

文章编号: 1007-4619(2006)05-0798-06

叶绿素吸收的光合有效辐射比率的 遥感估算模型研究

高彦华^{1,2}, 陈良富^{1,3,4}, 柳钦火¹, 顾行发^{1,3,5}, 田国良^{1,3}

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100049;

3. 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101; 4 江西师范大学 地理学院, 江西 南昌 330027;

5. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 光合有效辐射比率 (FPAR) 是陆地生态系统碳循环研究的重要参数。根据 FPAR 的物理意义, 本文提出了有效 FPAR 的概念: 即叶绿素吸收的 FPAR ($FPAR_{chl}$), 利用模拟数据建立了有效 FPAR 信息模型, 探讨了基于叶绿素含量估算有效 FPAR 的可行性, 为进一步采用有效 FPAR 来估算 NPP/GPP 提供思路和途径。利用实测数据对有效 FPAR 模型进行验证表明: (1) 叶片吸收的 FPAR ($FPAR_{leaf}$) 与有效 FPAR ($FPAR_{chl}$) 之间的差异较大。 $FPAR_{chl}$ 通常不足 $FPAR_{leaf}$ 的 50%, 两者之间虽存在一定的相关性, 而这种相关性是非线性的; (2) 叶绿素含量与 $FPAR_{leaf}$ 的相关性较高, 而与 $FPAR_{chl}$ 的相关性更高, 基于叶绿素含量可以以较高的精度估算 $FPAR_{leaf}$ 和 $FPAR_{chl}$, 经过验证, 估算的平均相对误差分别为 2.90% 和 6.6%; (3) 应用模拟数据建立的 $FPAR_{leaf}$ 及有效 FPAR 模型均在叶绿素含量大于 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时估算的精度较高, 而低于 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时估算的精度较低, 本文中叶绿素含量大于 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 60 个样本的 $FPAR_{leaf}$ 及 $FPAR_{chl}$ 的估算的平均相对误差, 分别为 1.79% 和 5.07%。

关键词: FPAR; 有效 FPAR; 叶绿素**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

Research on Remote Sensing Model for FPAR Absorbed by Chlorophyll

GAO Yan-hua^{1,2}, CHEN Liang-fu^{1,3,4}, LIU Qin-huo¹, GU Xing-fa^{1,3,5}, TIAN Guo-liang^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of

Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China;

4. Geography and Environment College, Jiangxi Normal University, Jiangxi Nanchang 330027, China;

5. School of Automation Engineering, the University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610054, China)

Abstract The Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FPAR) has been recognized as one of the important variables in carbon cycle research of terrestrial ecosystem. According to the physical meaning of FPAR, the concept of effective FPAR, which is FPAR absorbed by chlorophyll within the leaf, is introduced in this article. We developed the effective FPAR remote sensing model using simulated data and analyzed the feasibility of estimating effective FPAR based on chlorophyll content, which was expected to introduce a way to estimate NPP/GPP using effective FPAR. The results showed: (1) the difference between FPAR absorbed by leaf ($FPAR_{leaf}$) and FPAR absorbed by chlorophyll ($FPAR_{chl}$) cannot be neglected. $FPAR_{chl}$ is not more than 50% of $FPAR_{leaf}$ basically. The correlation between $FPAR_{chl}$ and $FPAR_{leaf}$ is nonlinear. (2) A strong correlation

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (编号: 2002CB412506), 国家自然科学基金项目 (编号: 40471092) 共同资助, 中国科学院百人计划项目

(编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 高彦华 (1975—), 女, 中国科学院遥感应用研究所在读博士生, 研究方向为碳通量的定量遥感估算模型。

was found between chlorophyll content and $FPAR_{leaf}$, but the correlation between chlorophyll content and $FPAR_{chl}$ is much stronger. So $FPAR_{leaf}$ and $FPAR_{chl}$ can be accurately estimated based on chlorophyll content and the estimation average errors are 2.90% and 6.6% respectively. (3) the estimation accuracy of $FPAR_{leaf}$ and $FPAR_{chl}$ models is higher when chlorophyll content is not less than $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. For 60 samples that chlorophyll content is not less than $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, the average errors of estimated $FPAR_{leaf}$ and $FPAR_{chl}$ are 1.79% and 5.07% respectively.

