

DOI: 10.5846/stxb201603080405

梁守真, 隋学艳, 侯学会, 王猛, 姚慧敏, 马万栋. 落叶阔叶林冠层光合有效辐射分量(绿色 FPAR)的遥感模拟与分析. 生态学报, 2017, 37(10):

Liang S Z, Sui X Y, Hou X H, Wang M, Yao H M, Ma W D. Simulation and analysis on green fraction of absorbed photosynthetically active radiation of deciduous broadleaved forests canopy through remote sensing model. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10):

## 落叶阔叶林冠层光合有效辐射分量(绿色 FPAR)的遥感模拟与分析

梁守真<sup>1,2,\*</sup>, 隋学艳<sup>1</sup>, 侯学会<sup>1</sup>, 王猛<sup>1</sup>, 姚慧敏<sup>1</sup>, 马万栋<sup>3</sup>

1 山东省农业可持续发展研究所, 济南 250100

2 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055

3 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094

**摘要:**冠层绿色叶片(光合组分)的光合有效辐射分量(绿色 FPAR)真实地反映了植被与外界进行物质和能量交换的能力, 获取冠层光合组分吸收的太阳光合有效辐射, 对生态系统生产力的遥感估算精度的提高具有重要的意义。研究以落叶阔叶林为例, 基于 SAIL 模型模拟森林冠层光合组分和非光合组分吸收的光合有效辐射, 研究冠层 FPAR 变化规律以及与植被指数的相关关系。结果表明, 冠层结构的改变会影响冠层对 PAR 的吸收能力, 冠层绿色 FPAR 的大小与植被面积指数及光合组分面积比相关; 在高覆盖度植被区, 冠层绿色 FPAR 占冠层总 FPAR 的 80% 以上, 非光合组分的贡献较小, 但在低植被覆盖区, 当光合组分和非光合组分面积相同时, 绿色 FPAR 不及冠层总 FPAR 的 50%; 相比于 NDVI, 北方落叶阔叶林冠层 EVI 与绿色 FPAR 存在更为显著的线性相关关系 ( $R^2 > 0.99$ )。

**关键词:** FPAR; 光合组分; NDVI; EVI; 落叶阔叶林

## Simulation and analysis on green fraction of absorbed photosynthetically active radiation of deciduous broadleaved forests canopy through remote sensing model

LIANG Shouzhen<sup>1,2</sup>, SUI Xueyan<sup>1</sup>, HOU Xuehui<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, YAO Huimin<sup>1</sup>, MA Wandong<sup>3</sup>

1 Shandong Institute of Agricultural Sustainable Development, Ji'nan 250100, China

2 Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 5180553, China

3 Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China

**Abstract:** The fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) is an important biophysical variable, widely used in satellite-based production efficiency models to estimate global primary production (GPP) or net primary production. To the forest, the vegetation canopy is composed primarily of photosynthetically active vegetation (PAV; green leaf) and non-photosynthetic vegetation (NPV; e.g., branches and stems). They absorb photosynthetically active radiation (PAR) from the sun, but only the PAR absorbed by PAV is used for photosynthesis. Remote sensing-driven biogeochemical models that use green FPAR ( $FPAR_{PAV}$ ) in estimating GPP are more likely to be consistent with plant photosynthesis processes. However, there are no field and laboratory experiments to measure green FPAR at the canopy level. In this study, a method based on the radiative transfer model was used, and the scattering by arbitrary inclined leaves (SAIL) model was modified to classify forest canopy, and to model the canopy spectral reflectance and the PAR absorbed by PAV and NPV of three

基金项目: 国家自然科学基金(41401407); 山东省农业重大应用技术创新项目(1-05-04)

收稿日期: 2016-03-08; 网络出版日期: 2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: szliang\_cas@163.com

deciduous broadleaved forests in different scenarios (varied plant area index and leaf area index). Green FPAR of the canopy was calculated based on the PAR absorbed by PAV and total PAR, and the characteristics of the green FPAR and the relation between green FPAR and two vegetation indices (normalize difference vegetation index [NDVI] and enhanced vegetation index [EVI]) were analyzed. Our results showed that the variation in canopy structure influenced the canopy absorption of PAR, and that green FPAR was related to the plant area index and the ratio of leaf area index to plant area index. In high-coverage forests, the green FPAR was close to the total FPAR of the vegetation canopy (>80%) and the contribution of NPV to the total FPAR is very low. In contrast, in low-coverage forests or open forests, the difference between green FPAR and the total FPAR was large. Especially when the proportion of the leaf area to plant area low (0.5), the ratio of the green FPAR to the total FPAR was 45.86%. The significant relationships were found between two vegetation index (NDVI and EVI) and green FPAR, but compared with NDVI, EVI was more suitable for describing the variation in the green FPAR.

**Key Words:** FPAR; Photosynthetically active vegetation; NDVI; EVI; Deciduous broadleaved forests

光合有效辐射吸收分量 FPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) 是指植被吸收的光合有效辐射 PAR (Photosynthetically Active Radiation) 在入射 PAR 中所占的比例。它表征了植被冠层对太阳光能的截获、吸收能力,是陆地碳循环研究中的一个重要参数<sup>[1-2]</sup>。植被冠层 FPAR 主要通过两种途径获取:地面定位观测和基于遥感数据的反演<sup>[3]</sup>。相对于地面定位观测,遥感可同步获取不同位置的 FPAR,时空性好,是当前获取区域、全球尺度 FPAR 的唯一可行手段。目前 FPAR 遥感反演研究的重点在于如何提高反演精度,使其能真正反映植被吸收太阳辐射、进行光合作用的能力<sup>[4]</sup>。

