

# 植被光合有效辐射吸收比率遥感研究进展

田定方, 范闻捷, 任华忠

1. 北京大学 地球与空间科学学院遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;  
2. 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室, 北京 100871

**摘要:** 植被光合有效辐射吸收比率 FPAR (Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation) 反映了植被冠层的光学特性, 是表征植被光合作用水平和生长状态的重要参量, 因此成为全球变化研究中多种过程模型的重要输入参数。随着定量遥感研究的深入和新型传感器的使用, 从区域到全球尺度上的 FPAR 遥感估算方法不断提出, 多样化的遥感 FPAR 产品越来越多地应用于碳循环、能量循环、生产力估算及作物估产等研究领域。本文梳理了遥感估算的植被光合有效辐射的相关概念和算法, 并着重对过去十年间遥感估算 FPAR 的新进展进行了系统总结和探讨。研究表明, 近年来 FPAR 遥感的科研工作一方面聚焦于对现有算法的改进与各类型产品的验证, 更多的研究则侧重于 FPAR 概念体系的拓展, 叶片、叶绿素水平的 FPAR 估算, 直射光、散射光的 FPAR 建模等新方向逐渐成为研究热点。

**关键词:** 植被定量遥感, 光合有效辐射吸收比率, 冠层吸收模型, 遥感算法, 产品及验证

**引用格式:** 田定方, 范闻捷, 任华忠. 2020. 植被光合有效辐射吸收比率遥感研究进展. 遥感学报, 24(11): 1307-1324

Tian D F, Fan W J and Ren H Z. 2020. Progress of fraction of absorbed photosynthetically active radiation retrieval from remote sensing data. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(11):1307-1324[DOI:10.11834/jrs.20208498]

## 1 引言

吸收太阳辐射、进行光合作用是植物生长积累有机质的关键生理过程, 是全球碳循环的重要驱动力。植被对光合有效辐射 PAR (Photosynthetically Active Radiation) 的吸收过程是植被光合作用研究中重要环节。不同区域、不同形态的植被对入射的光合有效辐射呈现出不同的吸收效果, 如何定量描述植被对光合有效辐射的吸收已成为全球碳循环定量模型研究的重要课题 (He 等, 2012; Liu 等, 2014a, 2006; Madani 等, 2014)。

植被冠层光合有效辐射吸收比率 FPAR (Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation) 是描述太阳光在冠层辐射传输过程中植被吸收比例的参量, 一般定义为植被对波长在 400 nm—700 nm 间太阳辐射能量的吸收比率 (Gower 等, 1999), 是联合国全球气候观测系统认定的 50 个反映全球气候变化的关键参量之一 (GCOS, 2011)。

从 20 世纪 90 年代起, FPAR 就广泛应用于各类光能利用率模型, 进行植被生产力估算 (Potter 等, 1993; Turner 等, 2006)。光能利用率模型作为联系植被吸收的光合有效辐射与植被初级生产力之间的“桥梁”, 从另一角度定量揭示了 FPAR 对植被生长情况的指示性作用 (Monteith, 1972, 1977), 这是早期对 FPAR 的主要应用。

FPAR 与植被种类、叶面积指数 LAI (Leaf Area Index)、叶倾角分布、太阳高度角和天空光条件密切相关 (Liu 等, 2015)。由于陆地生态系统的地表特征如植被结构、地形、水热条件等具有较强空间异质性, FPAR 存在较强的时空差异。遥感是获取大范围长时间序列 FPAR 的唯一途径, FPAR 遥感产品在生产力估算 (Casanova 等, 1998; Goetz 等, 1999; Xiao 等, 2004a, 2004b; Traore 等, 2014)、植被长势监测 (Mackey 等, 2012)、生物地理 (Melis 等, 2006)、蒸散 (García 等, 2013)、干旱及气候变化 (Donohue 等, 2009;

收稿日期: 2018-12-25; 预印本: 2019-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41971301)

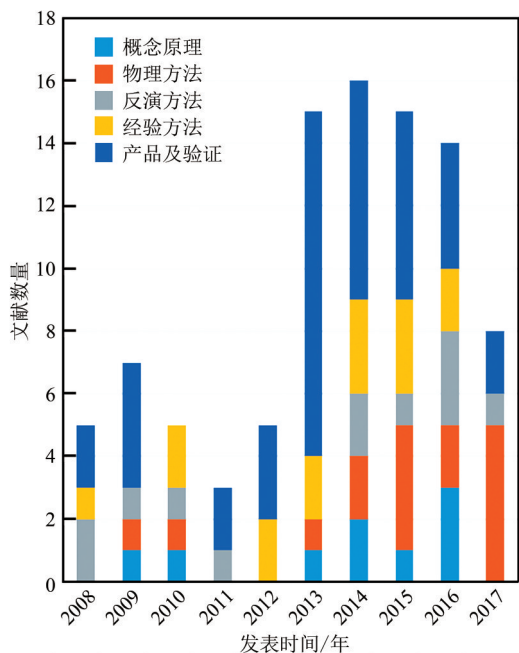
第一作者简介: 田定方, 男, 1993 年生, 博士研究生, 研究方向为植被定量遥感。E-mail: tiandingfang@pku.edu.cn

通信作者简介: 范闻捷, 女, 1972 年生, 副教授, 研究方向为定量遥感。E-mail: fanwj@pku.edu.cn

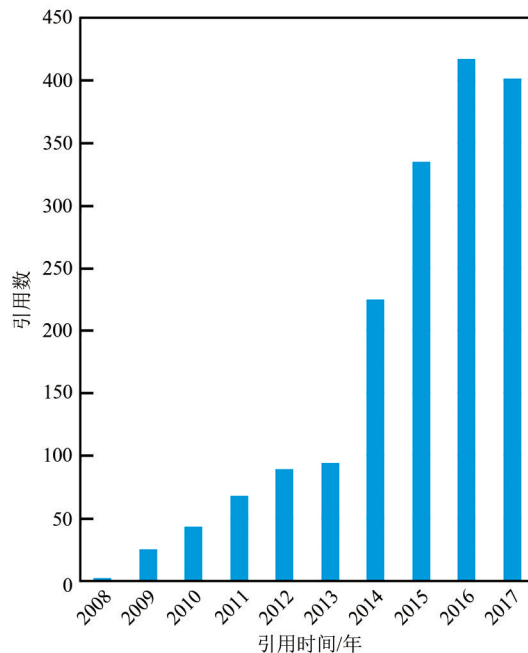
Yoshida等, 2015)等研究领域得到广泛应用, 并成为了多种气候和生态模型的关键输入参量 (Bonan等, 2002; Kaminski等, 2012; Maselli等, 2008; Tian等, 2004; King等, 2011)。由于能反映植被生长特征, FPAR也被当做地表分类的辅助信息 (Fernández等, 2010; Lotsch等, 2003)。

中国对于 FPAR 机理及遥感估算的研究起步于 21 世纪初 (周晓东等, 2002; 吴炳方等, 2004), 近年来在 FPAR 基础理论、估算方法、产品生产等方面都取得了一定突破 (Fan 等, 2014; Xiao 等, 2015a, 2015b; Liu 等, 2018)。本文收集整理了 2008 年—2017 年在遥感领域期刊上发表, 并被

SCI 收录的 FPAR 相关文献。图 1 (a) 是 2008 年—2017 年被 SCI 收录的 FPAR 遥感相关研究文献的分类归纳, 图 1 (b) 是这些文献在过去 10 年中的被引数量。可以发现, 近 10 年来, FPAR 遥感研究主要集中在概念原理、估算方法、产品生产与验证等方面, 年度论文发表数量有波动, 但对这些文章的引用率呈现出了稳步增加趋势, 这表明相关领域对于 FPAR 遥感研究的关注和相关遥感产品的应用在不断增加。本文将着重对近 10 年发表的 FPAR 遥感相关研究成果的梳理, 并对新进展进行系统性总结。



(a) 2008年—2017年SCI收录的FPAR研究相关文献数量  
(a) Quantity of SCI induced FPAR research paper published during 2008—2017



(b) 2008年—2017年发表的FPAR相关文献引用情况  
(b) Citation of FPAR research paper published during 2008—2017

图 1 2008年—2017年SCI收录的FPAR研究相关文献及引用情况

Fig.1 Quantity and citation of FPAR research paper published during 2008—2017

## 2 概念和基本原理

随着对植被碳循环监测精度需求不断提高, FPAR的概念也不断丰富和发展。根据植被光合作用的特性, 逐渐衍生出了不同尺度和不同类型的FPAR概念 (Braswell等, 1996; Zhang等, 2014a, 2014b)。这些定义的目的在于真正反映植被对光合有效辐射的吸收率。

### 2.1 FPAR相关概念

本文涉及的 FPAR 及其相关概念基本定义如下:

PAR: 光合有效辐射, 是指可被植被吸收的可用于光合作用的太阳辐射, 传统的定义中一般指太阳辐射中波长位于 400—700 nm 的部分。

FPAR: 植被冠层对光合有效辐射的吸收比率 ( $FPAR_{canopy}$ ), 包含了叶片等光合有效组分 PAV (Photosynthetically Active Vegetation) 和枯叶、枝干等非光合有效组分 NPV (Non-Photosynthetic Vegetation), 是所有植被组分对太阳辐射的吸收 (Goward 和 Huemmrich, 1992), 也写作 FAPAR、fAPAR 或 fPAR, 表达式如式 (1)。

$$\text{FPAR} = \frac{(I_{c\downarrow} - I_{c\uparrow} - (I_{uc\downarrow} - I_{uc\uparrow}))}{I_{c\downarrow}} \quad (1)$$

式中,  $I_{c\downarrow}$  是冠层顶太阳下行辐射,  $I_{c\uparrow}$  是从冠层出射的太阳辐射,  $I_{uc\downarrow}$  是冠层下太阳下行辐射,  $I_{uc\uparrow}$  是冠层下土壤反射太阳辐射。

也曾有学者用 FIPAR 定义植被对冠层上层入射辐射的吸收 (Daughtry 等, 1992), 其表达式为

$$\text{FIPAR} = \frac{(I_{c\downarrow} - I_{uc\downarrow})}{I_{c\downarrow}} \quad (2)$$

FIPAR 值与 FPAR 相近, 但由于不考虑植被对土壤反射辐射的吸收, 一般比 FPAR 小。

$\text{FPAR}_{\text{foliage}}$ : 植被中的绿色叶片对光合有效辐射的吸收比率 (Braswell 等, 1996), 也有文章称为绿色 PRAR ( $\text{FPAR}_{\text{green}}$ ), 即冠层尺度的 FPAR 除去 NPV 吸收部分:

$$\text{FPAR}_{\text{foliage}} = \text{FPAR}_{\text{canopy}} - \text{FPAR}_{\text{wood}} \quad (3)$$

式中,  $\text{FPAR}_{\text{foliage}}$ 、 $\text{FPAR}_{\text{wood}}$  分别是 PAV (叶片) 和 NPV 对光合有效辐射的吸收比例。