Key words FPAR; effective FPAR; chlorophyll

1 引言

自 20 世纪 80 年代兴起全球变化研究以来,陆地生态系统碳循环研究已经成为全球气候变化和区域可持续发展研究的核心问题。在分析陆地生态系统的碳汇、源时空格局、变化与陆地碳吸收潜力等科学问题方面,遥感提供了重要的技术支持。应用遥感估算净第一性生产力是碳循环研究的一个重要领域。利用遥感来估算净第一性生产力一般采用 Monteith 提出的光能利用模式^[1,2]:即植被吸收的光合有效辐射 (IPAR: Intercepted photosynthetically active radiation) 乘以某种植被的光能利用率 ϵ , 即: $NPP = IPAR \times \epsilon$ 。其中 IPAR 又是地表光合有效辐射 (PAR: Photosynthetically Active Radiation) 和植被冠层吸收的光合有效辐射的比率 (FPAR: Fraction of Photosynthetically Active Radiation absorbed by the canopy) 的乘积, 即: $IPAR = PAR \times FPAR$ 。从上式中可知, FPAR 是一个非常重要的参数, 是植被吸收的下行光合有效辐射的比例, FPAR 表现冠层对光合有效辐射能量吸收的能力, 是在陆地碳循环研究中冠层光合作用模型研究的一个重要参数。FPAR 模型是否能真实反映植被冠层吸收光合有效辐射状况, 将直接影响遥感估算 NPP 的不确定性程度。目前国际上已经提出的几个 NPP 遥感估算模型中, FPAR 的估算精度直接影响陆地生态系统 NPP/GPP 的估算精度^[3-5]。

目前, 主要有以下几种计算 FPAR 的方法: 一是通过能量平衡理论估算 FPAR^[6]; 二是利用遥感手段估算 FPAR, 即主要通过建立 FPAR 与归一化植被指数或叶面积指数 (LAI) 的关系模型来估算。例如, CASA 模型中 FPAR 采用了归一化植被指数 (NDVI Normalized Difference Vegetation Index) 的线性拉伸模式, 即 $(1 + NDVI) / (1 - NDVI)$ ^[4]。Glob-PEM 模型中的 FPAR 是植被指数 ($G = \rho_{543} / \rho_{667}$) 的函数^[3], Myrinen 等人在 NASA 的 FPAR 产品算法中采用了两套方案^[7]: 一是在假设植被冠层水平层

状分布的情况下, 采用三维辐射传输方程, 以查找表的形式建立植被冠层反射率、透过率等与卫星探测值之间的关系; 二是基于 NDVI 的经验算法。VPM 模型中的 FPAR 是 MODIS 增强植被指数 (EVI Enhanced Vegetation Index) 的函数, EVI 和 NDVI 的区别就是在 NDVI 的基础上增加了蓝光波段的反射率^[5]。此外, 在遥感研究中, 也常应用 FPAR 与 LAI 之间的相关关系来估算 FPAR, 在一些生物地球化学的过程模型中, FPAR 是作为 LAI 和消光系数的函数来计算的^[8]。LAI-FPAR 及 NDVI-FPAR 的关系在估算各种空间尺度的 GPP 和 NPP 的文献中是应用较广的主要方法^[9,10]。

但是, 基于植被指数获得 FPAR 的方法, 会因为植被指数问题而影响 FPAR 的估算精度。如 NDVI 在植被冠层叶面积指数大于 3^[3,11-13] 和叶绿素含量达到 $30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以上就趋于饱和, 所以利用 NDVI 求 FPAR 会由此而产生较大的不确定性, 而且这种不确定性 (或称误差) 会因叶面积指数的增大而增大; PROSPECT 叶片级辐射传输模型模拟结果表明, 绿度指数 G 会随叶绿素浓度的变化而出现双值。而基于叶面积指数获得 FPAR 的方法也会因 LAI 自身的反演精度而影响 FPAR 的估算精度。因此应用这些方法反演 FPAR 存在诸多的不确定性, 而且, 这些估算方法都没有考虑植被绿色叶组织的有效吸收状况。考虑到参与光合作用主要是叶片内的叶绿素吸收的那部分光合有效辐射。因此, 分析基于叶绿素含量获得有效 FPAR 的可行性, 对能否进一步提高 NPP/GPP 的遥感估算精度有重要的意义。