植被冠层由叶片和木本组织组成,按照能否进行光合作用,可分为光合组分 PAV (Photosynthetically Active Vegetation, 绿色叶片) 和非光合组分 NPV (Non-Photosynthetically Active Vegetation, 如树枝等木本部分)<sup>[5-7]</sup>。NPV 与 PAV 无论是组织结构还是辐射特性,都显著不同<sup>[8]</sup>。光合组分吸收 PAR 进行光合作用,对生物量的累积起着关键作用;非光合组分也吸收 PAR,但它并不进行光合作用,或者即使能进行光合作用也只是对其呼吸释放碳的再固定,其光合作用并不增加生态系统的总初级生产力 GPP (Gross Primary Production)<sup>[9-12]</sup>。森林冠层中正确估算冠层有效的 PAR,需要区分来自不同组分的 PAR,提取冠层 PAV 的 FPAR ( $FPAR_{PAV}$ ),即绿色 FPAR。在早期的研究中,草地绿色 FPAR 被描述为绿色生物量占总生物量的比例与冠层总 FPAR 的乘积,通过计算绿色生物量的比率计算绿色 FPAR<sup>[13]</sup>。但是森林冠层比草地复杂,冠层 NPV 和 PAV 分离困难,因此,其绿色 FPAR 的研究多采用辐射传输模型模拟和实验室测量的方法<sup>[7-8,14]</sup>。Xiao 等将森林冠层绿色 FPAR 描述为增强型植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index) 的线性函数,但是并未从机理上给出两者之间的定量关系,因此 Xiao 等认为需要进一步研究绿色 FPAR 的光谱探测机理,以更好地定量描述植被指数与绿色 FPAR 之间的关系<sup>[15]</sup>。

辐射传输模型可模拟太阳光子在植被内部的传输过程与作用机制,它的出现和发展为冠层的分离提供了可能。本研究以北方落叶阔叶林为研究对象,从辐射传输模型 SAIL (Scattering by Arbitrary Inclined Leaves) 出发,建立冠层光谱和 FPAR 模拟数据集,分析冠层绿色 FPAR ( $FPAR_{PAV}$ ) 的特征及其与冠层光谱之间的相关关系。主要目标包含两个方面,一是确定森林冠层绿色 FPAR 随冠层结构的变化特征;二是分析绿色 FPAR 与冠层光谱以及植被指数的关系,探讨绿色 FPAR ( $FPAR_{PAV}$ ) 的机理和可能的估算方法。

## 1 方法

### 1.1 模型

辐射传输模型是目前相对成熟的基于物理光学基础的模型,它可比较系统、完整地描述植被冠层与入射辐射之间相互作用过程和特征,被广泛应用于遥感 FPAR 的理论和反演研究<sup>[16-17]</sup>。SAIL 模型是辐射传输模

型的典型代表,是 Verhoef 在对 Suits 模型进行改进的基础上提出的四流辐射传输模型<sup>[18]</sup>。该模型将植被冠层假定为方位随机分布、水平均匀无限扩展的混浊介质,只在垂直方向上有限变化。冠层可分为一层或多层,每层中的植被光学特性参数和结构特性参数为常数,并且每层的植被元素视作吸收和散射微粒,考虑了多次散射的作用。该模型可以完美地描述连续植被冠层的光学特性,被遥感学术界广泛应用<sup>[19]</sup>。但由于 SAIL 模型将冠层假定为混沌介质,没有考虑离散冠层的集聚效应以及冠层之间的遮蔽效应<sup>[20]</sup>,被认为在模拟离散的森林冠层时存在一定的局限。离散森林的冠层表现为不同形状的非均质结构,具有强烈的三维效应,需要借助三维模型才能描述复杂冠层的辐射机制,但依据当前的条件,建立完善的描述陆地生态系统结构的三维模型仍不太现实,且三维模型计算更加复杂,运算耗时长<sup>[19]</sup>。Gobron 在模拟时发现三维效应引起的扰动相当稳定,并且 Widlowski 的研究也发现一维模型几乎可模拟三维模型生成的反射率<sup>[21-22]</sup>。因此,复杂冠层水平一致性的简化假设并不会导致一维 SAIL 模型失效<sup>[19]</sup>。此外,对于常用的遥感影像,如 Landsat/TM、MODIS、MERIS、SPOT/VEGETATION 数据,其空间分辨率通常较低,并无法分辨出单个冠层,在这一分辨率下,将像元看作水平均一的介质可能会获得更好的效果<sup>[23-25]</sup>。SAIL 模型的分层假设,使其可以计算每个层吸收的 PAR<sup>[20]</sup>。但目前大多数研究在应用 SAIL 模型时,整个冠层被视为一个层,组分在层内随机分布。如果将冠层中的每个组分分离到单独的层中,分别计算,而不是将其混合为单个层,则可确定每个组分吸收的 PAR,从而计算出每个组分的 FPAR。

在本研究中,针叶林冠层被分解为两层,第一层为 PAV(叶片)层,第二层为 NPV(树枝)层。SAIL 模型程序将顶层的下行入射通量(即太阳辐射通量)设为 1.0,冠层的绿色 FPAR (FPAR<sub>PAV</sub>)可通过叶片层内通量的输入与输出平衡来计算:

$$FPAR = FLUX3(1) + FLUX2(1) - FLUX1(1) - FLUX3(2) - FLUX2(2) + FLUX1(2) \quad (1)$$

式中,FLUX1 为上行散射通量,FLUX2 为下行散射通量,FLUX3 为下行直射通量(1.0);“( )”中数字表示层号,1 为顶层。

SAIL 模型的输入参数包括冠层组分光谱(反射率和透射率)、冠层结构(组分倾角分布、组分面积指数)、土壤反射率、太阳天顶角、观测几何参数(观测天顶角和相对方位角)以及入射辐射漫辐射比,其输出包括冠层反射率和每个层的输入输出通量。植被面积指数 PAI(Plant Area Index)包括树枝和叶片面积指数,对于非光合组分,其面积指数占冠层 PAI 的比例在 0.02—0.5 之间变化(冬季除外)<sup>[20,26-27]</sup>,在这里我们设置了 7 种不同的场景,叶片层面积指数占冠层 PAI 的比例分别为 0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,0.95,0.98。各参数值如表 1 和图 1 所示。

表 1 SAIL 模型的输入参数

Table 1 Input parameters in SAIL model

| 参数 Parameter                                | 设定值 Value             |
|---|-----------------------|
| 冠层结构参数 Canopy structure parameters          |                       |
| PAV 角分布 PAV angle distribution              | 球面型                   |
| NPV 角分布 NPV angle distribution              | 平板型                   |
| 植被面积指数 Plant area index                     | 0.1,0.5,1,2,3,4,5,6,7 |
| 光照和观测参数 Illumination and viewing parameters |                       |
| 太阳天顶角 Solar zenith angle/(°)                | 30                    |
| 太阳散射光比例 Fraction diffuse radiation/%        | 0                     |
| 观测天顶角 View zenith angle/(°)                 | 0                     |
| 相对方位角 Relative azimuth/(°)                  | 0                     |