$\text{FPAR}_{\text{chl}}$ : 植被中叶绿素对光合有效辐射的吸收比率 (Zhang 等, 2005), 即在  $\text{FPAR}_{\text{foliage}}$  的基础上除去叶片中非叶绿素成分吸收的部分:

$$\text{FPAR}_{\text{chl}} = \text{FPAR}_{\text{foliage}} - \text{FPAR}_{\text{non-chl}} \quad (4)$$

式中,  $\text{FPAR}_{\text{chl}}$  和  $\text{FPAR}_{\text{non-chl}}$  分别是叶片中叶绿素和非叶绿素成分对光合有效辐射的吸收比例。

不同的 FPAR 定义适用于不同的应用领域。一般而言, 冠层尺度 FPAR 遥感产品 ( $\text{FPAR}_{\text{canopy}}$ ) 可满足全球能量循环以及陆表能量平衡的研究。而对于生产力估算等涉及植被光合作用、有机质积累等植被生理过程的研究, 叶绿素尺度的  $\text{FPAR}_{\text{chl}}$  则更加精确。相关讨论见 2.3 节。

**黑空 FPAR:** 仅考虑植被对直射光光合有效辐射的吸收比率。

**白空 FPAR:** 仅考虑植被对天空散射光光合有效辐射吸收的 FPAR。

**蓝空 FPAR:** 同时考虑直射光、天空散射光光合有效辐射吸收得到的 FPAR (Liu 等, 2018)。

**瞬时 FPAR:** 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 FPAR 都是瞬时 FPAR。

**日均 FPAR:** 一天不同时刻的植被吸收的光合有效辐射比例的平均值。

## 2.2 FPAR 与光能利用率模型

Monteith (1972) 以资源平衡观点为理论基础

建立了光能利用率模型, 进而可以利用植被所吸收的太阳辐射及其他调控因子来估算植被净初级生产力 GPP (Gross Primary Productivity) (孙睿和朱启疆, 1999)。利用光能利用率模型估算 GPP 已经成为 GPP 遥感估算中较为主流的方法, 吸引了大量研究者的关注 (Potter 等, 1993; Prince 和 Goward, 1995; Xiao 等, 2004a, 2004b; Yuan 等, 2014)。而 FPAR 作为光能利用率模型的重要参量, 在基于光能利用率模型的 GPP 估算方法中得到广泛应用, GPP 估算的精度要求也在不断促进 FPAR 模型和方法的发展。

利用光能利用率模型估算 GPP 的出发方程为

$$\text{GPP} = \varepsilon \times \text{FPAR} \times \text{PAR} \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon$  是光能利用率 LUE (Light Use Efficiency)。FPAR 是连接太阳辐射和植被生理过程的重要因子, 和 LUE 共同刻画了植被吸收、利用太阳光能的过程, 都是影响 GPP 估算精度的参量。由于 LUE 在模型中常常用经验值代替, 提高 FPAR 估算精度几乎成为了提高 GPP 遥感估算精度的必由之路。

## 2.3 不同 FPAR 定义对植被生产力估算的影响

冠层、叶片、叶绿素 FPAR 的概念是在 GPP 和生物量估算精度要求的推动下提出的。地表植被冠层的 NPV 部分对  $\text{FPAR}_{\text{canopy}}$  的值影响很大 (Zhang 等, 2005), 有研究表明, 当 LAI 小于 3.0, 非光合组分的吸收可以使  $\text{FPAR}_{\text{canopy}}$  的值增加 10%—40% (Asner 等, 1998)。由于木质组分吸收的太阳辐射并不参与光合作用, 因此估计木质组分对太阳辐射的吸收对估算 GPP 和生物量没有实际意义, 反而会因光能吸收与 LUE 不匹配而产生不确定性。将冠层的 FPAR 精细到叶片 ( $\text{FPAR}_{\text{foliage}}$ ), 去除木质组分的吸收, 可以有效地解决上述问题 (Chen, 1996)。

如果进一步考虑叶片内部结构, 除叶绿素外, 仍有其他不参与光合作用的成分吸收光合有效辐射, 如色素、叶脉、细胞壁等, 其吸收的能量占叶片总吸收的 20%—30%, 特殊情况下可达 50%。因此有研究认为有必要将叶绿素吸收的辐射单独考虑 (Hanan 等, 1998, 2002; Lambers 等, 1998; Zhang 等, 2005)。

需要指出的是,  $\text{FPAR}_{\text{chl}}$ 、 $\text{FPAR}_{\text{foliage}}$  并不能完全反映植被对太阳辐射的全部吸收特性, 这一定

义的主要作用在于提高植被生产力估算的精度,但对植被监测等其他应用的改进则十分有限(Zhang等, 2005)。当用于植被生产力估算时,  $FPAR_{chl}$  能有效减少  $FPAR$  估算的不确定性, 与相应的  $LUE$  配合使用可获得更高的植被生产力估算精度。

Zhang等(2009)结合 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 数据估算的  $FPAR_{chl}$ 、 $FPAR_{canopy}$  对加拿大北部白杨林的太阳辐射吸收特性进行了研究, 发现地面通量塔观测的植被生产力数据与  $FPAR_{chl}$  具有较好的相关关系, 而与  $FPAR_{canopy}$  相关关系却较差; 与之对应的  $LUE_{chl}$  (叶绿素光能利用率)、 $LUE_{canopy}$  (冠层光能利用率) 之间也存在显著差异,  $LUE_{canopy}$  较  $LUE_{chl}$  低 36%。因此, 利用叶绿素  $FPAR$  和相应的  $LUE$  估算植被生产力在植物生理学逻辑上更符合实际情况 (具体估算方法见 3.4 节)。

#### 2.4 直射光和散射光对光合有效辐射的影响

植被对不同强度和特性的太阳辐射有不同的吸收特征 (Gu等, 2002)。研究表明, 植被对散射光的利用效率高于对直射光的利用效率 (Gu等, 2003; Farquhar 和 Roderick, 2003), 阴影叶片可能比光照叶片有更高的光合作用效率, 可产生更多的碳累积 (Mercado等, 2009)。因此, 很多实验观测都发现中午太阳天顶角较小时,  $FPAR$  较低 (Gu等, 2002; Widlowski, 2010; Fan等, 2014)。植被对直射光的吸收受太阳高度角的显著影响, 而对散射光的吸收则对太阳高度角不敏感 (Cao等, 2014)。因此, 在实际应用中应考虑黑空、白空及蓝空  $FPAR$  的差异。

Yuan等(2014)基于实测 GPP 数据验证了 CASA、VPM 等 6 种光能利用率模型估算的 GPP 的精度, 发现阴天的 GPP 被显著低估。林尚荣等(2018)的研究表明, 分别计算直射光、散射光的  $FPAR$ , 并给予相应的最大光能利用率值估算 GPP, 可有效地提高 GPP 精度。可见, 研究直射光、散射光分开的  $FPAR$  估算模型对于提高  $FPAR$  在植被生产力估算中的应用效果具有重要意义, 相关估算方法见 3.5 节。

直射和散射光分开的意义不仅在于提高  $FPAR$  的估算精度, 更是遥感反演瞬时  $FPAR$  转换为日平均  $FPAR$  的关键。实验表明, 即使是天空完全晴朗

无云, 在一天的不同时刻, 冠层  $FPAR$  的观测值也会因太阳高度角、天空直散射光比例而变化 (Fan等, 2014; Cao等, 2014)。天空云量对直散射光比例的影响更大。只有给出直散射光比例的日变化特征, 并根据不同植被的不同特性进行时间归一化 (Wang等, 2016; Liu等, 2018), 才有可能实现瞬时  $FPAR$  向日均  $FPAR$  的转换。这对于  $FPAR$  遥感产品的地面验证数据的处理和植被生产力的估算都有重要意义。

### 3 $FPAR$ 的遥感估算方法

传统的  $FPAR$  遥感估算方法主要针对冠层  $FPAR$ , 反演方法主要分为经验方法和物理方法两大类。经验方法一般是基于地表实测  $FPAR$  或模拟数据集而建立各类植被指数与  $FPAR$  的相关关系, 从而估算  $FPAR$ 。物理方法也称机理方法, 基于植被结构或冠层辐射传输方程模拟太阳光在冠层中的吸收、反射、散射过程, 最终求解或估算  $FPAR$ 。目前, 物理方法是生产多数  $FPAR$  产品的主要方法。

近年来随着  $FPAR$  概念的不断演变和细化, 新的反演方法研究也不断出现, 这些研究有些致力于引入机器学习等新的反演方法, 还有一些是针对  $FPAR_{chl}$ 、黑空和白空  $FPAR$  等新的概念而提出的新方法。除传统的多光谱数据外, 高光谱、多角度、激光雷达 (Chasmer等, 2008) 等多样化遥感数据也用于  $FPAR$  的估算。

#### 3.1 经验方法

植被对太阳辐射的吸收主要集中在红色波段, 植被指数大多是红、绿、近红外等波段反射率的函数, 反映了植被在这些波段的反射和吸收特征, 因此可利用植被指数与实地测量  $FPAR$  之间的统计关系估计  $FPAR$  (Pinty等, 2009)。植被指数与  $FPAR$  之间的相关关系常以线性、幂函数、指数函数为主, 目前已经有近 20 余种指数可应用于  $FPAR$  估算。

表 1 总结了 2008 年以来提出的基于植被指数  $FPAR$  经验反演方法。不同类型植被指数与  $FPAR$  之间的相关关系不尽相同。在建立模型时, 既可使用单个植被指数, 也可将多个植被指数结合起来运用。此外, 不同地区、植被种类、不同生长

时期植被的形态一般不同，也会影响经验关系的建立。大多数作物在生长期初期（LAI达到最大值之前）和成熟期（LAI达到最大值之后）的FPAR

与植被指数间的关系不完全相同（Ogutu和Dash, 2013; Ridao等, 1998; Jenkins等, 2007; Tan等, 2013）。

表1 FPAR和常见指数的关系(2008年以后)

Table 1 Relationship of FPAR and Common VIs (after 2008)

指数形式	FPAR和指数的关系	主要文献
$\text{MTVI2} = \frac{1.5 \times (1.2 \times (b_{\text{NIR}} - b_{\text{C}}) - 2.5 \times (b_{\text{R}} - b_{\text{C}}))}{\sqrt{(2b_{\text{NIR}} + 1)^2 - (6b_{\text{NIR}} - 5\sqrt{b_{\text{R}}}) - 0.5}}$	$\text{FPAR} = a - ((b - \text{MTVI2})/c)^d$	Liu等, 2008
$\text{OSAVI} = \frac{1.16 \times (b_{\text{NIR}} - b_{\text{R}})}{b_{\text{NIR}} + b_{\text{R}} + 0.16}$	$\text{FPAR} = a + b\text{OSAVI}$	Liu等, 2008
$\text{VARI} = \frac{b_{\text{C}} - b_{\text{R}}}{b_{\text{C}} + b_{\text{R}} - b_{\text{B}}}$	$\text{FPAR} = a + b\text{VARI}$	Cristiano等, 2010
$\text{MTCI} = \frac{b_{753.75} - b_{708.75}}{b_{708.75} - b_{681.25}}$	$\text{FPAR}_{\text{chl}} = a + b\text{MTCI}$	Ogutu和Dash, 2013
$\text{GNDVI} = \frac{b_{800} - b_{550}}{b_{800} + b_{550}}$	$\text{FPAR} = a \times e^{b\text{GNDVI}}$	Tan等, 2013
$\text{NDVI}^* = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_0}{\text{NDVI}_s - \text{NDVI}_0}$	$\text{FPAR} = a + b\text{NDVI}^*$	Tan等, 2013
$\text{WDRVI}_{\text{green}} = \frac{0.3b_{\text{NIR1}} - b_{\text{C}}}{0.3b_{\text{NIR1}} + b_{\text{C}}} + \frac{1 - 0.3}{1 + 0.3}$	$\text{FPAR}_{\text{chl}} = a + b\text{WDRVI}_{\text{green}}$	Zhang等, 2014c
$\text{CI}_{\text{green}} = \frac{b_{\text{NIR1}}}{b_{\text{GREEN}}} - 1$	$\text{FPAR}_{\text{chl}} = a + b\text{CI}_{\text{green}}$	Zhang等, 2014c