2 模型和方法

2.1 理论基础

通常将 400—700 nm 波长范围内的太阳短波辐射称为光合有效辐射, 在这一波段范围内影响叶片吸收的成分一般只有色素和干物质。由于主要由叶绿素吸收的那部分光合有效辐射对光合作用有贡

献,因此,将叶绿素吸收的那部分光合有效辐射(FPAR_{chl})视为有效 FPAR。

$$FPAR_{leaf} = \sum_{\lambda=400}^{700} 1 - \rho_{\lambda} - \tau_{\lambda} / 301 \quad (1)$$

$$FPAR_{leaf} = FPAR_{chl} + FPAR_{d,rm} \quad (2)$$

式中, ρ_{λ} 和 τ_{λ} 分别为波长 λ 处的叶片反射率和透过率, FPAR_{chl}和 FPAR_{d,rm}分别为叶绿素吸收和干物质吸收的光合有效辐射比率,其中, FPAR_{chl}和 FPAR_{d,rm}可以通过各自波谱吸收系数确定,波谱吸收系数公式为:

$$k_{(\lambda)} = \sum k_{i(\lambda)} C_i + k_{e(\lambda)} \quad (3)$$

式中, $k_{(\lambda)}$ 为波谱吸收系数, $k_{e(\lambda)}$ 为白化叶的基吸收, λ 是波长, $k_{i(\lambda)}$ 叶片内第 i 种成分的吸收系数, C_i 是每单位叶面积的成分 i 的含量。鉴于 400—700nm 波段范围内主要表现为叶绿素和干物质的吸收,而水分的吸收主要在 800—2500nm 波谱范围内^[14]。因此在 400—700nm 的波谱范围内(3)式可表达为:

$$K_{(\lambda)} = K_{e(\lambda)} + K_{ab(\lambda)} \times C_{ab(\lambda)} + K_m(\lambda) \times C_m \quad (4)$$

式中, K_{ab} 和 K_m 分别为叶绿素和干物质的吸收系数, C_{ab} 和 C_m 分别为叶绿素含量和干物质含量。

为分析叶片的 FPAR (FPAR_{leaf})与叶绿素吸收的有效 FPAR (FPAR_{chl})之间的差异,用 PROSPECT 模型模拟了具有不同叶绿素含量、其他叶片组分含量相同的叶片在 400—700nm 的 FPAR 曲线(图 1)。模拟结果表明,叶绿素含量增加, FPAR 曲线相应地处于较高的位置。从图 1 中可见,当叶绿素含量大

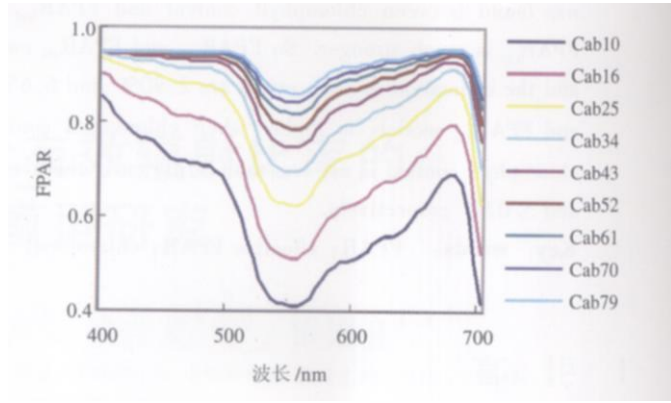


图 1 不同叶绿素含量模拟的 FPAR_{leaf}结果

Fig 1 Comparison of the simulated FPAR_{leaf} with different chlorophyll content

约在 40μg/cm²时, FPAR_{leaf}基本处于饱和状态。

鉴于图 1 的 PROSPECT 的模拟结果,当叶片干物质含量也是一个变量时, FPAR_{leaf}的曲线顺序便不再遵循按叶绿素含量的顺序有规则的排列(图 2(a));当去除干物质含量的影响,得到 FPAR_{chl}曲线, FPAR_{chl}的曲线顺序又表现为遵循按叶绿素含量的顺序排列(图 2(b))。模拟结果表明,叶片的干物质含量对有效 FPAR,即 FPAR_{chl}的影响是较大的。因此,仅以 FPAR_{leaf}来进一步估算 NPP/GPP 会给估算结果带来很大的误差,据此,获得有效 FPAR (FPAR_{chl}),建立 FPAR_{chl}的估算模型具有重要的意义。