PAV: Photosynthetically active vegetation ; NPV: Non-photosynthetic vegetation

研究所采用的落叶阔叶林(白橡、白杨和红桤)冠层组分树枝和叶片光谱来自 NASA ORNL DAAC。其中白杨冠层组分样本来自于明尼苏达超级国家森林公园 SNF(Superior National Forest in Minnesota),白橡和红桤

冠层组分来自俄勒冈森林样带 OTTER (Oregon Transect Ecosystem Research)。研究人员分别在 1984 年和 1990 年夏季 (生长旺盛期) 对森林冠层组分样本采样,并在实验室内利用 LiCor 积分球和 Cary-14 光谱仪测量其反射率和透射率<sup>[28,29]</sup>。本研究对收集的三种阔叶林的高光谱光谱进行平均,并以平均的方法计算 3 个宽波段蓝波段 (459—479nm)、红波段 (620nm—670nm)、近红外波段 (841—876nm) 以及 PAR 波段 (400—700nm) 的反射率和透射率。土壤光谱数据取自约翰·霍普金斯大学 (Johns Hopkins University) 采集的浅灰色粉砂壤光谱,其数据处理方法与冠层组分光谱相同。

## 1.2 植被指数

基于植被指数反演冠层 FPAR 是遥感领域常用的一种方式,也有研究人员采用实地测量的 LAI 构建反演

模型<sup>[30-32]</sup>。由于大部分仪器测量并不能区分叶片和木本组织,测量值多为反映植被冠层总 FPAR 的量,导致当前的大多数模型是建立在冠层总 FPAR 和波谱植被指数之间。在当前的植被冠层 FPAR 遥感研究中,以红波段、近红波段等为主构建的植被指数被广泛应用,包括 NDVI<sup>[33-35]</sup>、EVI<sup>[10,36-38]</sup>、DVI<sup>[39]</sup> 等,其中使用最多的是 NDVI。在本研究中,NDVI 和 EVI 两种植被指数被选用。NDVI 和 EVI 是 MODIS 植被指数产品中的两个指数,NDVI 对叶绿素敏感,而 EVI 对植被冠层结构更加敏感,两者互为补充<sup>[40-41]</sup>。其公式分别如下:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (2)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + 6 \times R_{Red} - 7.5 \times R_{Blue} + 1} \quad (3)$$

式中,  $R_{NIR}$ ,  $R_{Red}$ ,  $R_{Blue}$  分别对应 MODIS 传感器的近红外波段 (841—876nm)、红波段 (620—670nm) 和蓝波段 (459—479nm) 的反射率。

## 2 结果

### 2.1 冠层总 FPAR 与绿色 FPAR

总 FPAR 反映了植被冠层吸收的太阳 PAR 的比例。模拟显示,冠层总 FPAR 在分层模拟和与单层模拟结果一致,  $FPAR_{PAV}$  和  $FPAR_{NPV}$  (绿色 FPAR) 之和与单层的冠层 FPAR 相等。落叶阔叶林冠层总 FPAR 随 PAI、PAV 的面积比 (PAV 面积占冠层 PAI 的比例) 的变化而变化 (图 2)。在同一 PAV 面积比条件下,PAI 的增加会提高落叶阔叶林冠层的总 FPAR。在设定情景下,冠层总 FPAR 的最大值为 0.958 (PAI=7, PAV 面积比为 0.98)。总 FPAR 的增加速率随着 PAI 的增加而逐渐减小,即在低 PAI 情况下,冠层总 FPAR 随 PAI 增加迅速,而在高 PAI 情况下,冠层总 FPAR 增加缓慢。例如当 PAI 从 0.5 增加到 1 时,总 FPAR 增加值超过 0.20; 而 PAI 从 6 增加到 7,冠层总 FPAR 最大增加量仅为 0.012 (PAV 面积比为 0.98 时)。当 PAI < 7 时,在相同的 PAI 条件下,PAV 面积所占比重越高,冠层总 FPAR 值越小,而在 PAI 为 7 时,冠层总 FPAR 在 PAV 为 0.98 时最大。

对于光合组分的 FPAR,其变化特征与冠层总 FPAR 存在一定差异。在同一 PAI 下,PAV 比重越大,  $FPAR_{PAV}$  越大。  $FPAR_{PAV}$  随 PAV 的变化幅度与 PAI 有关。在 PAI 为 2 时,增幅最为明显,表现为 PAV 面积比每增加 0.1,  $FPAR_{PAV}$  增加超过 0.03; 而 PAI 为 0.1 时,PAV 面积比增加相同的量,  $FPAR_{PAV}$  仅增加 0.006。在同一 PAV 面积比下,  $FPAR_{PAV}$  随 PAI 的增加而增加,在 PAI 为 7 时,  $FPAR_{PAV}$  达到最大值。