经验方法参数少、计算简单高效，早期已被广泛研究和探讨。但是，经验关系的形成依赖于指数的选择和植被结构，在实验区域内统计得到的经验方法一般只对实验区域附近相同类型的植被有效，模型适用性较差，在实际工作中很难应用于大范围的FPAR估算，因此绝大多数经验方法并没有应用于大范围遥感产品的生产。此外，植被指数本身受土壤背景和观测角度的影响（Clevers等, 1994; Rahman等, 2015），算法的不确定性较高。

随着新型传感器投入使用，基于高光谱数据或其他窄波段数据设计的植被指数不断出现，对经验方法的研究也进入新的阶段。例如，有学者利用新型植被指数GNDVI及NDVI与FPAR相关关系的差异，将多种指数结合起来设计算法，减少单一植被指数方法在极端条件下的不确定性，从而提高可算法可靠性（Tan等, 2013），也有大量研究工作聚焦于利用新型植被指数建立经验方法进行FPAR估算（Dong等, 2015; Majasalmi等, 2016），但是依然难以克服经验方法受限于实验区

特征、普适性不强的问题。

### 3.2 物理模型

估算FPAR的物理模型一般从植被结构或冠层辐射传输出发，模拟光子在冠层中的运动过程，进而推导求解FPAR。基于这一思路，不同学者从几何光学模型、辐射传输模型等植被冠层BRDF基础模型出发发展了多种FPAR物理模型。

植被结构类模型主要依据FPAR的基本定义和孔隙率的基本原理构建模型求解FPAR。例如，陈镜明（Chen, 1996）提出的孔隙率方法考虑了NPV对光合有效辐射的吸收，基于有效LAI估算叶片水平的FPAR。在考虑散射光的影响时，先计算直射光的，再通过半球积分计算散射光的FPAR，其基本表达式为

$$\text{FPAR} = (1 - \rho_1) - (1 - \rho_2) \times \exp\left(-G(\theta_s)\beta L_e \cdot \cos(\theta_s)\right)^{-1} \quad (6)$$

式中， $\rho_1$ 是方向半球反照率， $\rho_2$ 是背景反照率， $L_e$ 是有效LAI， $\theta_s$ 是太阳天顶角， $G(\theta_s)$ 是太阳天顶角处的植被冠层G函数， $\beta$ 是与多次散射相关的因

子。从式(6)可见, FPAR是冠层反照率、土壤反射以及LAI的函数;算法同时考虑到了冠层和土壤背景对冠层反照率的影响。算法的主要困难在于难以获得高精度的土壤反照率,特别是在稀疏植被条件下估算较为困难。此外,不同环境条件下的消光系数等参数也难以精确测定,使用固定的近似值代替,影响了算法的推广和应用。陈良富等(Chen等, 2008)在相关研究的基础上,同样基于孔隙率模型和能量平衡原理,对基于植被结构的方法进行了简化,采用冠层开放度、冠层及土壤反照率等参量代替原模型的消光系数,在一定程度上提高了方法的效率,但是该方法忽略了植被与土壤间多次散射的影响。

从冠层辐射传输原理出发的模型大多数是正演模型,将植被视作连续、均一的介质,通过模拟太阳辐射在介质中的传输过程,求解植被结构与传感器观测到辐射强度之间的关系。这些估算方法一般先计算LAI等植被结构相关参数,再模拟不同植被结构下的辐射吸收,结合叶片反照率等其他输入参数计算FPAR, MODIS FPAR产品的主算法就是一种典型的基于辐射传输的方法(Myneni等, 2002)。针对真实植被往往不是均一介质的特性, Liu等(2015)利用农田水热辐射传输模型SHAW (Soil Heat And Water),模拟了FPAR在冠层中的垂直分布,并利用不同生长阶段小麦的FPAR地面实测数据进行验证,实测数据与模拟数据表现出了较好的一致性。类似的模型还有一维垂直辐射传输及能量平衡的一体化模型SCOPE模型(van der Tol等, 2009),利用植被结构及内部温度特征,建立了植被光谱与水分、热量及碳循环间的关系,可以用于估算冠层及叶绿素FPAR。Tao等(2013)利用MODIS地表反照率数据和基于几何光学和辐射传输混合模型反演的LAI数据,基于辐射传输模型设计了一种基于多源数据的FPAR算法,在具有空间异质性的区域表现出了较高的精度。

辐射传输模型能较好地适应不同环境和背景辐射条件下的FPAR估算要求,但由于方法精度受地表分类精度的影响,在模型输入参数上土壤背景反射率确定等环节也是辐射传输方法主要的不确定性来源。

近年来,再碰撞理论在遥感领域的发展促进了相关FPAR估算方法的提出。Fan等(2014)基

于再碰撞理论提出了FAPAR-P模型。该模型以光子在植被冠层内发生多次散射时的再碰撞概率相等为出发点,假定光子进入叶片后的反射和透过概率相等,利用再碰撞概率P描述光子在冠层中被吸收的过程,从而建立了基于能量守恒原理的FPAR定量模型。该模型还同时考虑了天空散射光、植被冠层内的多次散射及植被和土壤之间的多次相互作用,并在模型中引入尼尔逊参数,进而给出FPAR的数学表达式,适用于离散和连续等不同类型植被FPAR的估算。然而,该模型的问题在于叶片反射和透过两个方向反射率在可见光波段会有一定差异,如果采用相同取值时在植被茂密时可能产生误差。

### 3.3 FPAR反演新方法

除一般的经验方法和物理方法外,还有一些其他的FPAR反演方法,例如直接反演方法、机器学习方法(Zhu等, 2013)。

直接反演法即利用叶片反射模型、冠层反射模型、大气辐射传输模型模拟数据建立由表观反射率估算FPAR的方法(Liu等, 2018; Verhoef和Bach, 2007),这类方法的主要问题在于难以克服模型耦合和空间异质性带来的不确定性。

随着神经网络、深度学习算法的发展和计算机工作能力的提高,利用机器学习方法进行FPAR数据生产的模式得以发展(Xiao等, 2015b; Zhu等, 2013)。这类方法一般将现有的FPAR产品、冠层反射率等信息作为训练样本,首先建立反射率到FPAR的学习网络,然后利用遥感观测值和网络计算FPAR。例如, Baret等(2007)在PROSAIL模型大量模拟冠层辐射的基础上,基于神经网络方法,利用SPOTVEGETATION数据,形成CYCLOPES (Carbon Cycle in Land Observational Products from an Ensemble of Satellite)产品。Bacour等(2006)利用相似的神经网络算法实现MERIS的FPAR反演, Verger等(2011)利用神经网络算法从多角度高光谱CHIRS/PROBA数据中反演FPAR,并用于生产PROBA-V FPAR产品(Baret等, 2013)。

在数据使用上,除一般的可见光多波段或高光谱数据外,激光雷达等数据也逐步应用于FPAR遥感反演(Chasmer等, 2008)。

### 3.4 FPAR<sub>foliage</sub>与FPAR<sub>chl</sub>的估算方法

FPAR<sub>foliage</sub>方法也可分为经验方法和物理方法两大类(Zhang等, 2005; 高彦华等, 2006)。FPAR<sub>foliage</sub>是对冠层FPAR的细化和发展, 估算森林、灌木等植被的FPAR<sub>foliage</sub>可以在冠层FPAR估算模型中使用有效LAI作为输入参数, 达到去除木质组分的效果(Chen, 1996)。在实测上作物生长早期木质部分没有长成时的FPAR就是FPAR<sub>foliage</sub>。

FPAR<sub>chl</sub>虽然更有助于提高植被生产力估算精度, 但是实测和反演难度比冠层FPAR<sub>foliage</sub>更大。物理方法估算FPAR<sub>chl</sub>主要利用PROSAIL模型模拟叶片在不同叶绿素浓度下的吸收特性, 从而求解叶绿素浓度、冠层反射率及FPAR<sub>chl</sub>之间的关系。也有研究结合Hyperion高光谱数据或多光谱数据估算FPAR<sub>chl</sub>(Zhang等, 2005, 2012, 2013; 高彦华等, 2006)。有学者对在一定叶绿素浓度下FPAR<sub>chl</sub>与FPAR<sub>foliage</sub>的比值进行了研究, 这一比值随叶绿素浓度不同在0.71—0.81间变化, 可见两者间大约存在20%—30%的差异(Du等, 2017)。

随着各类新型传感器投入应用, 很多研究都发现利用红边波段数据估算FPAR<sub>chl</sub>的方法非常有效。Ogutu和Dash(2013)研究了通量塔测量的净初级生产力NEE(Net Ecosystem Exchange)与实测PAR之间的相关关系, 发现其相关系数是FPAR<sub>chl</sub>与温度水分胁迫因子的函数。在温度水分胁迫因子可求取的情况下, 通过这一相关系数可估算实验区域森林和作物的FPAR<sub>chl</sub>。有研究分析了FPAR<sub>chl</sub>与MTCI(MERIS Terrestrial Chlorophyll Index)、EVI(Enhanced Vegetation Index)、NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)与的FPAR<sub>chl</sub>相关性, 发现MTCI的相关性最好、EVI次之、NDVI最差(Zhang等, 2018; Gitelson, 2019)。Zhang等(2014c)分析了不同生长条件下玉米和大豆FPAR<sub>chl</sub>与NDVI、EVI、WDRVI<sub>green</sub>、CI<sub>green</sub>4个植被指数之间的关系, 发现实验区域的EVI与FPAR<sub>chl</sub>与的相关性最好, 在不同种类植被、不同生长环境下的相关系数基本均在0.9以上, 可用于FPAR<sub>chl</sub>的估算。

### 3.5 直散射FPAR的估算方法

直射光、散射光条件下植被FPAR的遥感建模与估算是近年的研究热点问题(Li等, 2015a, 2015b; Liu等, 2015, 2018)。建模过程通常首先

利用辐射传输模型模拟冠层的直射光FPAR(FPAR<sub>dir</sub>)和散射光FPAR(FPAR<sub>dif</sub>)的传输效果, 然后分别计算植被对直射光和散射光的吸收, 并最终代入植被生长模型中估算植被生产力(Carrer等, 2013)。

