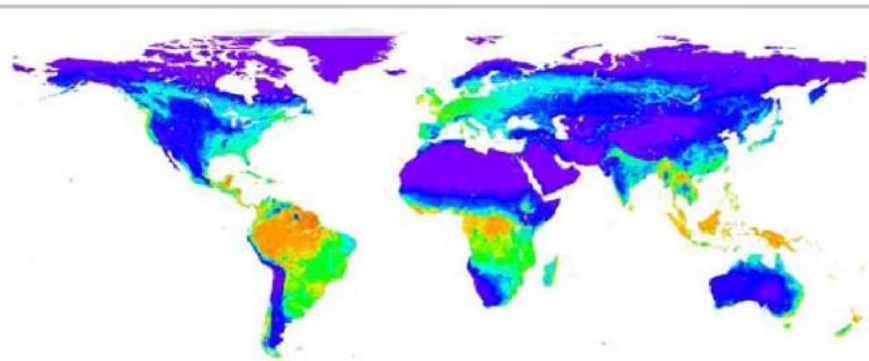
- 输入参数取值范围和参数敏感性分析

Factors	Unit	Range of variation	Distribution
Leaf area index	m^2/m^2	[0, 8]	Uniform
Clumping index	-	[0.5, 1.0]	Uniform
Solar zenith angle	Degrees	[0, 90]	Uniform
Absorptivity of leaves	-	[0.5, 1.0]	Uniform
Ratio of average projected areas of canopy elements on horizontal and vertical surfaces	-	[0.5, 2.0]	Uniform

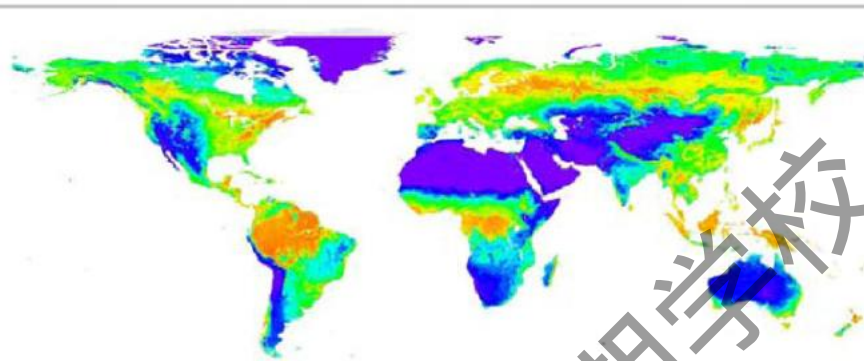


LAI = Leaf area index
CPI = clumping index
ABL = Absorptivity of leaves
SZA = Solar zenith angle
RHV = Ratio of average projected areas of canopy elements on horizontal and vertical surfaces

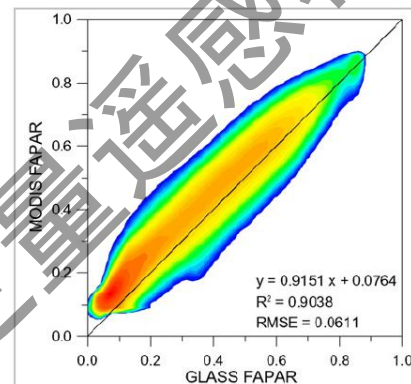
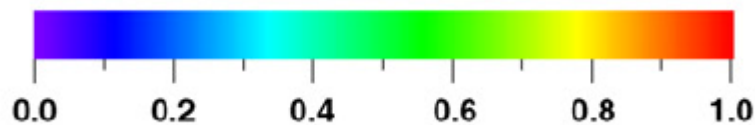