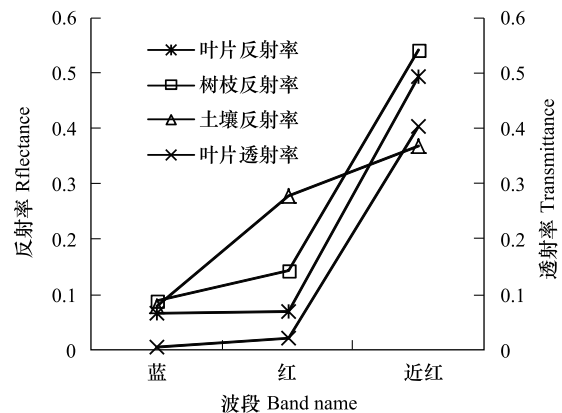


图 1 SAIL 模型采用的冠层组分和土壤光谱

Fig. 1 The spectrum of canopy components and soil in SAIL model

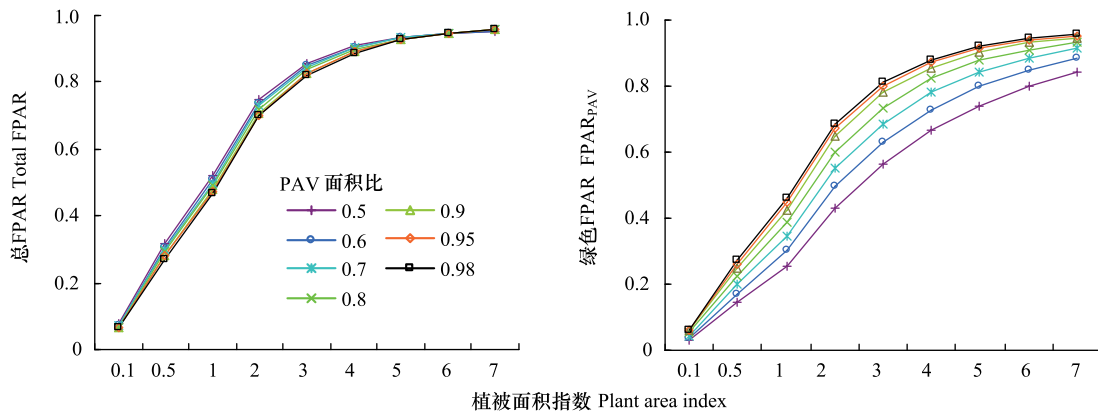


图2 阔叶林冠层总 FPAR 和绿色 FPAR

Fig.2 The change of total FPAR and FPAR<sub>PAV</sub> of canopy

在设定情景下, FPAR<sub>PAV</sub> 占总 FPAR 的比例在 43.07%—99.74% 之间波动(图 3)。PAI 和 PAV 面积比的增加都可提高 FPAR<sub>PAV</sub> 在冠层总 FPAR 的比重。但 PAI 的变化会影响 FPAR<sub>PAV</sub> 比率的变动幅度。在低 PAI (0—1) 情况下, FPAR<sub>PAV</sub> 占总 FPAR 的比重随着 PAV 面积比的增加迅速增加, 从 45.86% 增加到 97.56%; 而在高 PAI (5—7) 情况下, 当 PAV 面积比从 0.5 增加到 0.98 时, FPAR<sub>PAV</sub> 的比重仅增加了 16.8%, 其增幅低于低 PAI 时增加量。并且在高覆盖度情况下, FPAR<sub>PAV</sub> 占总 FPAR 的比重超过 80%, 当冠层 PAV 面积比为 0.98 时, FPAR<sub>PAV</sub> 占总 FPAR 的 99.60%, 两者非常接近。但是在低植被覆盖度情况下, FPAR<sub>PAV</sub> 占总 FPAR 的比重明显低于总 FPAR, 尤其是当 PAI 面积比为 0.5 时, 仅占总 FPAR 的 45.86%。

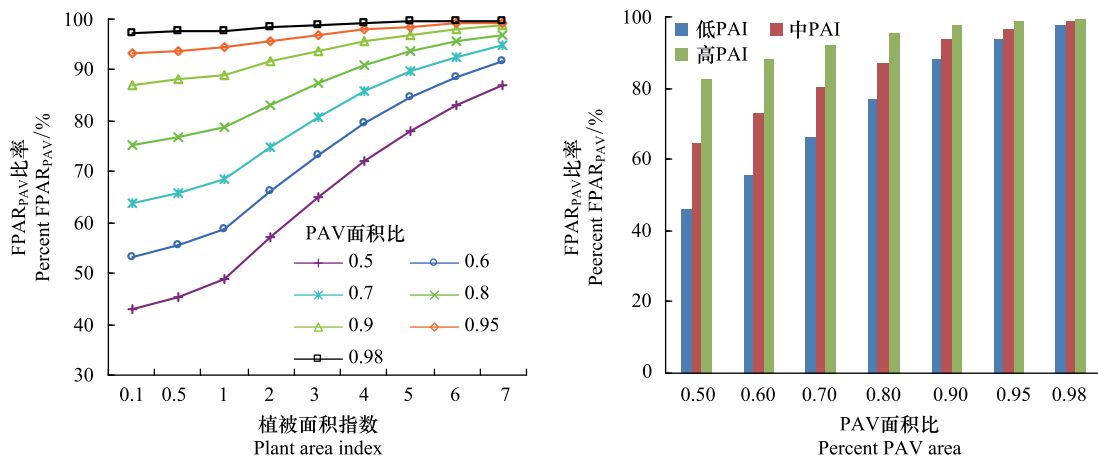


图3 冠层 FPAR<sub>PAV</sub> 比率与植被面积指数, PAV 面积比的关系

Fig.3 The relationship between percent FPAR<sub>PAV</sub> and Plant area index, percent PAV area

### 2.2 落叶阔叶林冠层波谱

根据图 4, 在蓝波段、红波段和近红外波段, 随着波长的增加, 落叶阔叶林冠层的反射率逐渐升高。冠层在蓝波段有较低的反射率, 最高仅为 0.074 (PAI = 0.1, PAV 面积比为 0.98); 而在近红外波段有高的反射率, 超过 0.36。在不同的波段冠层反射率对 PAI 和组分比例的影响存在一定的差异。在蓝、红波段, 冠层反射率主要受 PAI 的影响, 组分比例的变动对冠层反射率的影响甚微。随着 PAI 的增加, 冠层在两个波段的反射率值逐渐降低, 尤其是红波段反射率下降明显, 从 25.04% 降低到 2.33%。在近红外波段, 冠层反射率对 NPV 面积比和 PAI 都非常敏感。在冠层 PAI 恒定时, 随着 PAV 比例的升高, 冠层反射率升高, 这种现象在中等覆盖度时最为显著。如 PAI=3 时, 随这 PAV 比例从 0.5 增加到 0.98, 冠层在近红外的反射率分别为 0.3256、0.