Li和Fang(2015)提出了一种基于土壤—叶片—冠层辐射传输模型的FPAR估算方法, 利用Landsat 5数据和模拟的反射率间建立查找表关系, 分别估算直射光FPAR和散射光FPAR。地面验证结果表明, 冠层FPAR误差在0.05以内, 但直射光FPAR估算结果存在高达16%的低估, 从而在一定程度上说明了区分直射光FPAR和散射光FPAR的必要性。

Baret等(2007)的研究表明, 可以用10:00 am左右的黑空FPAR近似日均黑空FPAR, 这样如果有了10:00 am的黑空FPAR以及白空FPAR, 利用全球已有的日均散射光比例数据, 就可以近似计算全球日均FPAR。Liu等(2018)利用MODIS的反照率、LAI和聚集指数产品, 基于能量平衡剩余方法建立了全球黑天空、白天空FPAR算法。

但是, 需要注意的是, 目前针对这一问题的研究主要是通过改进辐射传输模型, 将散射光作为单独辐射部分加以考虑, 模型精度的提高还有待更深入的研究, 并还需要与植被生产力估算研究中的光能利用率测算方法进行融合。

## 4 FPAR产品和验证

### 4.1 FPAR产品

随着FPAR算法的逐渐成熟, 各类FPAR产品应运而生, 例如MODIS、MISR(Multi-angle Imaging SpectroRadiometer)、MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer)、SeaWiFS(Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor)、GEOV1、GLASS(Global Land Surface Satellite)、CYCLOPES、VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer)、FPAR3g等FPAR产品, 各产品的基本情况如表2所示。

其中, MODIS FPAR产品是目前应用最广泛的FPAR产品, 该产品主要是基于植被三维辐射传输方程, 利用查找表方法, 反演FPAR(Myneni等, 2002; Knyazikhin等, 1998; Tian等, 2000)。根据植被冠层内辐射传输过程, 把三维辐射传输模型分解为两个子模型: (1)考虑冠层内辐射场为黑体背景时的辐射(黑土壤问题), (2)单独考虑

冠层下背景与植被间的散射。分别从辐射传输机理构建模型。然后依据给定生物类型的冠层结构和土壤特征建立查找表, 比较观测的BRF和查找

表中存储的模型BRF, 当观测的BRF和模型BRF相差某个阈值时, 所得到的FPAR就认为是可能的解 (Myneni等, 2002; Knyazikhin等, 1998)。

表2 FPAR主要产品

Table 2 Information about satellite FPAR products

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	2002-07至今	8/4 d	1 km/500 m	黑空	辐射传输方法/半机理算法	Myneni等, 2002
MISR	1999-12至今	9 d—1月	0.5°/1 km	蓝空	辐射传输方法	Knyazikhin等, 1998
MERIS	2002-05—2012-04	1月	1 km	黑空	多项式方法	Gobron等, 1999, 2007
SeaWiFS	1997-06—2006-09	1月	1 km	黑空	多项式方法	Wang等, 2001; Gobron等, 2006
GEOV1	1999年至今	10 d	1/112°	黑空	神经网络方法	Baret等, 2013; Camacho等, 2013
GLASS	1982年至今	8 d	1 km/0.05°	蓝空	植被结构方法	Xiao等, 2015b
CYCLOPES	1998年—2007年	10 d	1/112°	蓝空	神经网络方法	Baret等, 2007
VIIRS	2012年至今	8 d	500 m	蓝空	辐射传输方法	Xiao等, 2015b; Yan等, 2018
FPAR <sub>3g</sub>	1981年—2011年	15 d	1/12°	蓝空	神经网络方法	Zhu等, 2013

冠层结构是3D辐射传输模型在植被冠层中最重要的决定变量, 不同植被的冠层差异较大, 因此, 估算冠层辐射时, 需要认真考虑3个方面: (1) 个体植被、树木或群落冠层的结构; (2) 植被元素 (叶子、茎) 及地面背景的光学特性, 前者依赖于植被的水分及色素含量等; (3) 大气状况, 对太阳瞬时辐射影响较大。因此估算FPAR时, 反演算法将全球植被分为8种类型: 草地/谷类作物、灌丛、阔叶作物、稀树草原、常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林和落叶针叶林。

在物理方法失效时则采用基于PROSAIL模型模拟的植被指数备用算法进行产品生产 (Myneni等, 2002)。MODIS产品自2000年发布后进行了多次改进, 生产了多个数据集 (Yan等, 2016a), 逐次提高了估算精度 (Tao等, 2015), 然而该FPAR产品算法始终仅考虑了太阳直射辐射, 是黑空FPAR产品。

MISR的FPAR产品和MODIS产品采用相同的模型和算法, 并根据MISR多角度传感器的特性进行了参数调整, 同时也将植被对散射辐射的吸收考虑进来, 生产的产品是10:30 am的总FPAR, 是蓝空FPAR产品 (Knyazikhin等, 1998)。考虑到MODIS传感器运行年限已经比较长, 需要有下一代时空分辨率相近的传感器作为其数据的延续和补充, Yan等 (2018) 在MODIS产品算法的基础上, 根据VIIRS传感器特征研制了面向VIIRS数据的FPAR产品算法。为了保持MODIS与VIIRS产品

的延续性, 两种产品算法相似, 得到的都是黑空FPAR, 并未考虑植被对天空散射光的吸收。

MERIS FPAR产品是在MGVI (MERIS Global Vegetation Index) 基础上开发的。MGVI是根据MERIS传感器的特性和辐射传输方法设计的指数, 是蓝光、红光及近红外波段冠层反射率的函数, 其优点在于无需进行大气校正, 可直接根据表观反射率的数学关系计算FPAR (Gobron等, 1999)。SeaWiFS FPAR产品也是基于MGVI指数开发的 (Gobron等, 2006), 与MERIS产品共同形成了JRC-FPAR产品系列。SeaWiFS传感器的成像时间大约是当地时间12:05, 其FPAR产品对应于叶绿素组分吸收的直射光FPAR。同样, MERIS FPAR产品对应于当地时间10:00 am的PAV吸收的直射光FPAR。

正如前面算法部分介绍, CYCLOPES FPAR产品算法是基于PROSAIL模型的神经网络方法 (Baret等, 2007)。同样, GEOV1-FPAR产品基于SPOT/VEGETATION观测数据 (2014-05开始基于PROBA-V数据), 也是使用神经网络算法生产的。算法基于一维辐射传输方程, 通过融合MODIS FPAR C5和CYCLOPES3的数据产品为冠层FPAR真值, 将FPAR真值和冠层顶反射率数据作为训练样本输入神经网络模型中, 用于生产GEOV1产品 (Baret等, 2013)。GEOV1 FPAR产品对应于当地时间10:15 am左右PAV吸收的黑空FPAR。

此外, Zhu等 (2013) 还利用神经网络技术,



结合 AVHRR 观测数据及 MODIS FPAR 产品生产了长时间序列的 FPAR3g 产品。GLASS FPAR 产品是在 GLASS 全球 LAI 数据产品的基础上, 利用植被辐射吸收和透过率的关系, 忽略冠层内多次散射和土壤反射对植被吸收的影响, 通过计算透过率求解得到的 (Xiao 等, 2015a)。由于 GLASS 全球 LAI 产品是基于 MODIS LAI 产品和神经网络方法 (Xiao 等, 2015b), GLASS FPAR 产品也可以认为间接地出自于神经网络算法的产品。GLASS FPAR 产品为当地时间 10:30 am 的直射、散射总 FPAR, 即蓝空 FPAR。GLASS FPAR 产品与 LAI 一样, 在开发时就特别注意解决以往的 FPAR 数据产品在时间与空间维度的不连续与数据缺失等问题, 这一点是 GLASS FPAR 产品的优势 (Xiao 等, 2015b)。

## 4.2 FPAR 产品的精度和不确定性

FPAR 产品的精度直接影响陆地生态系统过程和全球碳循环模型的估计精度。各类生态模型需要 FPAR 作为输入参数时, 对 FPAR 精度非常敏感 (Liu 等, 2014a)。一般而言, FPAR 产品相对误差应不高于 10%, 绝对误差不高于 0.05 (GCOS, 2011)。因此, 对现有 FPAR 产品进行精度评价对于提高数据使用的合理性将非常重要。针对不同区域、不同植被类型的 FPAR 产品的验证一直受到广泛关注 (Fensholt 等, 2004; Baret 等, 2007; Liu 等, 2018)。

### 4.2.1 FPAR 地面验证

实地观测时, 一般使用搭载在无人机、通量塔或安放在地面的太阳辐射分析仪器测量不同位置的光合有效辐射强度 (Zhao 等, 2016); 或利用 SunScan, Accupar 等冠层分析仪计算瞬时辐射拦截率; 也可以用半球观测得鱼眼相机 (DHP) (Weiss 等, 2007) 或者 LAI2000 观测冠层透过率, 然后再基于 FPAR 的计算公式获取 FPAR 的地面测量值, 用于对 FPAR 遥感产品的验证。但是现有这些观测设备都无法区分直射和散射辐射吸收, 测量得到的是蓝空 FPAR, 仅 SunScan 能够同步观测得到天空直射和散射辐射比例。

一般而言, 利用 SunScan, Accupar 等冠层分析仪对农田或草地测量得到的是入射植被冠层和植被冠层反射的太阳辐射, 根据式 (1) 计算所得的 FPAR 就是  $FPAR_{\text{foliage}}$ 。针对低矮植被 FPAR 不易

测量的问题, Liu 等 (2013) 在测量植被覆盖度方法的基础上, 发展了面向草地等低矮植被的 FPAR 测量方法。但是森林  $FPAR_{\text{foliage}}$  的测量就非常困难, 测量结果就包括了 NPV 部分的吸收, 很难通过观测扣除这部分吸收, 目前只能通过测量得到 NPV 的比例和反射率, 再通过模拟计算得到。

Widłowski (2010) 对作物 FPAR 的实测方法进行了比较和探讨, 认为天空散射光比例等环境因素和植被结构都会对 FPAR 的实地观测造成影响。此外, 植被形态及上下行辐射观测的同步性也影响实测 FPAR 的精度, 对于离散、行播作物的 FPAR 精确观测缺乏有针对性的设计, 使用 SunScan 等仪器进行上下行辐射观测时同步性难以严格保证, 成为实测数据不确定性的来源。目前整体上对于 FPAR 实测的研究还不够深入, 为进一步提高 FPAR 遥感估算验证的准确性, 对于 FPAR 的地面精确测量方法还需要进一步深入研究。

### 4.2.2 FPAR 产品交叉验证

由于地面观测无法在大范围内获取数据, 因此不同 FPAR 产品间也常常进行相互交叉比较验证 (Liu 等, 2014a)。Tao 等 (2015) 比较分析了 5 种 FPAR 产品, 发现 FPAR 产品间的数值差异可达 0.09—0.14。在使用较为广泛的产品中, MODIS FPAR 产品精度的验证工作比较多, 因此常常作为交叉验证中的参考产品。