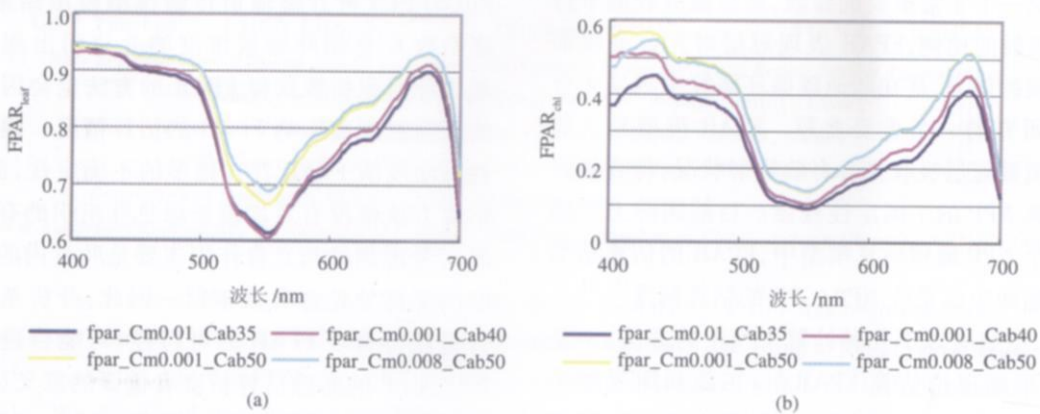


图 2 具有不同叶绿素含量和干物质含量的叶片的模拟 FPAR_{leaf}曲线 (a)和 FPAR_{chl}曲线 (b)

Fig 2 The curves of FPAR_{leaf} (a) and FPAR_{chl} (b) with different chlorophyll content and dry matter content

2.2 模型和方法

2.2.1 FPAR_{leaf}模型

为分析 FPAR_{leaf}与 FPAR_{chl}之间的差异,首先应

用 PROSPECT模型模拟具有不同叶绿素含量和干物质含量的叶片吸收的光合有效辐射比率。模拟中叶绿素含量的取值范围为 0—99μg/cm²,干物质含量的取值范围为 0.001—0.04g/cm²,分析得到相当

于不同植物种类叶片的叶绿素含量和 $FPAR_{leaf}$ 之间的相关关系 (图 3)。

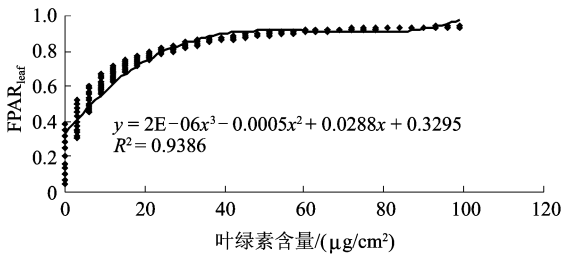


图 3 叶绿素含量与 $FPAR_{leaf}$ 的关系

Fig 3 The relationship between $FPAR_{leaf}$ and chlorophyll content

图 3 中分布在最上层的点是干物质含量均为 0.04 g/cm^2 的情况下模拟得到的 $FPAR_{leaf}$ 值,最下层是干物质含量为 0.001 g/cm^2 时对应的 $FPAR_{leaf}$ 模拟值。从图 3 中可见,叶绿素含量与 $FPAR_{leaf}$ 之间具有较高的相关性。当叶绿素含量较低时,干物质吸收对 $FPAR_{leaf}$ 的影响比较显著,而当叶绿素含量达到 $40 \mu\text{g/cm}^2$ 左右时,干物质吸收对 $FPAR_{leaf}$ 的影响较小,此时以叶绿素吸收为主。此外,图 3 也显示出当叶绿素含量达到 $20 \mu\text{g/cm}^2$ 时, $FPAR_{leaf}$ 开始趋于饱和,当叶绿素含量达到 $40 \mu\text{g/cm}^2$ 时, $FPAR_{leaf}$ 基本达到饱和。