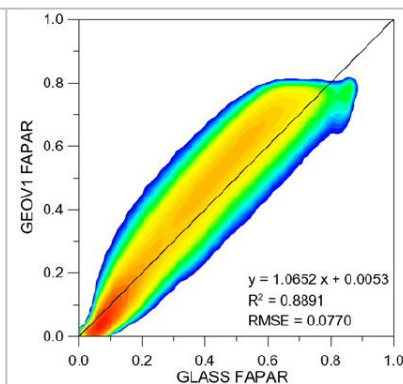
(a) GLASS, January



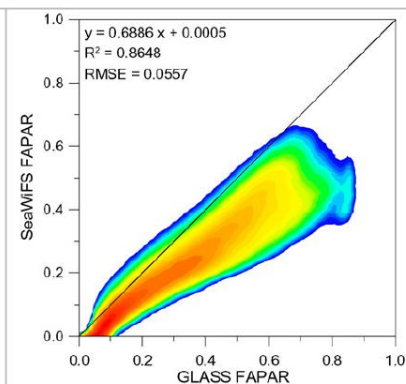
(b) GLASS, July



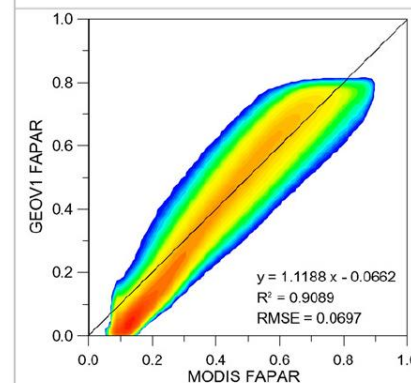
(a)



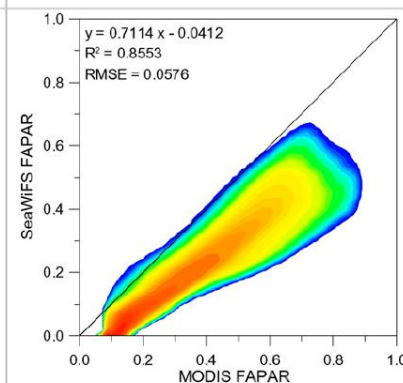
(b)



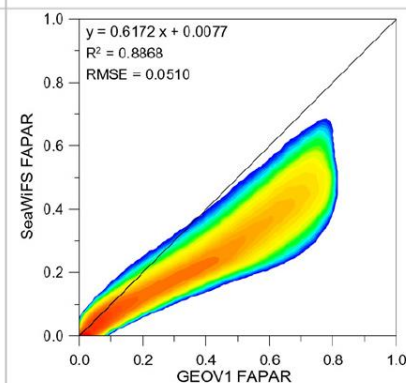
(c)



(d)



(e)



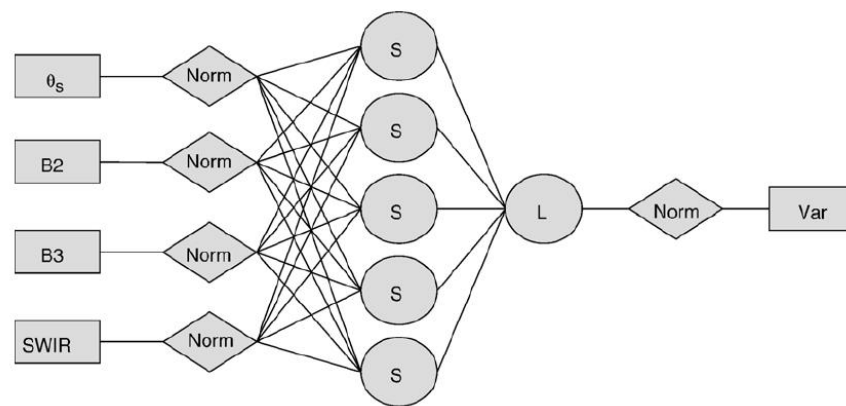
(f)

代表性遥感FAPAR反演算法——SENTINEL-2

- 时间分辨率5天， SENTINEL-2A, 2B

Spatial Resolution	Wavelengths
10m	Blue, green, Red, NIR (large)
20m	Red-Edge (3 bands), NIR (narrow)
60m	Blue, Middle Infrared (2 bands)