产品间的横向比较表明, MODIS、MISR、GEOV1 产品彼此间表现出较好的一致性, MERIS 和 SeaWiFs 产品间表现出较好的一致性, 但两个数据集彼此间最大差距也可达 0.1。MERIS FPAR 产品与其他产品的交叉比较结果表明, 该产品的估算误差在 0.1—0.12 (D'Odorico 等, 2014; Gobron 等, 2008; Martínez 等, 2013; Pickett-Heaps 等, 2014; Seixas 等, 2009)。SeaWiFs FPAR 产品的交叉验证结果显示, 其估算精度误差对不同区域、不同条件的植被变化较大, 基本在 0.10—0.23 (Camacho 等, 2013; Gobron 等, 2006; McCallum 等, 2010; Pickett-Heaps 等, 2014)。经与 MODIS Collection 5 及 SeaWiFs 产品对比, GEOV1 产品的最高精度约为 0.1 (Baret 等, 2013; Camacho 等, 2013)。

Xiao 等 (2015b) 验证结果发现, GLASS FPAR 产品在空间分布上与 MODIS、GEOV1、SeaWiFs 等

产品表现出了较强的一致性,在数据时间维度上的连续性上要优于MODIS产品,与实测数据相比精度优于MODIS, GEOV1, SeaWiFs等产品。

从时间和空间维度的分布上看,各类FPAR产品在北半球表现出了较好的一致性,优于南半球;在森林覆盖区域一致性更好,在草原或常绿阔叶林等地带则相对误差较大(Tao等, 2015)。其原因可能是各种FPAR产品在不同植被覆盖类型区域表现不同,南北半球的植被分布规律对FPAR估算的时空精度产生了影响。

#### 4.2.3 FPAR产品精度

在实际应用过程中,MODIS FPAR估算的精度不断提高,使用辐射传输主算法生产产品的占比也在提高(Steinberg等, 2006)。随着算法的改进,MODIS FPAR Collection 5系列产品的估算误差在0.1左右,且在部分情况下仍存在着高估现象(Baret等, 2013; Camacho等, 2013)。最新的MODIS FPAR Collection 6的产品精度同样存在高估情况,高估程度与C5产品大致相同(Yan等, 2016a, 2016b; Fu和Wu, 2017)。

分析MODIS、MISR、MERIS、SeaWiFs和GEOV1等5种常见的FPAR产品在不同植被类型的表现,可以对FPAR产品应用于不同类型植被时的精度有更为直观的认识(Tao等, 2015)。在草地、灌丛、作物、热带草原和常绿阔叶林中,以上5种产品的表现较为稳定,MODIS产品和MISR产品存在较为显著的高估,SeaWiFs和MERIS存在明显的低估,GEOV1对作物高估而对常绿阔叶林低估。在落叶阔叶林地带,不同产品表现相差较大,MODIS和MISR总体仍呈现全年高估趋势,MISR在夏秋季节高估更为明显,GEOV1在3—11月存在高估,其余时间则高估幅度不大,而SeaWiFs和MERIS呈现全年低估的趋势。各数据产品在针叶林FPAR的估计中差异明显,精度波动较大。GEOV1产品对夏季针叶林显著高估而冬季却显著低估,SeaWiFs和MERIS冬季低估较少,其中SeaWiFs甚至存在高估情况,而在夏季显著低估。MODIS和MISR FPAR产品总体呈现出高估趋势,但季节间高估程度不同。

对MERIS, MODIS, MISR和GEOV1 FPAR产品的地面验证结果表明,冠层FPAR的不确定性可达0.14, NPV的影响会导致MODIS和CYCLOPES

的冠层FPAR产品明显高估。而 $FPAR_{\text{foliage}}$  ( $FPAR_{\text{green}}$ )的不确定性为0.09。总体上看,目前FPAR数据产品在估算精度上随空间、时间变化较大,其总体精度接近但还未满足数据应用的基本要求。

FPAR产品精度不确定性来源于多个方面,物理方法中对地表及太阳辐射的建模存在一定程度的近似,输入参数也比较多,算法本身缺陷给估算带来了误差。例如,MODIS算法仅考虑植被对直射光的吸收,相比于MISR传感器同时考虑直射光和散射光的情况,MODIS产品的值整体偏小(McCallum等, 2010)。类似问题在MERIS和SeaWiFs数据产品中同样存在。

在某些情况下,由于观测几何不良导致MODIS主算法失效,需采用备用半经验算法(在秋冬季节尤为显著),而半经验算法估算精度不及主算法。

MODIS算法对于土地覆盖类型的分类精度要求较高,地表分类和混合像元造成的误差可以直接传递到对FPAR的估算当中。LAI、地表反射率、冠层覆盖率等参数的改变也可能显著影响FPAR的反演值(Asner等, 1998; Kanniah等, 2009; Weiss等, 2007),从而产生较大的不确定性。因此,解决这些不确定性是提高FPAR产品精度的前提和基础。

地形因素也会影响FPAR产品精度,但研究表明,地形对FPAR算法精度的影响主要在中高分辨率。很多植被生长区域,尤其是林区,大多存在一定的地形起伏,利用区域地形数据对FPAR模型进行改进,可提高中高分辨率FPAR的遥感估算精度(Zhao等, 2016)。

#### 4.3 遥感FPAR产品时空尺度研究

由于各类遥感数据的空间分辨率不尽相同,在空间异质性较高地区,不同分辨率的FPAR产品间存在尺度问题,会影响植被生产力的估算精度。Wang等(2015)基于FAPAR-P模型进行了FPAR尺度效应和尺度转换的研究,并在黑河地区进行了验证。

遥感数据产品由于数据缺失、云遮挡等原因常常存在数值不连续的问题,应用于FPAR估算时会影响数据产品在时间和空间维度上的连续性。考虑到植被的结构和反射特性在固定某些情况下

在时空上是连续的, 可以根据这一特性, 设计同化算法对缺失值进行修复 (Xiao 等, 2015a)。Moreno 等 (2014) 比较了自适应局部回归方法、平滑样条方法、双 Logistic 方法、数据重建插值、Savitzky-Golay 方法应用于 FPAR 产品噪声去除和缺失值填充中的效果, 表明自适应局部回归方法和 Savitzky-Golay 方法在 FPAR 时间序列修复和噪声去除中效果较好。

## 5 结 语

### 5.1 结论

FPAR 是植被生产力估算和陆表能量平衡研究中的重要参量, 本文对 2008 年以来 FPAR 遥感研究的新进展进行了梳理, 研究表明十年来 FPAR 相关研究稳步增加, FPAR 产品的应用也日益广泛。FPAR 研究主要呈现出以下特点:

(1) FPAR 的概念体系逐渐丰富和发展。针对不同类型应用需求, 形成了对应不同光照条件、从叶绿素到叶片、冠层的一系列概念。但是在不同的应用需求下, 何种概念更有意义、更适用, 目前在实际应用中还较为模糊。

(2) 大量研究分别从经验方法、物理方法中的辐射传输模型和植被结构方法出发, 设计了多种 FPAR 算法。特别是神经网络等机器学习方法也逐渐应用于产品生产。但是从研究需求的角度看, 目前主要的几种 FPAR 产品精度还无法满足需求, 算法研制与改进逐渐进入瓶颈。如何去除 NPV 的吸收, 考虑土壤背景对 FPAR 的影响、特别是森林 FPAR<sub>chl</sub> 的地面测量, 这些难题仍旧没有得到很好地解决。

(3) FPAR 产品种类多样, 包括 MODIS、MISR、MERIS、SeaWiFS、GEOV1、GLASS、CYCLOPES、VIIRS、FPAR3g 等, 但多是中低分辨率产品。验证结果表明, FPAR 产品的类型和不确定性还无法完全满足各类研究工作的要求。还应当继续发展多样化时空尺度 FPAR 产品, 例如叶绿素 FPAR、黑空、白空 FPAR 以及适用于阴天有云条件 FPAR 产品、日均 FAPAR 产品, 以满足应用需求。

### 5.2 展望

随着 FPAR 遥感研究的逐渐深入, 更加多元的

概念体系对植被光合有效辐射吸收过程有了更加精细的描述, 为未来的研究工作拓展了新的外延。目前已经开展的研究表明, 叶绿素在 728 nm 和 745 nm 波长处也可进行光合作用 (Nürnberg 等, 2018)。那么, 光合有效辐射的定义是否要做出相应的拓展仍需要进一步深入探讨。

目前 FPAR 的概念与物理内涵还存在不一致的问题, 已经有学者尝试使用 EVI (Gitelson 等, 2006; Wu 等, 2009, 2010), SIF (Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence) (Guanter 等, 2014; Porcar-Castell 等, 2014; Du 等, 2017) 代替 FPAR 结合光能利用率模型进行植被生产力估算 (Dong 等, 2015)。因此, 对于未来 FPAR 的遥感研究, 机遇与挑战并存。

未来 FPAR 遥感估算方法的研究应当在统一 FPAR 概念体系的基础上, 致力于提高 FPAR 产品生产精度。在概念上要將不同光照条件下 (黑空、白空) 与不同层次 (冠层、叶片、叶绿素) 的 FPAR 相融合, 总结适用于不同应用场景的标准化 FPAR 产品应用模式。

在算法及产品生产上, 一方面可在当前正演模型的基础上, 探索提高土壤反照率、LAI、CI 等输入产品精度的方法, 以提高估算精度; 另一方面可以尝试设计不依赖植被结构的反演方法, 直接从传感器观测数据估算 FPAR (陶欣 等, 2009; 刘镛源, 2016)。

Sentinel-2、VIIRS、中国高分系列等卫星投入使用, 为提高 FPAR 产品的时空连续性和尺度多样性提供了有效支持, 也为 FPAR 遥感估算的发展提供了新的契机。只有把握新的机遇, 面向 GPP 估算等主要应用领域, 提高估算精度和产品时空连续性, 才能更有效地发挥 FPAR 这一关键因子在全球碳循环定量研究中的积极作用, 推动有关学科的发展。

## 参考文献 (References)

- Asner G P, Wessman C A and Archer S. 1998. Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems. *Ecological Applications*, 8(4): 1003-1021 [DOI: 10.1890/1051-0761(1998)008[1003:SDOAOP]2.0.CO;2]
- Bacour C, Baret F, Béal D, Weiss M and Pavageau K. 2006. Neural network estimation of LAI, FAPAR,  $fCover$  and LAI $\times$ C<sub>ab</sub> from