2.2.2 $FPAR_{chl}$ 模型

由于 $400\text{--}700 \text{ nm}$ 之间,水分含量的多少对叶片反射率几乎没有影响,只有叶绿素含量和干物质含量对这一波谱范围内的反射率有影响。因此,在 $400\text{--}700 \text{ nm}$ 波谱范围之间,叶片吸收的光合有效辐射可以表示为叶绿素吸收的光合有效辐射和干物质吸收的光合有效辐射两部分的和。由公式 (2) 和 (4) 获得 $FPAR_{chl}$, 建立 $FPAR_{chl}$ 与叶绿素含量的关系。

图 4 为叶绿素吸收的光合有效辐射比率与叶绿素含量的关系,分布在最上层的点是干物质含量为 0.001 g/cm^2 的情况下模拟得到的 $FPAR_{chl}$ 值,而最

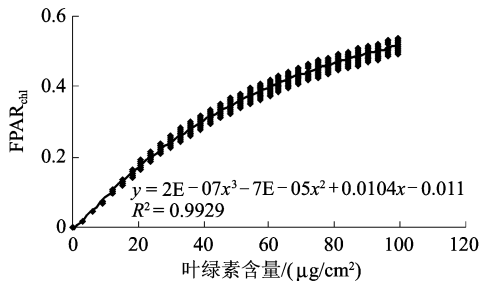


图 4 叶绿素含量与 $FPAR_{chl}$ 的关系

Fig 4 The relationship between $FPAR_{chl}$ and chlorophyll content

下层是干物质含量为 0.04 g/cm^2 时对应的 $FPAR_{chl}$ 模拟值。图 4 表明通过叶绿素含量获得有效 $FPAR$ ($FPAR_{chl}$) 与叶绿素含量之间具有更高的相关性,因此,基于叶绿素含量获得有效 $FPAR$ 在理论上是可行的。图 4 与图 3 表现不同的是,当叶绿素含量达到 $120 \mu\text{g/cm}^2$ 时, $FPAR_{chl}$ 仍未达到饱和,这说明有效 $FPAR$ 的获取可在一定程度上解决 $FPAR$ 遥感探测中的信息饱和的问题。

3 模型验证

3.1 验证数据

LOPEX93 (Leaf Optical Properties Experiment 93) 数据库是由欧盟联合研究中心 (Joint Research Center JRC) 在 1993 年建立的。该试验开展于 1993 年夏,测量对象包括木本及草本共 50 个种。其中 4 个裸子植物种,9 个单子叶植物种,37 个双子叶植物种。为了分析生物化学成分在时间上的变化,一些种被两次采样,分别是在 1993 年初夏和初秋,即 7 月初和 9 月初。50 个植物种 120 个不同的植物,但其中既有波谱数据又有叶绿素含量的数据共 64 种不同的植物,其中包括单子叶植物 15 种,双子叶植物 49 种。因此,应用该数据库进行验证,既考虑了不同物种的差异,同时也考虑了生物化学成分时间上的变化,充分体现了叶片生化组分含量和叶片类型的多样性,可以对模型进行更有效的检验。

3.2 验证与结果

3.2.1 实测数据 $FPAR_{leaf}$ 和 $FPAR_{chl}$ 的对比

在 LOPEX93 数据库中随机选取两种植物类型 (玉米和白杨),通过计算分别对这两种植物的实测 $FPAR_{leaf}$ 和 $FPAR_{chl}$ 进行对比 (图 5)。对比结果表明,两种植物的 $FPAR_{leaf}$ 与 $FPAR_{chl}$ 之间都存在较大的差别, $FPAR_{leaf}$ 并不是随着叶绿素含量的增大而增大的,叶片中干物质的吸收也影响着 $FPAR_{leaf}$ 的大小;不同植物种类 $FPAR_{leaf}$ 的曲线形状是不同的。而 $FPAR_{chl}$ 则基本上随着叶绿素含量的增加而增加的,不同植物种类具有相似的 $FPAR_{chl}$ 曲线。