3375、0.3495、0.3618、0.3746、0.3814、0.3856。在同一 PAV 面积比情况下,在 PAI 为 2 时最低,PAI 为 7 时最高 (0.41)。蓝波段和红波段与近红外波段反射率之间的差异随着 PAI 的增加逐渐加大,这种变化特征独立于与冠层组分比例。

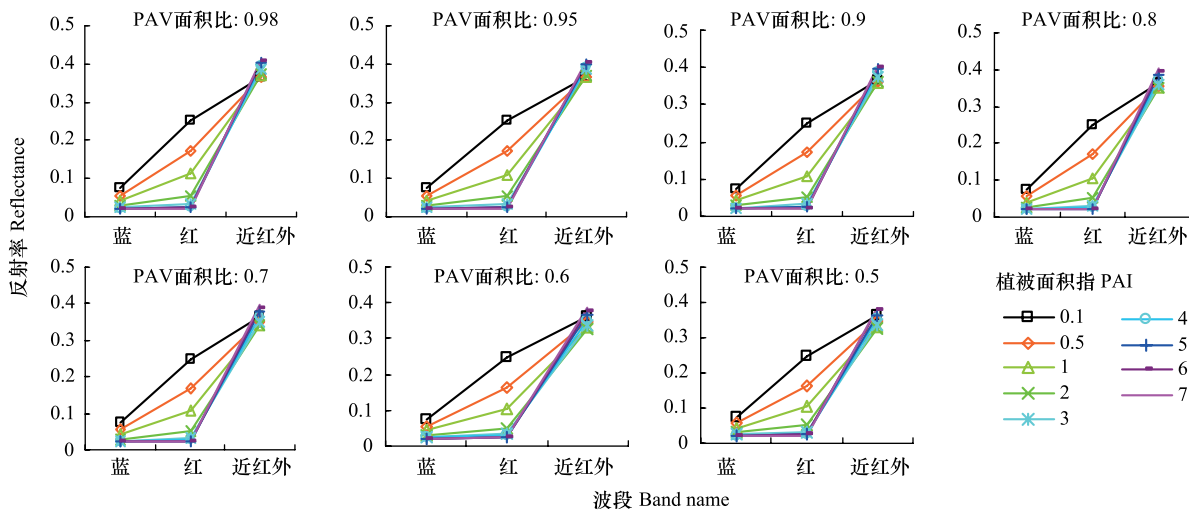


图 4 冠层结构对冠层反射率的影响

Fig.4 The influence of canopy structure on canopy reflectance

### 2.3 植被指数与 FPAR 关系

根据图 5,相同条件下,NDVI 总是大于 EVI,冠层 NDVI 和 EVI 都随着 PAI 的增加而升高。当 PAI 较低和较高时,NDVI 对 PAV 的变化不敏感,但在中等覆盖度条件下 ( $3 < PAI < 5$ ),NPV 的波动可从 NDVI 值得到反映。例如 PAI 为 3 时,随着非光合组分的从 0.02 增加到 0.5,NDVI 从 0.841 降低 0.805,而 PAI 为 0.1 和 7 时,NDVI 仅仅降低 0.0014,0.0013。相比于 NDVI,EVI 对非光合组分的变动更加敏感,但与 NDVI 较为相似的是在低 PAI 和高 PAI 情况下,EVI 对非光合组分敏感度不如中等 PAI 条件下那么显著。

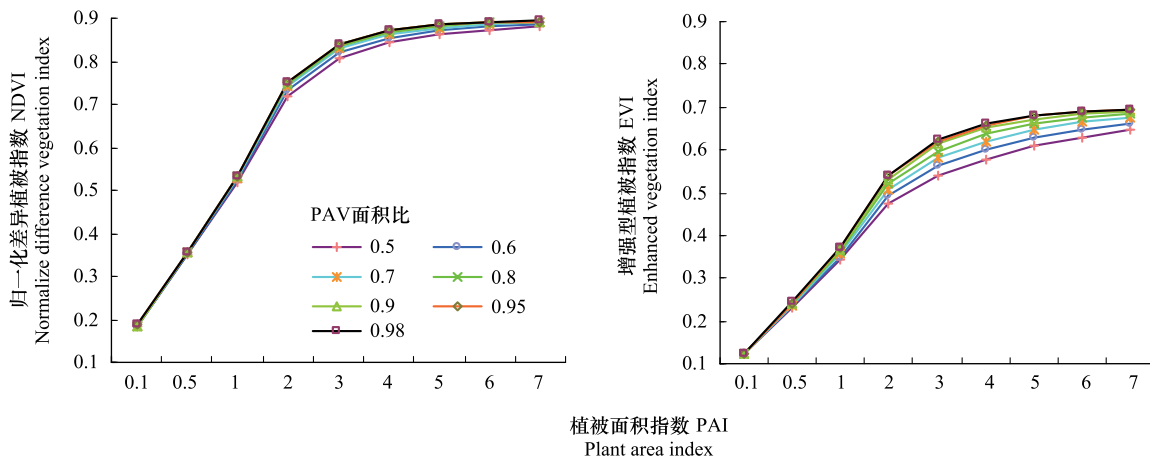


图 5 植被指数与冠层结构的关系

Fig.5 The relationship between vegetation indices and canopy architecture

无论 NDVI 还是 EVI,它们与冠层总 FPAR 都有非常显著的相关关系 ( $R^2 > 0.9$ ) (图 6),但 NDVI 与总 FPAR 之间关系对 PAV 面积比的变化并不敏感,意味着冠层 PAV 面积比的波动不会影响 NDVI 与冠层 FPAR 的关系;但在中高覆盖度条件下,冠层 PAV 面积比的变动会对 EVI 与冠层总 FPAR 的关系产生影响。在 PAV 面积比为 0.5 时,EVI 与冠层总 FPAR 之间线性方程的  $R^2$  为 0.9978,而在 PAV 面积比为 0.98 时, $R^2$  为 0.9982。

总体上表现为 PAV 比例越高,  $R^2$  越大, EVI 与冠层总 FPAR 的关系越紧密。NDVI、EVI 与  $\text{FPAR}_{\text{PAV}}$  也表现出了显著的线性关系(图 7), 但相比于 NDVI, EVI 与  $\text{FPAR}_{\text{PAV}}$  有更高的相关系数, 并且即使在高覆盖度情况下, 线性关系仍旧显著, 而在此情况下, NDVI 与  $\text{FPAR}_{\text{PAV}}$  开始表现为非线性关系。