- 基于神经网络和PROSAIL模型
- SNAP toolbox
- 思路与GEOV1一致



主要内容

1. 概述
2. FAPAR野外测量
3. FAPAR 经验反演方法
4. 代表性遥感FAPAR反演算法简介
5. FAPAR产品与反演精度

FAPAR产品与反演精度

(田定方等, 遥感学报, in press)

产品名称	数据持续时间	时间分辨率	空间分辨率	直散射模型	主要算法	主要文献
MODIS	2002年7月至今	8天/4天	1km/500m	黑空	辐射传输方法/半机理算法	Myneni et al., 2002
MISR	1999年12月至今	9天-1月	0.5°/1km	蓝空	辐射传输方法	Knyazikhin et al., 1998
MERIS	2002年5月至2012年4月	1月	1km	黑空	多项式方法	Gobron et al., 1999, 2007
SeaWiFS	1997年6月至2006年9月	1月	1km	黑空	多项式方法	Wang et al., 2001, Gobron et al., 2006
GEOV1	1999年至今	10天	1/112°	黑空	神经网络方法	Baret et al., 2013, Camacho et al., 2013
GLASS	1982年至今	8天	1km/0.05°	蓝空	植被结构方法	Xiao et al., 2015b
CYCLOPES	1998年-2007年	10天	1/112°	蓝空	神经网络方法	Baret et al., 2007
VIIRS	2012年至今	8天	500m	蓝空	辐射传输方法	Xiao et al., 2015b; Yan et al., 2018
FPAR _{3g}	1981年-2011年	15天	1/12°	蓝空	神经网络方法	Zhu et al., 2013



FAPAR产品与反演精度 (Tao et al., 2015)

- MODIS 全球FAPAR 产品一般与MISR 和GEOV1 FAPAR 产品一致
- GEOV1 FAPAR 为包括MODIS 在内的融合产品
- MERIS 和SeaWiFSFAPAR 产品则比较吻合 (绿叶FAPAR)
- MODIS、MISR 和GEOV1 FAPAR 产品组与MERIS 和SeaWiFS FAPAR 产品组之间的差异很大
- FAPAR 的绝对值从大到小分别是MISR、MODIS、GEOV1、SeaWiFS 和MERIS (McCallum et al., 2010)