3.2.2 $FPAR_{leaf}$ 和 $FPAR_{chl}$ 模型验证

分别应用图 3 和图 4 中的 $FPAR_{leaf}$ 和 $FPAR_{chl}$ 的计算公式来计算数据库中 64 种不同植物的 $FPAR_{leaf}$ 和 $FPAR_{chl}$ 实测值与计算值之间的比较结果如图 6 和图 7 所示。图 6 表明, $FPAR_{leaf}$ 的测量值与计算值之间的相关关系较高,64 个样本的 $FPAR_{leaf}$ 的估算

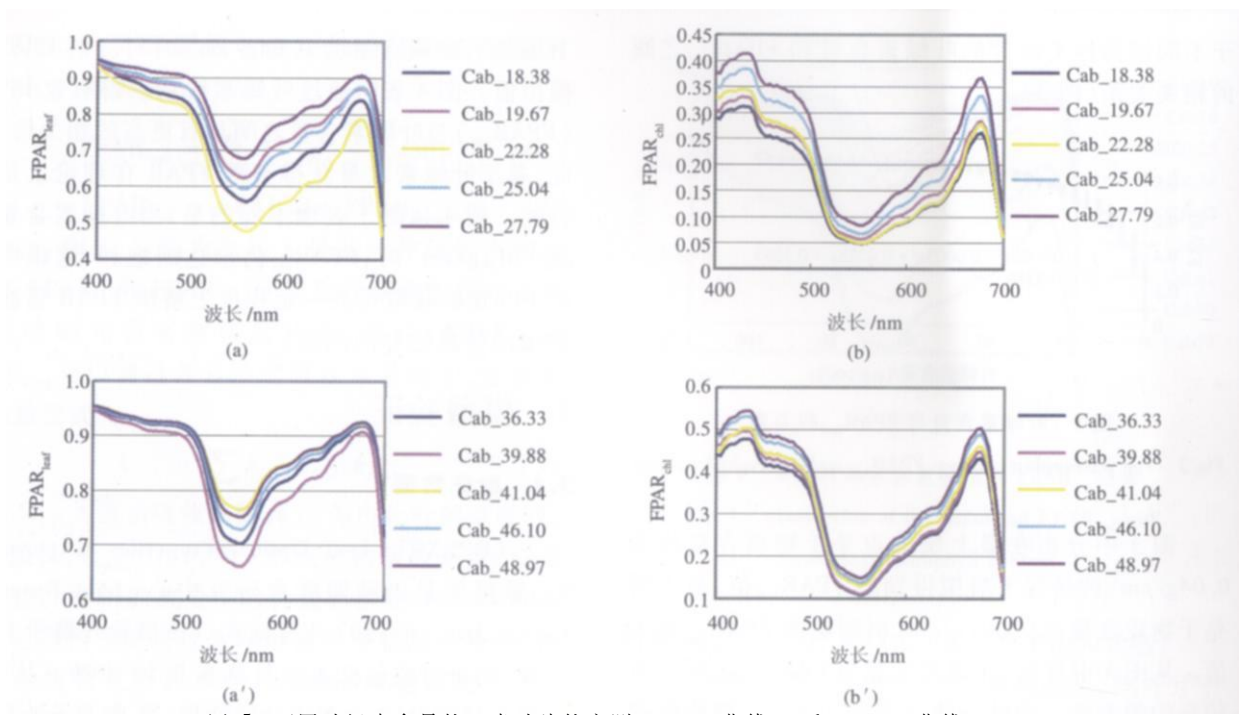


图 5 不同叶绿素含量的玉米叶片的实测 $FPAR_{leaf}$ 曲线 (a) 和 $FPAR_{chl}$ 曲线 (b);
不同叶绿素含量的白杨叶片的实测 $FPAR_{leaf}$ 曲线 (a') 和 $FPAR_{chl}$ 曲线 (b')