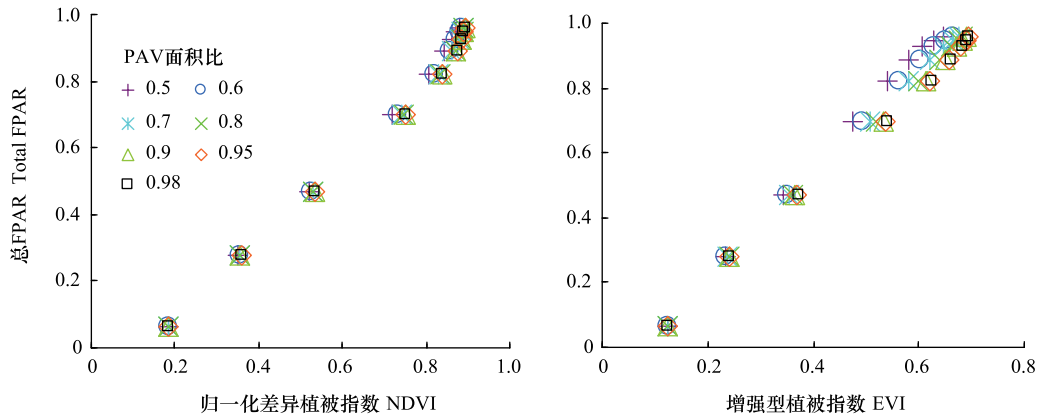


图 6 冠层总 FPAR 与植被指数的关系

Fig.6 The relationship between total FPAR and vegetation indices

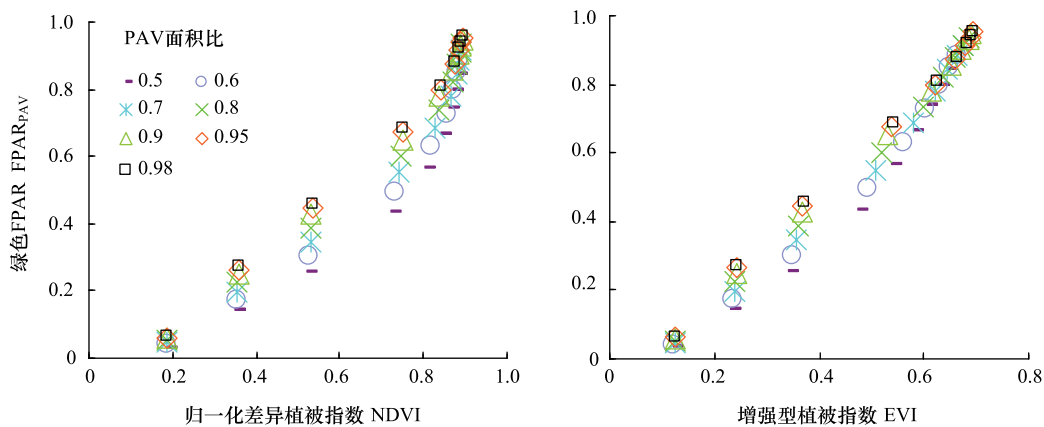


图 7 冠层  $\text{FPAR}_{\text{PAV}}$  与植被指数的关系

Fig.7 The relationship between  $\text{FPAR}_{\text{PAV}}$  and vegetation indices

### 3 结论与讨论

#### 3.1 PAV 对冠层 FPAR 的贡献

森林冠层由光合组分 PAV 和非光合组分 NPV 组成, 冠层总 FPAR 包含了冠层 PAV 和 NPV 的贡献。PAV 吸收的 PAV 决定了植被冠层可进行光合作用的能量, 冠层 PAV 对冠层总 FPAR 的贡献与冠层结构有关。落叶阔叶林冠层有显著的季节变化, 冠层 PAI 和组分比例年内波动明显。在春季, 叶片初长, 其数量和叶片面积都较小, 此时 PAI 以及 PAV 占 PAI 的比重都较低; 夏季是阔叶林的生长旺盛期, 冠层 PAI 和 PAV 面积高且稳定, 通常 PAI 保持在 4 以上; 在秋季, 随着生长季逐渐结束, 落叶阔叶林叶片开始枯落, PAI 和 PAV 逐渐降低<sup>[42-43]</sup>。冠层结构的这种季节变动极大地影响了  $\text{FPAR}_{\text{PAV}}$  占冠层总 FPAR 的比例。基于我们的模拟结果发现, 在低 PAI(0-1) 和低 PAV 面积比(0.5)时,  $\text{FPAR}_{\text{PAV}}$  甚至不及冠层总 FPAR 的一半。因此, 在初春和秋末冬初, 由于较低的叶面积指数(落叶林通常在冬季处于休眠状态, 光合作用可忽略)和 PAV 面积比, 冠层吸收的 FPAR 有很大一部分来自 NPV, 能有效用于光合作用的能量比重较低。而在阔叶林生长旺盛的夏季, PAI 和 PAV 面积通常很高<sup>[19]</sup>, 此时,  $\text{FPAR}_{\text{PAV}}$  占冠层总 FPAR 的比重不低于 1%, NPV 对冠层 FPAR 的贡献

低。所以,在春初和秋末冬初, $FPAR_{PAV}$ 与总 FPAR 差距较大,以冠层总 FPAR 估算 GPP 必将产生较大误差,导致 GPP 被高估;但在夏季森林植被茂密的情况下,NPV 对冠层吸收的 PAR 贡献低, $FPAR_{PAV}$ 接近总 FPAR,以总 FPAR 代替有效 FPAR 估算 GPP,尽管也会导致结果偏高但偏差较小。