- top of canopy MERIS reflectance data: principles and validation. *Remote Sensing of Environment*, 105(4): 313-325 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.014]
- Baret F, Hagolle O, Geiger B, Bicheron P, Miras B, Huc M, Berthelot B, Niño F, Weiss M, Samain O, Roujean J L and Leroy M. 2007. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION: part 1: principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 110(3): 275-286 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.02.018]
- Baret F, Weiss M, Lacaze R, Camacho F, Makhmara H, Pacholczyk P and Smets B. 2013. GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: principles of development and production. *Remote Sensing of Environment*, 137: 299-309 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.027]
- Bonan G B, Oleson K W, Vertenstein M, Levis S, Zeng X B, Dai Y J, Dickinson R E and Yang Z L. 2002. The land surface climatology of the community land model coupled to the NCAR community climate model. *Journal of Climate*, 15(22): 3123-3149 [DOI: 10.1175/1520-0442(2002)015<3123:TLSCOT>2.0.CO;2]
- Braswell B H, Schimel D S, Privette J L, Moore III B, Emery W J, Sulzeman E W and Hudak A T. 1996. Extracting ecological and biophysical information from AVHRR optical data: an integrated algorithm based on inverse modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D18): 23335-23348 [DOI: 10.1029/96JD02181]
- Camacho F, Cernicharo J, Lacaze R, Baret F and Weiss M. 2013. GEOV1: LAI, FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. part 2: validation and intercomparison with reference products. *Remote Sensing of Environment*, 137: 310-329 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.030]
- Cao R Y, Shen M G, Chen J and Tang Y H. 2014. A simple method to simulate diurnal courses of PAR absorbed by grassy canopy. *Ecological Indicators*, 46: 129-137 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.06.017]
- Carré D, Roujean J L, Lafont S, Calvet J C, Boone A, Decharme B, Delire C and Gastellu-Etchegorry J P. 2013. A canopy radiative transfer scheme with explicit FAPAR for the interactive vegetation model ISBA-A-gs: impact on carbon fluxes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(2): 888-903 [DOI: 10.1002/jgrg.20070]
- Casanova D, Epema G F and Goudriaan J. 1998. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. *Field Crops Research*, 55(1/2): 83-92 [DOI: 10.1016/S0378-4290(97)00064-6]
- Chasmer L, Hopkinson C, Treitz P, McCaughey H, Barr A and Black A. 2008. A Lidar-based hierarchical approach for assessing MODIS FPAR. *Remote Sensing of Environment*, 112(12): 4344-4357 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.08.003]
- Chen J M. 1996. Canopy architecture and remote sensing of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by boreal conifer forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(6): 1353-1368 [DOI: 10.1109/36.544559]
- Chen L F, Gao Y H, Li L, Liu Q H and Gu X F. 2008. Forest NPP estimation based on MODIS data under cloudless condition. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(3): 331-338 [DOI: 10.1007/s11430-008-0013-8]
- Clevers J G P W, Van Leeuwen H J C and Verhoef W. 1994. Estimating the fraction APAR by means of vegetation indices: a sensitivity analysis with a combined prospect-sail model. *Remote Sensing Reviews*, 9(3): 203-220 [DOI: 10.1080/02757259409532225]
- Cristiano P M, Posse G, Di Bella C M and Jaimes F R. 2010. Uncertainties in fPAR estimation of grass canopies under different stress situations and differences in architecture. *International Journal of Remote Sensing*, 31(15): 4095-4109 [DOI: 10.1080/01431160903229192]
- D'Odorico P, Gonsamo A, Pinty B, Gobron N, Coops N, Mendez E and Schaepman M E. 2014. Intercomparison of fraction of absorbed photosynthetically active radiation products derived from satellite data over Europe. *Remote Sensing of Environment*, 142: 141-154 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.12.005]
- Daughtry C S T, Gallo K P, Goward S N, Prince S D and Kustas W P. 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment*, 39(2): 141-152 [DOI: 10.1016/0034-4257(92)90132-4]
- Dong J W, Xiao X M, Wagle P, Zhang G L, Zhou Y T, Jin C, Torn M S, Meyers T P, Suyker A E, Wang J B, Yan H M, Biradar C and Moore III B. 2015. Comparison of four EVI-based models for estimating gross primary production of maize and soybean croplands and tallgrass prairie under severe drought. *Remote Sensing of Environment*, 162: 154-168 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.022]
- Donohue R J, McVicar T R and Roderick M L. 2009. Climate-related trends in Australian vegetation cover as inferred from satellite observations, 1981-2006. *Global Change Biology*, 15(4): 1025-1039 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01746.x]
- Du S S, Liu L Y, Liu X J and Hu J C. 2017. Response of canopy solar-induced chlorophyll fluorescence to the absorbed photosynthetically active radiation absorbed by chlorophyll. *Remote Sensing*, 9(9): 911 [DOI: 10.3390/rs9090911]
- Fan W J, Liu Y, Xu X R, Chen G X and Zhang B T. 2014. A new FAPAR analytical model based on the law of energy conservation: a case study in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(9): 3945-3955 [DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2325673]
- Farquhar G D and Roderick M L. 2003. Pinatubo, diffuse light, and the carbon cycle. *Science*, 299(5615): 1997-1998 [DOI: 10.1126/science.1080681]

- Fensholt R, Sandholt I and Rasmussen M S. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 91(3/4): 490-507 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.04.009]
- Fernández N, Paruelo J M and Delibes M. 2010. Ecosystem functioning of protected and altered mediterranean environments: a remote sensing classification in Doñana, Spain. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 211-220 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.09.001]
- Fu G and Wu J S. 2017. Validation of MODIS collection 6 FPAR/LAI in the alpine grassland of the northern Tibetan plateau. *Remote Sensing Letters*, 8(9): 831-838 [DOI: 10.1080/2150704X.2017.1331054]
- Gao Y H, Chen L F, Liu Q H, Gu X F and Tian G L. 2006. Research on remote sensing model for FPAR absorbed by chlorophyll. *Journal of Remote Sensing*, 10(5): 798-803 (高彦华, 陈良富, 柳钦火, 顾行发, 田国良. 2006. 叶绿素吸收的光合有效辐射比率的遥感估算模型研究. *遥感学报*, 10(5): 798-803) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2006.05.029]
- García M, Sandholt I, Ceccato P, Ridler M, Mougín E, Kergoat L, Morillas L, Timouk F, Fensholt R and Domingo F. 2013. Actual evapotranspiration in drylands derived from in-situ and satellite data: assessing biophysical constraints. *Remote Sensing of Environment*, 131: 103-118 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.016]
- GCOS. 2011. Systematic Observation Requirements for Satellite-Based Data Products for Climate. WMO/TD No. 1338. WMO: 79-83
- Gitelson A A, Viña A, Verma S B, Rundquist D C, Arkebauer T J, Keydan G, Leavitt B, Ciganda V, Burba G G and Suyker A E. 2006. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D8): D08S11 [DOI: 10.1029/2005JD006017]
- Gitelson A A. 2019. Remote estimation of fraction of radiation absorbed by photosynthetically active vegetation: generic algorithm for maize and soybean. *Remote Sensing Letters*, 10(3): 283-291 [DOI: 10.1080/2150704X.2018.1547445]
- Gobron N, Pinty B, Aussenat O, Chen J M, Cohen W B, Fensholt R, Gond V, Huemmrich K F, Lavergne T, Mélin F, Privette J L, Sandholt I, Taberner M, Turner D P, Verstraete M M and Widowski J L. 2006. Evaluation of fraction of absorbed photosynthetically active radiation products for different canopy radiation transfer regimes: methodology and results using joint research center products derived from SeaWiFS against ground-based estimations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D13): D13110 [DOI: 10.1029/2005JD006511]
- Gobron N, Pinty B, Aussenat O, Taberner M, Faber O, Mélin F, Lavergne T, Robustelli M and Snoeij P. 2008. Uncertainty estimates for the FAPAR operational products derived from MERIS — impact of top-of-atmosphere radiance uncertainties and validation with field data. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1871-1883 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.09.011]
- Gobron N, Pinty B, Mélin F, Taberner M, Verstraete M M, Robustelli M and Widowski J L. 2007. Evaluation of the MERIS/ENVISAT FAPAR product. *Advances in Space Research*, 39(1): 105-115 [DOI: 10.1016/j.asr.2006.02.048]
- Gobron N, Pinty B, Verstraete M and Govaerts Y. 1999. The MERIS Global Vegetation Index (MGVI): description and preliminary application. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9): 1917-1927 [DOI: 10.1080/014311699212542]
- Goetz S J, Prince S D, Goward S N, Thawley M M, Small J and Johnston A. 1999. Mapping net primary production and related biophysical variables with remote sensing: application to the BOREAS region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D22): 27719-27734 [DOI: 10.1029/1999JD900269]
- Goward S N and Huemmrich K F. 1992. Vegetation canopy PAR absorption and the normalized difference vegetation index: an assessment using the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 39(2): 119-140 [DOI: 10.1016/0034-4257(92)90131-3]
- Gower S T, Kucharik C J and Norman J M. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index,  $f_{\text{APAR}}$ , and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70(1): 29-51 [DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00056-5]
- Gu L H, Baldocchi D, Verma S B, Black T A, Vesala T, Falge E M and Dowdy P R. 2002. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D6): 4050 [DOI: 10.1029/2001JD001242]
- Gu L H, Baldocchi D D, Wofsy S C, Munger J W, Michalsky J J, Urbanski S P and Boden T A. 2003. Response of a deciduous forest to the mount pinatubo eruption: enhanced photosynthesis. *Science*, 299(5615): 2035-2038 [DOI: 10.1126/science.1078366]
- Guanter L, Zhang Y G, Jung M, Joiner 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]
- Hanan N P, Burba G, Verma S B, Berry J A, Suyker A and Walter-Shea E A. 2002. Inversion of net ecosystem CO<sub>2</sub> flux measurements for estimation of canopy PAR absorption. *Global Change Biology*, 8(6): 563-574 [DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00488.x]
- Hanan N P, Kabat P, Dolman A J and Elbers J A. 1998. Photosynthesis and carbon balance of a Sahelian fallow savanna. *Global Change Biology*, 4(5): 523-538 [DOI: 10.1046/j.1365-2486.1998.t01-1-00126.x]
- He L M, Chen J M, Pan Y D, Birdsey R and Kattge J. 2012. Relation-