FAPAR产品与反演精度

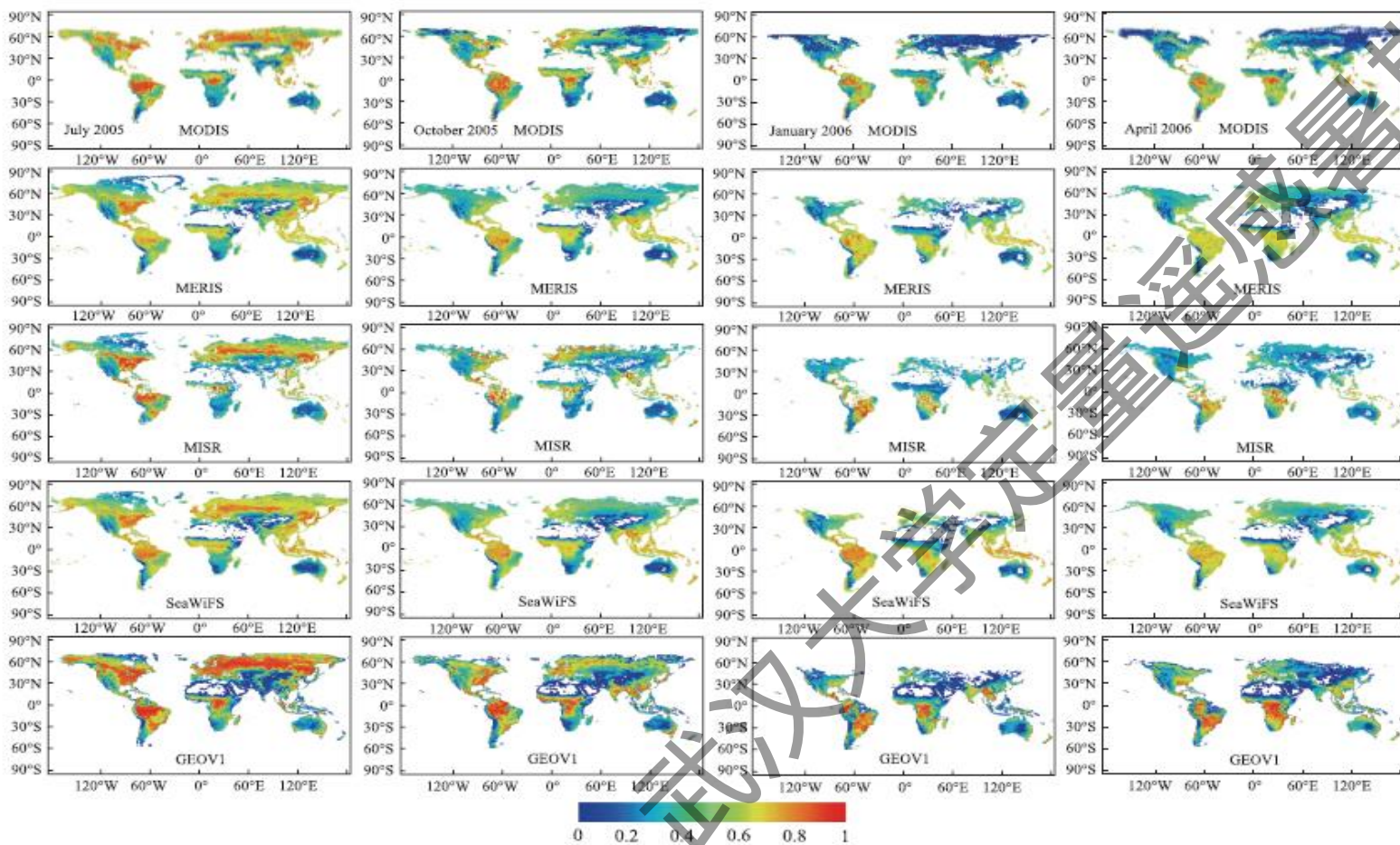
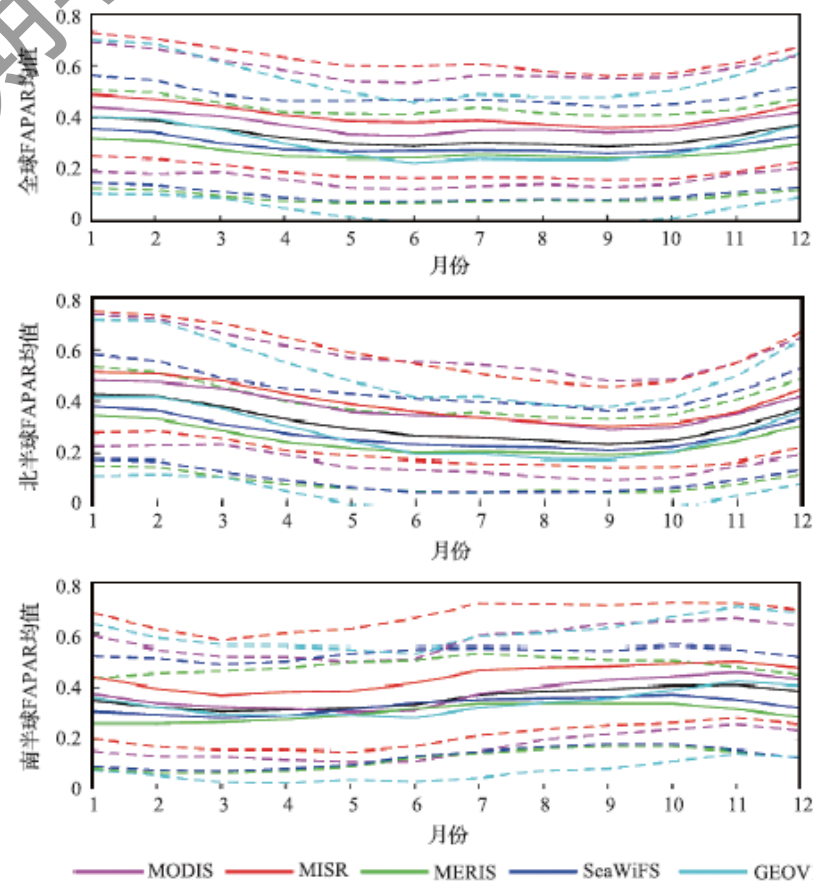