### 3.2 绿色 FPAR( $FPAR_{PAV}$ )与植被指数关系

冠层结构的变化会对冠层光谱产生影响,进而影响到 NDVI 和 EVI。两种植被指数都随着 PAI 的增加而增加,但 NPV 的增加会导致植被指数值降低。根据光谱模拟结果可知,随着 PAI 的增加,冠层近红外波段反射率增加而红波段和蓝波段反射率降低,而两种植被指数主要由近红外波段与两个可见光波段的差值来决定,因此,它们必然会与 PAI 有正相关关系。NPV 和 PAV 比例的变动对近红外波段反射率影响明显,表现为 PAV 面积比的增加提高近红外反射率,而红波段和蓝波段反射率对 PAV 比例的变化不敏感。植被冠层的这种波谱特征可从冠层组分与光的相互作用来解释。在可见光的蓝、红波段,健康植被组分,无论是 PAV 还是 NPV,主要表现为吸收,反射和透射都比较低,导致冠层可见光部分的反射能力受组分比例的影响小。而在近红外波段,冠层叶片透射性强,光子可最大程度上与 NPV 相互作用,NPV 并不产生透射<sup>[44-45]</sup>,这使得近红外反射率的幅度降低。

用植被指数反演冠层 FPAR 是当前 FPAR 研究的一个重要方法,但是反演值多为冠层总 FPAR。基于设定情景下的模拟数据发现,无论是冠层总 FPAR 还是  $FPAR_{PAV}$ ,它们与 NDVI、EVI 之间都存在显著的线性相关关系,似乎基于 NDVI 和 EVI 可实现  $FPAR_{PAV}$  的估算。但是应该注意的是,这种关系是建立在假定 NPV 面积比例保持恒定不变的基础上,其可靠性和稳定性需要更多的数据来证明。现实中,落叶阔叶林 PAV 占 PAI 的比重有明显的季节性,在春季,它随着叶片的生长和增加逐渐增加,夏季达到最低值,秋季由于叶片的逐渐枯落,PAV 面积比又开始逐渐降低。对于成熟的落叶阔叶林来说,从春季到夏季,其 PAI 的增加和降低主要来自叶片的生长,而从夏季到秋季,冠层 PAI 的降低同样主要由叶片的枯落造成<sup>[46]</sup>。尽管 NPV 部分也将随着叶片的生长也会扩展,但其生长的速度和增加量难以和叶片相比,因此,将落叶阔叶林的 NPV 的面积指数视为定值是合理的。以固定的 NPV 面积指数值模拟冠层波谱和 FPAR,建立模拟数据集。在冬季,落叶阔叶林冠层叶片已经枯落,仅有 NPV 部分,可用该阶段的 PAI 代表冠层 NPV 面积指数。根据黄玫和季劲钧的研究,落叶阔叶林冬季植被面积指数大约在 0.5<sup>[42]</sup>,基于此我们对数据重新模拟,冠层 PAI 被设定为 1 到 7 变化,其他参数保持不变。

结果如图 8 所示,无论是 NDVI 还是 EVI,它们与  $FPAR_{PAV}$  都存在显著相关关系,但 EVI 与  $FPAR_{PAV}$  有更高的相关系数( $R^2 = 0.99$ ),并且在高植被覆盖情况下,NDVI 与  $FPAR_{PAV}$  的散点图呈现非线性关系。因此,相比于 NDVI, EVI 能更好描述冠层  $FPAR_{PAV}$ ,更适于估算冠层  $FPAR_{PAV}$ ,这种结果从理论上支持了 Xiao 的假设<sup>[5]</sup>。

## 4 结论

在本研究中,我们通过设置不同情景,应用物理模型 SAIL 模型,采用分层的方法开展冠层 FPAR 模拟,包括冠层总 FPAR、光合组分 FPAR 以及非光合组分 FAPR,并分析它们与 NDVI、EVI 的相关关系。得到以下结论:

(1) 落叶阔叶林冠层 FPAR 受冠层结构影响显著,冠层绿色 FPAR 随 PAI 和 PAV 面积比的增加而增加。在低植被覆盖区,冠层绿色 FPAR 所占比重低,非光合

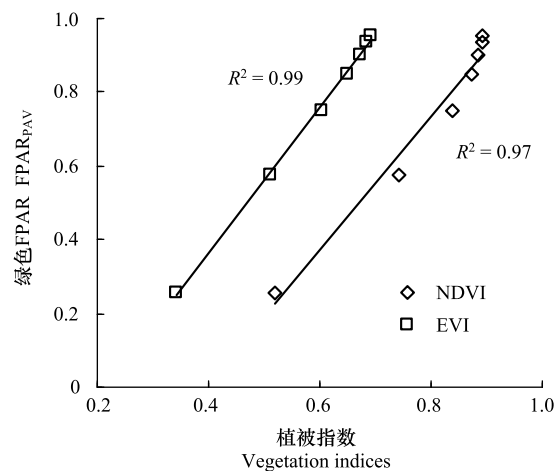


图 8 落叶阔叶林冠层植被指数与绿色 FPAR 的关系

Fig.8 The relationship between vegetation indices and canopy  $FPAR_{PAV}$



组分的存在对冠层 FPAR 的影响大于高植被覆盖区。

(2) 落叶阔叶林冠层 FPAR 与植被指数之间存在显著的相关关系,相比于 NDVI, EVI 能更好描述冠层绿色 FPAR。

在模拟时,我们对冠层做了一定的假设,且没有考虑背景变化的影响。在高覆盖度地区,光子穿透冠层到达地面的数量较少,背景的变化对冠层 FPAR 和反射光谱影响比较小,但是对于低覆盖区,太阳光经过冠层到达地面的比例会较高,地面反射率的高低会影响再次进入冠层的光子量,因此背景的差异会引起冠层 FPAR 和光谱的变动。因此,本研究还存在一定的不足,在未来的研究中,更多的因素将会被纳入。