- ships between net primary productivity and forest stand age in U. S. forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(3): (GB3009 [DOI: 10.1029/2010GB003942])
- Jenkins J P, Richardson A D, Braswell B H, Ollinger S V, Hollinger D Y and Smith M L. 2007. Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(1/2): 64-79 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2006.11.008]
- Kaminski T, Knorr W, Scholze M, Gobron N, Pinty B, Giering R and Mathieu P P. 2012. Consistent assimilation of MERIS FAPAR and atmospheric CO<sub>2</sub> into a terrestrial vegetation model and interactive mission benefit analysis. *Biogeosciences*, 9(8): 3173-3184 [DOI: 10.5194/bg-9-3173-2012]
- Kanniah K D, Beringer J, Hutley L B, Tapper N J and Zhu X. 2009. Evaluation of Collections 4 and 5 of the MODIS Gross Primary Productivity product and algorithm improvement at a tropical savanna site in northern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 113(9): 1808-1822 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.04.013]
- King D A, Turner D P and Ritts W D. 2011. Parameterization of a diagnostic carbon cycle model for continental scale application. *Remote Sensing of Environment*, 115(7): 1653-1664 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.024]
- Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, Diner D J and Running S W. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D24): 32257-32275 [DOI: 10.1029/98JD02462]
- Lambers H, Chapin III F S and Pons T L. 1998. *Plant Physiological Ecology*. New York: Springer-Verlag
- Li L, Du Y M, Tang Y, Xin X Z, Zhang H L, Wen J G and Liu Q H. 2015b. A new algorithm of the FPAR product in the Heihe river basin considering the contributions of direct and diffuse solar radiation separately. *Remote Sensing*, 7(5): 6414-6432 [DOI: 10.3390/rs70506414]
- Li L, Xin X Z, Zhang H L, Yu J F, Liu Q H, Yu S S and Wen J G. 2015a. A method for estimating hourly Photosynthetically Active Radiation (PAR) in China by combining geostationary and polar-orbiting satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 165: 14-26 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.034]
- Li W J and Fang H L. 2015. Estimation of direct, diffuse, and total FPARs from Landsat surface reflectance data and ground-based estimates over six FLUXNET sites. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(1): 96-112 [DOI: 10.1002/2014JG002754]
- Lin S R, Li J and Liu Q H. 2018. Overview on estimation accuracy of gross primary productivity with remote sensing method. *Journal of Remote Sensing*, 22(2): 234-252 (林尚荣, 李静, 柳钦火. 2018. 陆地总初级生产力遥感估算精度分析. *遥感学报*, 22(2): 234-252 [DOI: 10.11834/jrs.20186456])
- Liu J G, Miller J R, Haboudane D, Pattey E and Hochheim K. 2008. Crop fraction estimation from *casi* hyperspectral data using linear spectral unmixing and vegetation indices. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34(sup 1): S124-S138 [DOI: 10.5589/m07-062]
- Liu L Y, Peng D L, Hu Y and Jiao Q 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 [DOI: 10.3390/rs5010274]
- Liu R Y. 2016. *FPAR Retrieval Method Development Based on Radiative Transfer Model and the Application*. Beijing: Beijing Normal University (刘睿源. 2016. 基于辐射传输模型的FPAR遥感反演方法研究与应用. 北京: 北京师范大学)
- Liu R Y, Ren H Z, Liu S H and Liu Q. 2014a. Evaluation of MODIS, POLDER and CYCLOPES global FPAR products//Proceedings of 2014IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City: IEEE: 5068-5071 [DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947636]
- Liu R Y, Ren H Z, Liu S H, Liu Q and Li X W. 2015. Modelling of fraction of absorbed photosynthetically active radiation in vegetation canopy and its validation. *Biosystems Engineering*, 133: 81-94 [DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.03.004]
- Liu R Y, Ren H Z, Liu S H, Liu Q, Yan B K and Gan F P. 2018. Generalized FPAR estimation methods from various satellite sensors and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260-261: 55-72 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.05.024]
- Liu Z J, Shao Q Q and Liu J Y. 2014b. The performances of MODIS-GPP and -ET products in china and their sensitivity to input data (FPAR/LAI). *Remote Sensing*, 7(1): 135-152 [DOI: 10.3390/rs70100135]
- Liu Z Y, Notaro M, Kutzbach J and Liu N Z. 2006. Assessing global vegetation-climate feedbacks from observations. *Journal of Climate*, 19(5): 787-814 [DOI: 10.1175/JCLI3658.1]
- Lotsch A, Tian Y, Friedl M A and Myneni R B. 2003. Land cover mapping in support of LAI and FPAR retrievals from EOS-MODIS and MISR: classification methods and sensitivities to errors. *International Journal of Remote Sensing*, 24(10): 1997-2016 [DOI: 10.1080/01431160210154858]
- Mackey B, Berry S, Hugh S, Ferrier S, Harwood T D and Williams K J. 2012. Ecosystem greenspots: identifying potential drought, fire, and climate-change micro-refuges. *Ecological Applications*, 22(6): 1852-1864 [DOI: 10.1890/11-1479.1]
- Madani N, Kimball J S, Affleck D L R, Kattge J, Graham J, van Bodegom P M, Reich P B and Running S W. 2014. Improving ecosystem productivity modeling through spatially explicit estimation of optimal light use efficiency. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(9): 1755-1769 [DOI: 10.1002/2014JG002709]

- Majasalmi T, Rautiainen M and Stenberg P. 2016. Modeled and measured FPAR in a boreal forest: validation and application of a new model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190: 118-124 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.01.015]
- Martínez B, Camacho F, Verger A, García-Haro F J and Gilabert M A. 2013. Intercomparison and quality assessment of MERIS, MODIS and SEVIRI FAPAR products over the Iberian peninsula. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 463-476 [DOI: 10.1016/j.jag.2012.06.010]
- Maselli F, Chiesi M, Fibbi L and Moriondo M. 2008. Integration of remote sensing and ecosystem modelling techniques to estimate forest net carbon uptake. *International Journal of Remote Sensing*, 29(8): 2437-2443 [DOI: 10.1080/01431160801894857]
- McCallum I, Wagner W, Schmillius C, Shvidenko A, Obersteiner M, Fritz S and Nilsson S. 2010. Comparison of four global FAPAR datasets over Northern Eurasia for the year 2000. *Remote Sensing of Environment*, 114(5): 941-949 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.009]
- Melis C, Szafrńska P A, Jędrzejewska B and Bartoń K. 2006. Biogeographical variation in the population density of wild boar (*Sus scrofa*) in western Eurasia. *Journal of Biogeography*, 33(5): 803-811 [DOI: 10.1111/j.1365-2699.2006.01434.x]
- Mercado L M, Bellouin N, Sitch S, Boucher O, Huntingford C, Wild M and Cox P M. 2009. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature*, 458(7241): 1014-1017 [DOI: 10.1038/nature07949]
- Monteith J L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9(3): 747-766 [DOI: 10.2307/2401901]
- Monteith J L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transaction of the Royal Society: Biological Sciences*, 281(980): 277-294 [DOI: 10.1098/rstb.1977.0140]
- Moreno Á, García-Haro F J, Martínez B and Gilabert M A. 2014. Noise reduction and gap filling of FAPAR time series using an adapted local regression filter. *Remote Sensing*, 6(9): 8238-8260 [DOI: 10.3390/rs6098238]
- Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, Privette J L, Glassy J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G R, Lotsch A, Friedl M, Morissette J T, Votava P, Nemani R R and Running S W. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 214-231 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00074-3]
- Nürnberg D J, Morton J, Santabarbara S, Telfer A, Joliot P, Antonaru L A, Ruban A V, Cardona T, Krausz E, Boussac A, Fantuzzi A and Rutherford A W. 2018. Photochemistry beyond the red limit in chlorophyll f-containing photosystems. *Science*, 360(6394): 1210-1213 [DOI: 10.1126/science.aar8313]
- Ogutu B O and Dash J. 2013. An algorithm to derive the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by photosynthetic elements of the canopy (FAPAR<sub>ps</sub>) from eddy covariance flux tower data. *New Phytologist*, 197(2): 511-523 [DOI: 10.1111/nph.12039]
- Pickett-Heaps C A, Canadell J G, Briggs P R, Gobron N, Haverd V, Paget M J, Pinty B and Raupach M R. 2014. Evaluation of six satellite-derived fraction of absorbed photosynthetic active radiation (FAPAR) products across the Australian continent. *Remote Sensing of Environment*, 140: 241-256 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.037]
- Pinty B, Lavergne T, Widlowski J L, Gobron N and Verstraete M M. 2009. On the need to observe vegetation canopies in the near-infrared to estimate visible light absorption. *Remote Sensing of Environment*, 113(1): 10-23 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.08.017]
- 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]
- Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A and Klooster S A. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4): 811-841 [DOI: 10.1029/93GB02725]
- Prince S D and Goward S N. 1995. Global primary production: a remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 22(4/5): 815-835 [DOI: 10.2307/2845983]
- Rahman M M, Lamb D W and Stanley J N. 2015. The impact of solar illumination angle when using active optical sensing of NDVI to infer FAPAR in a pasture canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 202: 39-43 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.12.001]
- Ridao E, Conde J R and Mínguez M I. 1998. Estimating fAPAR from nine vegetation indices for irrigated and nonirrigated faba bean and semileafless pea canopies. *Remote Sensing of Environment*, 66(1): 87-100 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00050-9]
- Seixas J, Carvalhais N, Nunes C and Benali A. 2009. Comparative analysis of MODIS-FAPAR and MERIS - MGVI datasets: potential impacts on ecosystem modeling. *Remote Sensing of Environment*, 113(12): 2547-2559 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.018]
- Steinberg D C, Goetz S J and Hyer E J. 2006. Validation of MODIS F<sub>PAR</sub> products in boreal forests of Alaska. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1818-1828 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.862266]
- Sun R and Zhu Q J. 1999. Net primary productivity of terrestrial vegetation—a review on related researches. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10(6): 757-760 (孙睿, 朱启疆. 1999. 陆地植被净第一性生产力的研究. *应用生态学报*, 10(6): 757-760)
- Tan C W, Samanta A, Jin X L, Tong L, Ma C, Guo W S, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2013. Using hyperspectral vegetation indices to estimate the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by corn canopies. *International Journal of Remote Sensing*