图11.2 在2005年7月~2006年6月期间(每3个月)MODIS、MERIS、MISR、SeaWiFS和GEOV1的全球FAPAR分布(Tao et al., 2015)

MODIS、MISR和GEOV1 FAPAR产品比较吻合, MERIS和SeaWiFS FAPAR产品也比较吻合。然而, MODIS、MISR和GEOV1 FAPAR值通常高于MERIS和SeaWiFS FAPAR值



2005年7月~2006年6月期间, 经过质量控制的MODIS、MISR、MERIS、SeaWiFS和GEOV1 FAPAR产品在全球、北半球和南半球的平均值(Tao et al., 2015)

黑色曲线是五种产品的均值; 虚线对应于每个产品的平均值±标准差

FAPAR产品与反演精度

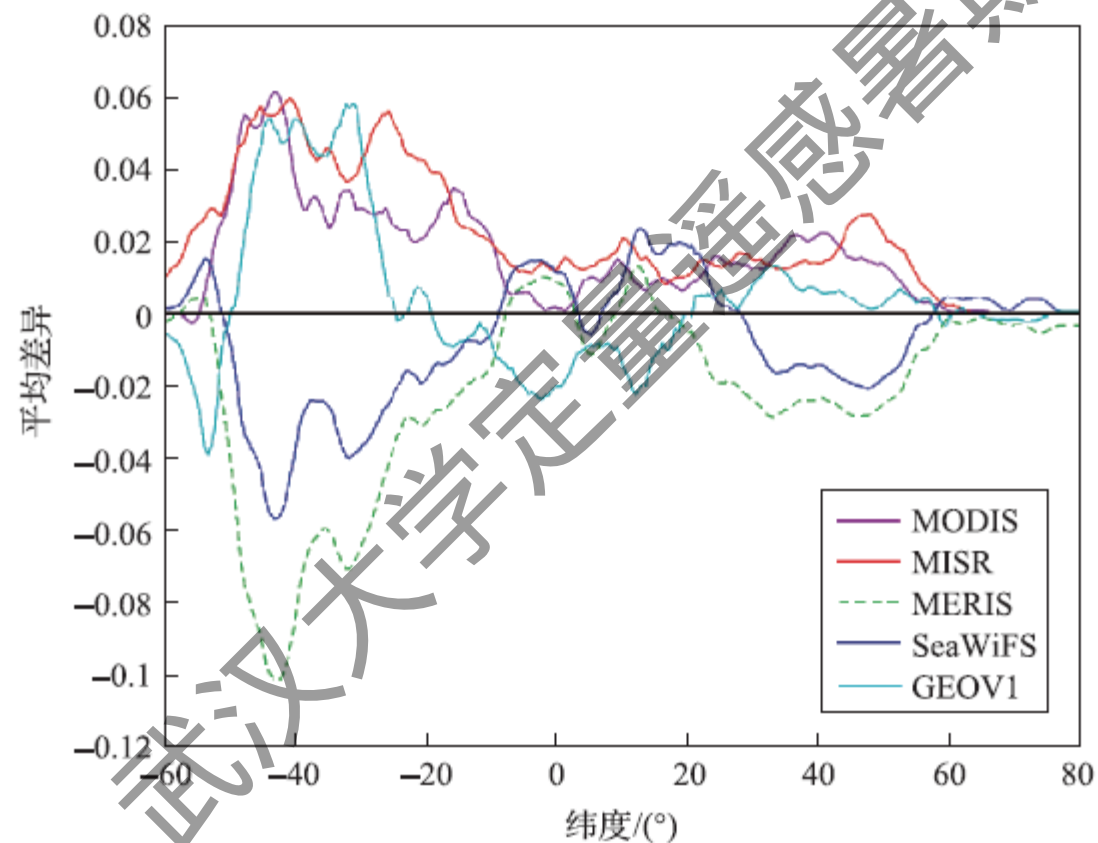


图 11.7 2005 年 7 月在不同纬度的五种产品的平均差异 (Tao et al., 2015)

黑线为参考线

FAPAR产品与反演精度

- GLASS 的精度和准确性明显优于 GEOV1 FAPAR、MODIS FAPAR和 SeaWiFS FAPAR的精度和准确性。
- GLASS FAPAR 产品在整个取值变化的范围内，都和FAPAR 地面测量数据有较好的一致性。