**致谢:**本研究由国家自然科学基金项目(编号:41401407)资助;感谢 ORNL DAAC 提供冠层相关数据。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, Iii B M, Churkina G, Nemry B, Ruimy A, Schloss A. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results. *Global Change Biology*, 1999, 5(S1):1-15.
- [ 2 ] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S. 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*, 2004, 91(3/4): 490-507.
- [ 3 ] 董泰锋, 蒙继华, 吴炳方. 基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述. *生态学报*, 2012, 32(22): 7190-7201.
- [ 4 ] 侯湖平. 基于遥感的煤矿区植被净初级生产力变化的监测与评价. 徐州:中国矿业大学, 2010:59
- [ 5 ] Xiao X M, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson E A, Zhang Q Y, Moore III. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [ 6 ] Schoettker B, Phinn S, Schmidt M. How does the global Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) fraction of photosynthetically active radiation (FPAR) product relate to regionally developed land cover and vegetation products in a semi-arid Australian savanna?. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, 4(1):043538.
- [ 7 ] Zhang Q Y, Xiao X M, Braswell B, Linder E, Baret F, Moore III B. 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*, 2005, 99(3): 357-371.
- [ 8 ] Serrano L, Gamon J A, Peñuelas J. Estimation of canopy photosynthetic and nonphotosynthetic components from spectral transmittance. *Ecology*, 2000, 81(11): 3149-3162
- [ 9 ] Goward S N, Huemmrich K F. Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: an assessment using the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39( 2 ):119-140.
- [ 10 ] Xiao X M. Light Absorption by leaf chlorophyll and maximum light use efficiency. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1933-1935
- [ 11 ] 王文杰, 祖元刚, 王慧梅. 林木非同化器官树枝(干)光合功能研究进展. *生态学报*, 2007, 27(4):1583-1595.
- [ 12 ] 许慧男. 树枝与叶片绿色组织 C<sub>4</sub>酶相关光合特性差异. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010:1
- [ 13 ] Hall F G, Huemmrich K F, Goetz S J, Sellers P J, Nickeson J E.. Satellite remote sensing of surface energy balance: Success, failures, and unresolved issues in FIFE. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres* 1992;97(D17):19061-19089.
- [ 14 ] 高彦华, 陈良富, 柳钦火, 顾行发, 田国良. 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*, 2006, 10(5): 798-803
- [ 15 ] Xiao X M, Zhang Q Y, Hollinger D, Aber J, Moore B. Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS and climate data. *Ecological Applications*, 2005, 15(3): 954-969.
- [ 16 ] 李刚. 呼伦贝尔温带草地 FPAR/LAI 遥感估算方法研究. 北京: 中国农业科学院, 2009:7.
- [ 17 ] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003:317
- [ 18 ] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 16(2): 125-141.
- [ 19 ] Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, Bacour C, Zarco-Tejada P J, Asner G P, François C, Ustin S L. PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(S1):S56-S66
- [ 20 ] Huemmrich K F, Goward S N. Vegetation canopy PAR absorptance and NDVI: An assessment for ten tree species with the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(2): 254-269.
- [ 21 ] 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, Widlowski J L. 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*, 2006, 111(D13): D13110
- [22] Widlowski J L, Pinty B, Lavergne T, Verstraete M M, Gobron N. Using 1-D models to interpret the reflectance anisotropy of 3-D canopy targets: Issues and caveats. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(9):2008-2017.
- [23] Bacour C, Baret F, Béal, D, Weiss M, Pavageau K. Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAI  $\times$  Cab, from top of canopy MERIS reflectance data: Principles and validation. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(4):313-325.
- [24] Weiss M, Baret F, Garrigues S, Lacaze R. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. part 2: Validation and comparison with MODIS Collection 4 products. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(3): 317-331.
- [25] 肖艳芳,周德民,赵文吉.辐射传输模型多尺度反演植被理化参数研究进展. *生态学报*, 2013, 33(11):3291-3297.
- [26] Laurent V C E, Verhoef W, Clevers J G P W, Schaepman M E. Inversion of a coupled canopy-atmosphere model using multiangular top-of-atmosphere radiance data: A forest case study. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2603-2612.
- [27] Li W, Fang H L. 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*, 2015, 120(1): 2014JG002754.
- [28] Hall F G., Huemmrich K F, Strebel D E, Goetz S J, Nickeson J E, Woods K D. Biophysical, morphological, canopy optical property, and productivity data from the Superior National Forest. NASA, Technical Memorandum TM-104568. (1992)
- [29] Dungan J. Field Spectroradiometer Calibration Progress Report, Interoffice Memorandum, NASA/Ames Research Center, 5 January 1991
- [30] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*. 1994, 99(D3): 5263-5283
- [31] Wiegand C T, Maas S J, Aase J K, Hatfield J L, Pinter Jr P J, Jackson R D, Kanemasu E T, Lapitan R L. Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42(1): 1-21.
- [32] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, Zhao M S, Reeves M, Hashimoto H. A continental satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 2004, 54(6):547-560.
- [33] Steinberg Daniel C, Goetz Steinberg S J G, Hyer E J. Validation of MODIS F/sub PAR/ products in Boreal forests of Alaska. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1818-1828.
- [34] Friedl M A, Davis F W, Michaelsen J, Moritz M A. Scaling and uncertainty in the relationship between the NDVI and land surface biophysical variables; an analysis using a scene simulation model and data from FIFE. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(3): 233-246.
- [35] Myneni R B, Williams D L. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 200-211.
- [36] 陈雪洋,蒙继华,吴炳方,朱建军,杜鑫,张飞飞,纽立明.基于HJ-1CCD的夏玉米FPAR遥感监测模型. *农业工程学报*, 2010, 26(S1): 241-245.
- [37] King D A, Turner D P, Ritts W D. Parameterization of a diagnostic carbon cycle model for continental scale application. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(7): 1653-1664
- [38] Nakaji T, Ide R, Oguma H, Saigusa N, Fujinuma Y. Utility of spectral vegetation index for estimation of gross CO<sub>2</sub> flux under varied sky conditions. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(3): 274-284.
- [39] Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(3):375-384.
- [40] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289-298.
- [41] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(3):440-451.
- [42] 黄玫,季劲钧.中国区域植被叶面积指数时空分布—机理模型模拟与遥感反演比较. *生态学报*, 2010, 30(11): 3057-3064.
- [43] 柳艺博,居为民,陈镜明,朱高龙,邢白灵,朱敬芳,何明珠. 2000—2010年中国森林叶面积指数时空变化特征. *科学通报*, 2012, 57(16): 1435-1445.
- [44] van Leeuwen W J D, Huete A R. Effects of standing litter on the biophysical interpretation of plant canopies with spectral indices. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 123-138.
- [45] Asner G P, Wessman C A and Archer S. Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems. *Ecological Applications*, 1998, 8(4): 1003-1021.
- [46] Running S W, Thornton P E, Nemani R, Glassy J M. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. New York: Springer-Verlag, 2000, 44-57.