- ing, 34(24): 8789-8802 [DOI: 10.1080/01431161.2013.853143]
- Tao X, Fan W J, Wang D C, Yan B Y and Xu X R. 2009. Remote sensing retrieval of FAPAR: model and analysis. *Advances in Earth Science*, 24(7): 741-747 (陶欣, 范闻捷, 王大成, 闫彬彦, 徐希孺. 2009. 植被FAPAR的遥感模型与反演研究. *地球科学进展*, 24(7): 741-747) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2009.07.007]
- Tao X, Liang S L and He T. 2013. Estimation of fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation from multiple satellite data// *Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Melbourne: IEEE: 3072-3075 [DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6723475]
- Tao X, Liang S L and Wang D D. 2015. Assessment of five global satellite products of fraction of absorbed photosynthetically active radiation: intercomparison and direct validation against ground-based data. *Remote Sensing of Environment*, 163: 270-285 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.025]
- Tian Y, Dickinson R E, Zhou L, Zeng X, Dai Y, Myneni R B, Knyazikhin Y, Zhang X, Friedl M, Yu H, Wu W and Shaikh M. 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): D01103 [DOI: 10.1029/2003JD003777]
- Tian Y H, Zhang Y, Knyazikhin Y, Myneni R B, Glassy J M, Dedieu G and Running S W. 2000. Prototyping of MODIS LAI and FPAR algorithm with LASUR and LANDSAT data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2387-2401 [DOI: 10.1109/36.868894]
- Traore A K, Ciaia P, Vuichard N, MacBean N, Dardel C, Poulter B, Piao S L, Fisher J B, Viovy N, Jung M and Myneni R. 2014. 1982-2010 trends of light use efficiency and inherent water use efficiency in african vegetation: sensitivity to climate and atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *Remote Sensing*, 6(9): 8923-8944 [DOI: 10.3390/rs6098923]
- Turner D P, Ritts W D, Zhao M S, Kurc S A, Dunn A L, Wofsy S, Small E E and Running S W. 2006. Assessing interannual variation in MODIS-based estimates of gross primary production. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1899-1907 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.876027]
- 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]
- Verger A, Baret F and Weiss M. 2011. A multisensor fusion approach to improve LAI time series. *Remote Sensing of Environment*, 115(10): 2460-2470 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.006]
- Verhoef W and Bach H. 2007. Coupled soil - leaf-canopy and atmosphere radiative transfer modeling to simulate hyperspectral multi-angular surface reflectance and TOA radiance data. *Remote Sensing of Environment*, 109(2): 166-182 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.013]
- Wang L, Fan W J, Xu X R and Liu Y. 2015. Scaling transform method for remotely sensed FAPAR based on FAPAR-P model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(4): 706-710 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2359051]
- Wang Y J, Tian Y H, Zhang Y, El-Saleous N, Knyazikhin Y, Vermote E and Myneni R B. 2001. Investigation of product accuracy as a function of input and model uncertainties: case study with SeaWiFS and MODIS LAI/FPAR algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 78(3): 299-313 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00225-5]
- Wang Y T, Xie D H, Liu S, Hu R H, Li Y H and Yan G J. 2016. Scaling of FAPAR from the field to the satellite. *Remote Sensing*, 8(4): 310 [DOI: 10.3390/rs8040310]
- Weiss M, Baret F, Garrigues S and Lacaze R. 2007. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment*, 110: 317-331 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.001]
- Widlowski J L. 2010. On the bias of instantaneous FAPAR estimates in open-canopy forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(12): 1501-1522 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.07.011]
- Wu B F, Zeng Y and Huang J L. 2004. Overview of LAI/FPAR retrieval from remotely sensed data. *Advances in Earth Science*, 19(4): 585-590 (吴炳方, 曾源, 黄进良. 2004. 遥感提取植物生理参数 LAI/FPAR 的研究进展与应用. *地球科学进展*, 19(4): 585-590) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2004.04.015]
- Wu C Y, Niu Z and Gao S A. 2010. Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D12): D12127 [DOI: 10.1029/2009JD013023]
- Wu C Y, Niu Z, Tang Q, Huang W J, Rivard B and Feng J L. 2009. Remote estimation of gross primary production in wheat using chlorophyll-related vegetation indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6/7): 1015-1021 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.12.007]
- Xiao X M, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson E A, Zhang Q Y and Moore III B. 2004b. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 89(4): 519-534 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.008]
- Xiao X M, Zhang Q Y, Braswell B, Urbanski S, Boles S, Wofsy S, Moore III B and Ojima D. 2004a. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 91(2): 256-270 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.03.010]
- Xiao Z Q, Liang S L, Sun R, Wang J D and Jiang B. 2015b. Estimating the fraction of absorbed photosynthetically active radiation from the MODIS data based GLASS leaf area index product. *Remote Sensing of Environment*, 159: 100-110 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.025]



- Sensing of Environment, 171: 105-117 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.016]
- Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Xie D H, Song J L and Fensholt R. 2015a. A framework for consistent estimation of leaf area index, fraction of absorbed photosynthetically active radiation, and surface albedo from MODIS time-series data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6): 3178-3197 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2370071]
- Yan K, Park T, Chen C, Xu B D, Song W J, Yang B, Zeng Y L, Liu Z, Yan G J, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2018. Generating global products of LAI and FPAR from SNPP-VIIRS data: theoretical background and implementation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(4): 2119-2137 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2775247]
- Yan K, Park T, Yan G J, Chen C, Yang B, Liu Z, Nemani R R, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2016a. Evaluation of MODIS LAI/FPAR product collection 6. Part 1: consistency and improvements. *Remote Sensing*, 8(5): 359 [DOI: 10.3390/rs8050359]
- Yan K, Park T, Yan G J, Liu Z, Yang B, Chen C, Nemani R R, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2016b. Evaluation of MODIS LAI/FPAR product collection 6. part 2: validation and intercomparison. *Remote Sensing*, 8(6): 460 [DOI: 10.3390/rs8060460]
- Yoshida Y, Joiner J, Tucker C, Berry J, Lee J E, Walker G, Reichle R, Koster R, Lyapustin A and Wang Y. 2015. The 2010 Russian drought impact on satellite measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence: insights from modeling and comparisons with parameters derived from satellite reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 166: 163-177 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.06.008]
- Yuan W P, Cai W W, Xia J Z, Chen J Q, Liu S G, Dong W J, Merbold L, Law B, Arain A, Beringer J, Bernhofer C, Black A, Blanken P D, Cescatti A, Chen Y, Francois L, Gianelle D, Janssens I A, Jung M, Kato T, Kiely G, Liu D, Marcolla B, Montagnani L, Raschi A, Rouspard O, Varlagin A and Wohlfahrt G. 2014. Global comparison of light use efficiency models for simulating terrestrial vegetation gross primary production based on the LaThuile database. *Agricultural and Forest Meteorology*, 192-193: 108-120 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.03.007]
- Zhang Q Y, Cheng Y B, Lyapustin A I, Wang Y J, Gao F, Suyker A, Verma S and Middleton E M. 2014a. Estimation of crop gross primary production (GPP): fAPAR<sub>chl</sub> versus MOD15A2 FPAR. *Remote Sensing of Environment*, 153: 1-6 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.07.012]
- Zhang Q Y, Cheng Y B, Lyapustin A I, Wang Y J, Xiao X M, Suyker A, Verma S, Tan B and Middleton E M. 2014b. Estimation of crop Gross Primary Production (GPP): I. impact of MODIS observation footprint and impact of vegetation BRDF characteristics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 191: 51-63 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.02.002]
- Zhang Q Y, Cheng Y B, Lyapustin A I, Wang Y J, Zhang X Y, Suyker A, Verma S, Shuai Y M and Middleton E M. 2014c. Estimation of crop Gross Primary Production (GPP): II. do scaled MODIS vegetation indices improve performance? *Agricultural and Forest Meteorology*, 200: 1-8 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.09.003]
- Zhang Q Y, Middleton E M, Cheng Y B and Landis D R. 2013. Variations of foliage chlorophyll fAPAR and foliage non-chlorophyll fAPAR (fAPAR<sub>chl</sub>, fAPAR<sub>non-chl</sub>) at the Harvard forest. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(5): 2254-2264 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2275176]
- Zhang Q Y, Middleton E M, Gao B C and Cheng Y B. 2012. Using EO-1 Hyperion to simulate HypsIRI products for a coniferous forest: the fraction of PAR absorbed by chlorophyll (fAPAR<sub>chl</sub>) and leaf water content (LWC). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5): 1844-1852 [DOI: 10.1109/TGRS. 2011. 2169267]
- Zhang Q Y, Middleton E M, Margolis H A, Drolet G G, Barr A A and Black T A. 2009. Can a satellite-derived estimate of the fraction of PAR absorbed by chlorophyll (FAPAR<sub>chl</sub>) improve predictions of light-use efficiency and ecosystem photosynthesis for a boreal aspen forest? *Remote Sensing of Environment*, 113(4): 880-888 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.002]
- Zhang Q Y, Xiao X M, Braswell B, Linder E, Baret F and Moore III B. 2005. Estimating light absorption by chlorophyll, leaf and canopy in a deciduous broadleaf forest using MODIS data and a radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 99(3): 357-371 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.09.009]
- Zhang Y, Xiao X M, Wolf S, Wu J, Wu X C, Gioli B, Wohlfahrt G, Cescatti A, van der Tol C, Zhou S, Gough C M, Gentile P, Zhang Y G, Steinbrecher R and Ardö J. 2018. Spatio-temporal convergence of maximum daily light-use efficiency based on radiation absorption by canopy chlorophyll. *Geophysical Research Letters*, 45(8): 3508-3519 [DOI: 10.1029/2017GL076354]
- Zhao P, Fan W J, Liu Y, Mu X H, Xu X R and Peng J J. 2016. Study of the remote sensing model of FAPAR over rugged terrains. *Remote Sensing*, 8(4): 309 [DOI: 10.3390/rs8040309]
- Zhou X D, Zhu Q J, Wang J D, Sun R, Chen X and Wu M X. 2002. Interception of PAR, relationship between FPAR and LAI in summer maize canopy. *Journal of Natural Resources*, 17(1): 110-116 (周晓东, 朱启疆, 王锦地, 孙睿, 陈雪, 吴门新. 2002. 夏玉米冠层内 PAR 截获及 FPAR 与 LAI 的关系. *自然资源学报*, 17(1): 110-116) [DOI: 10.11849/zrzyxb.2002.01.016]
- Zhu Z C, Bi J, Pan Y Z, Ganguly S, Anav A, Xu L, Samanta A, Piao S L, Nemani R R and Myneni R B. 2013. Global data sets of Vegetation Leaf Area Index (LAI)<sub>3g</sub> and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)<sub>3g</sub> derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)<sub>3g</sub> for the period 1981 to 2011. *Remote Sensing*, 5(2): 927-948 [DOI: 10.3390/rs5020927]

## Progress of fraction of absorbed photosynthetically active radiation retrieval from remote sensing data

TIAN Dingfang, FAN Wenjie, REN Huazhong

1. *Institution of Remote Sensing and Geographical Information System, Peking University, Beijing 100871, China;*
2. *Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration & Its Applications, Peking University, Beijing 100871, China*

**Abstract:** The Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation(FPAR) is a key parameter in various global change process model, which characterizes the optical properties, photosynthesis process and growth state of canopy. The great progress of quantitative remote sensing and various data products make FPAR products widely used in carbon cycle, energy exchange and vegetation research both in global and regional scale. Because of the spatial heterogeneity of landscape, remote sensing is the only to monitor in large scale. Various methods were developed to obtain FPAR based on remote sensing technique. Empirical method based on the relationship between FPAR and vegetation index. High efficiency is the main feature of empirical method and the limit is that the generality of empirical relationship is weak. Physical method based on canopy model such as geometrical optics model and radiative transfer model which can be used in different kinds of land cover and large scale areas. But the input parameter and calculation process of physical method is relatively complex, which can influence the accuracy of result. In order to improve the accuracy of research, high quality and temporal resolution FPAR estimation is needed. In recent years, the improvement of FPAR algorithms, validation of FPAR products, FPAR of leaf and chlorophyll levels, direct and scattered FPAR (direct light and diffused light) and FPAR vertical distribution became new topics in this area. This paper reviewed the theory and methods of FPAR retrieval from remote sensing, and discussed the new progress of remotely sensed FPAR in past 10 years. The conclusion shows that research of FPAR is more and more important in recent years and the concept and scientific problems are gradually clear. New canopy models and algorithms improve the accuracy of products which promote the use of FPAR in various study areas. Especially, neural network becomes a new way of FPAR inversion which can avoid weak point of physic methods and improve the efficiency of the process. But there are also many aspects need to do in future. The accuracy of FPAR products still cannot reach the standard and products based on high spatial resolution data are required. Day average FPAR product is also important work to Net Primary Productivity (NPP) models. Canopy models also need to be improved in order to fit different kinds of vegetation. On the other hand, we need more high quality FPAR observation systems over the world to get enough reliable in-situ data for validation. Progress in photosynthesis mechanism research and sensors make it possible to realization these targets. New sensors were put in use in recent years. Improve the accuracy and diversity of remote sensing FPAR based on new generation satellite instrument will promote the application for FPAR in various fields.

**Key words:** vegetation quantitative remote sensing, FPAR, Canopy Absorption Model, remote sensing algorithm, products and validation

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 41971301)