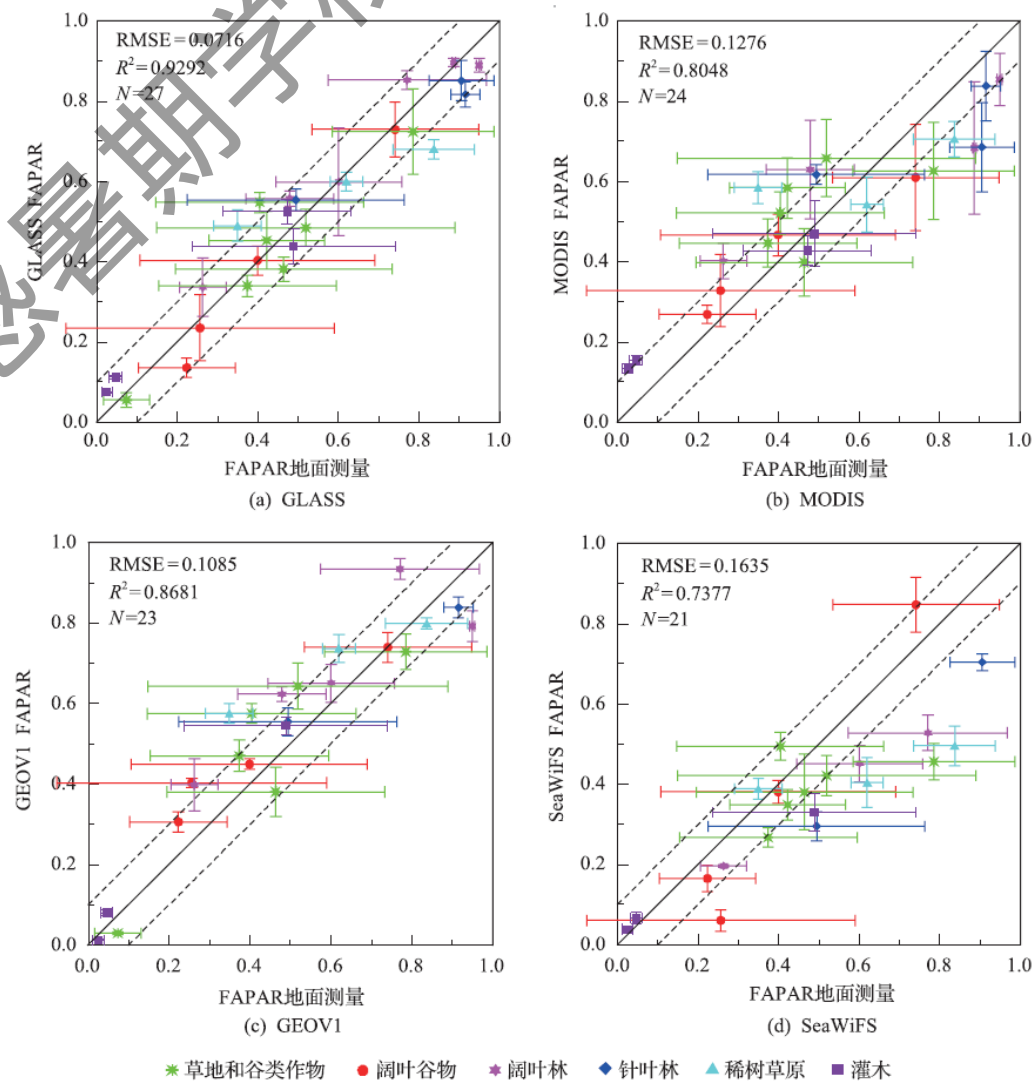


图 11.11 GLASS、MODIS、GEOV1 和 SeaWiFS FAPAR 与 FAPAR 地面测量的散点图比较 (Xiao et al., 2015)

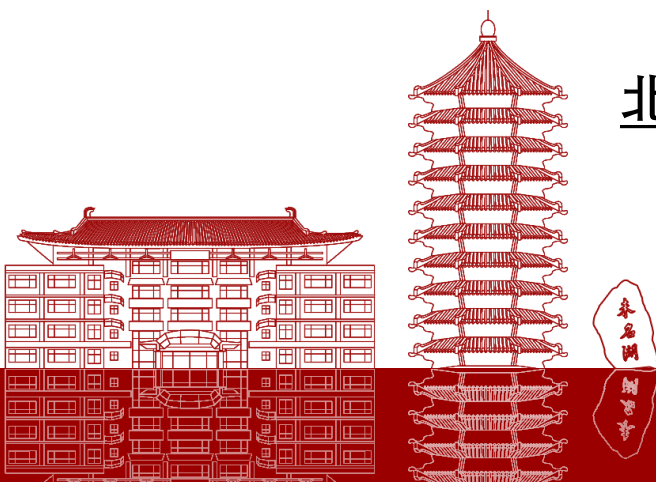


北京大学
PEKING UNIVERSITY



北京大学定量遥感暑期课程班网址 <http://hdxu.cn/gh8a7>

2020年7月25-30日



主要参考文献

- Xiao Z Q, Liang S L, Sun R, et al. 2015. Estimating the fraction of absorbed photosynthetically active radiation from the MODIS data based GLASS leaf area index product. Remote Sensing of Environment, 171: 105-117.
- Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, et al. 2014. Use of General Regression Neural Networks for Generating the GLASS Leaf Area Index Product From Time-Series MODIS Surface Reflectance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(1): 209-223
- Tao X, Liang S, Wang D D. 2015. Assessment of five global satellite products of fraction of absorbed photosynthetically active radiation: Intercomparsion and direct validation against ground-based data. Remote Sensing of Environment, 163: 270-285
- Tao X, Liang S L, He T, et al. 2016. Estimation of fraction of absorbed photosynthetically active radiation from multiple satellite data: Model development and validation. Remote Sensing of Environment, 184: 539-557
- Tian Y, Dickinson R E, Zhou L, et al. 2004. Comparison of seasonal and spatial variations of leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Common Land Model. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 109(D1): D003777
- 田定方, 范闻捷, 任华忠, 植被光合有效辐射吸收比率遥感研究进展, 遥感学报, in press
- Zhao, P., Fan, W., Liu, Y., Mu, X., Xu, X., & Peng, J. (2016). Study of the remote sensing model of FAPAR over rugged terrains. Remote Sensing, 8(4), 309
- Liu, L., Dailiang, P., Yong, H., & Quanjun, J. (2013). A novel in situ fpar measurement method for low canopy vegetation based on a digital camera and reference panel. Remote Sensing, 5(1), 274-281.
- Li, W., & Fang, H. (2015). Estimation of direct, diffuse, and total fpars from Landsat surface reflectance data and ground-based estimates over six flux net sites. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 120(1), 96-112.