Fig 5 The curves of com $FPAR_{leaf}$ (a) and $FPAR_{chl}$ (b) with different chlorophyll content
the curves of aspen $FPAR_{leaf}$ (a') and $FPAR_{chl}$ (b') with different chlorophyll content

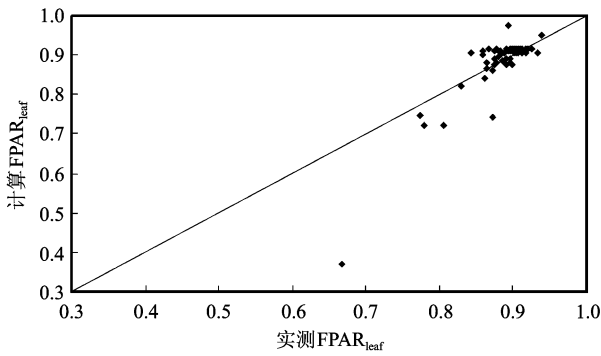


图 6 测量 $FPAR_{leaf}$ 与计算 $FPAR_{leaf}$ 比较

Fig 6 Comparison between measured $FPAR_{leaf}$ and estimated $FPAR_{leaf}$

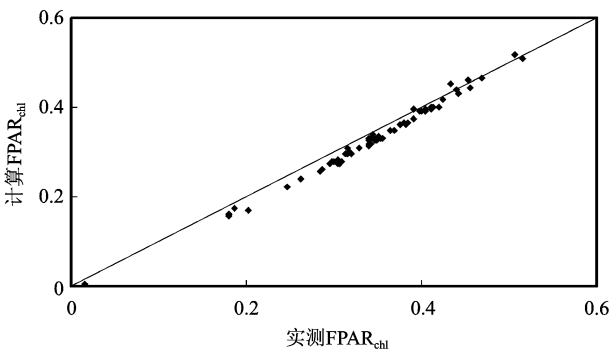


图 7 测量 $FPAR_{chl}$ 与计算 $FPAR_{chl}$ 比较

Fig 7 Comparison between measured $FPAR_{chl}$ and estimated $FPAR_{chl}$

的平均相对误差为 2.90%。通过误差分析发现,应用模拟模型估算 $FPAR_{leaf}$ 和 $FPAR_{chl}$, 当叶绿素含量小于 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时, 估算误差较大, 而叶绿素含量大于 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时, 估算精度较高, 叶绿素含量大于 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 60 个样本的 $FPAR_{leaf}$ 估算平均相对误差仅为 1.79%。

分析相同的 64 个样本的 $FPAR_{chl}$ 的测量值与计算值之间的关系, $FPAR_{chl}$ 的测量值与计算值之间具有高度的相关关系(图 7)。64 个样本的 $FPAR_{chl}$ 的估算的平均相对误差为 6.6%, 叶绿素含量大于 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 60 个样本的 $FPAR_{chl}$ 估算的平均相对误差为 5.07%。

4 结论与讨论

本文应用 PROSPECT 模型模拟分析了叶片尺度吸收的光合有效辐射比率 $FPAR_{leaf}$ 与叶绿素吸收的光合有效辐射比率的差别, 建立了基于叶绿素含量的 $FPAR_{leaf}$ 与 $FPAR_{chl}$ 的估算模型。并应用 LOPEX93 数据库分别验证了 $FPAR_{leaf}$ 与 $FPAR_{chl}$ 的估算模型, 验证结果表明:

(1) 叶片尺度吸收的 $FPAR_{leaf}$ 与叶片内的叶绿

素吸收的 $FPAR_{chl}$,也就是有效 FPAR 之间的差异较大。而且两者之间虽存在一定的相关性,但这种相关性是非线性的。

(2) 基于叶绿素含量可以以较高的精度估算 $FPAR_{leaf}$ 经过验证,64 个样本的估算平均相对误差为 2.90%。而基于叶绿素含量估算有效 FPAR ($FPAR_{chl}$) 的平均相对误差为 6.6%。另外,通过误差分析发现,应用模拟模型估算 $FPAR_{leaf}$ 和 $FPAR_{chl}$ 当叶绿素含量小于 $20\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时估算误差较大,而叶绿素含量大于 $20\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时估算精度较高。由于绿色叶片的叶绿素含量普遍在 $20\text{--}80\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 之间,所以基于叶绿素含量估算 $FPAR_{leaf}$ 可以应用于实际。

(3) 在有干物质吸收影响的条件下,叶绿素含量达到 $20\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时, $FPAR_{leaf}$ 开始逐渐趋于饱和,叶绿素含量达到 $40\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时, $FPAR_{leaf}$ 基本达到饱和。所以,基于 $FPAR_{leaf}$ 估算 NPP 将带来比较大的误差;而 $FPAR_{chl}$ 在叶绿素含量达到 $99\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 时仍有增长的趋势。因此,基于叶绿素含量的有效 FPAR 模型在一定程度上解决了 FPAR 遥感探测中的信息饱和问题。

(4) 本文的分析是建立在模型模拟的基础上,并用 LOPEX93 数据库的 64 种不同的植物种类测量数据进行了验证。因此本文是进一步探索有效 FPAR 的估算的重要基础。但由于验证数据中缺少针叶树种的样本,本文的分析只应用于阔叶树种和草本类植物,能否应用于针叶树种还缺少验证。因此,相关工作有待进一步开展。

(5) 本文基于叶片尺度探讨了基于叶绿素含量的有效 FPAR 模型,但该模型能否应用于冠层尺度以及应用于冠层尺度的不确定性等问题还有待进一步研究。本文目前提供了一个估算有效 FPAR 及应用有效 FPAR 进一步估算 NPP/GPP 来提高 NPP/GPP 估算精度的思路。

参考文献 (References)

- [1] Monteith J L. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems[J]. *J Appl Ecol* 1972, **9**: 747—766
- [2] Monteith J L. Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain[J]. *Phil Trans Roy Soc London B* 1977, **281**: 277—294
- [3] Prince S D, Goward S N. Global Primary Production: a Remote Sensing Approach [J]. *Journal of Biogeography* 1995, **22**: 815—835
- [4] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial Ecosystem Production: A Process Model based on Globe Satellite and Surface Data[J]. *Global Biogeochemical Cycles* 1993, **7**: 811—841
- [5] Xiao X, Zhang Q, Braswell B, et al. Modeling Gross Primary Production of Temperate Deciduous Broadleaf Forest Using Satellite Images and Climate Data [J]. *Remote Sensing Environment* 2004, **91**: 256—270
- [6] Gobron N, Pinty B, Aussedat O, et al. Evaluation of FAPAR Products for Different Canopy Radiation Transfer Regimes: Methodology and Results Using JRC Products Derived from SeaWiFS Against Ground-based Estimations' [J]. *Journal of Geophysical Research* in print 2006
- [7] Knyazikhin Y, Glassy J, Privette J L, et al. MODIS Leaf Area Index(LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) [J]. Algorithm Theoretical Basis Document Version 4.0. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod15.pdf 1999
- [8] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the Estimation of Terrestrial Net Primary Production from Remotely Sensed Data [J]. *Journal of Geophysical Research* 1994, **99**: 5263—5283
- [9] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing[J]. *Remote Sensing of Environment* 1995, **51**(1): 75—88
- [10] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, et al. A Continental Satellite-derived Measure of Global Terrestrial Primary Production [J]. *Bioscience* 2004, **54**(6): 547—560
- [11] Sellers P J. Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration[J]. *Int J Remote Sensing* 1985, **6**: 1335—1372
- [12] Spanner M A, Pierce L L, Peterson D L, et al. Remote Sensing Temperate Coniferous Forest Leaf Area Index: the Influence of Canopy Closure, Understory and Background Reflectance[J]. *Int J Remote Sens* 1990, **11**(1): 95—111
- [13] Curran P J, Dungan J L, Gholz H L. Seasonal LAI in Slash Pine Estimated with Landsat TM [J]. *Remote Sens Environ* 1992, **39**: 3—13
- [14] Jacquemoud S, Baret F. Prospect: A Model for Leaf Optical Properties Spectra[J]. *Remote Sensing of Environment* 1990, **34**: 75—91