

DOI: 10.5846/stxb201707211305

钱钊晖, 王绍强, 陈敬华, 周国逸, 张雷明, 李焱沐, 孟泽, 陈蝶聪. 表征亚热带常绿林光合作用季节变化特征的多种植被指数. 生态学报, 2018, 38 (16): - .

Qian Z H, Wang S Q, Chen J H, Zhou G Y, Zhang L M, Li Y M, Meng Z, Chen D C. Study of multiple vegetation indices reveals photosynthetic phenology in a subtropical evergreen forest. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): - .

## 表征亚热带常绿林光合作用季节变化特征的多种植被指数

钱钊晖<sup>1,2</sup>, 王绍强<sup>1,2,\*</sup>, 陈敬华<sup>1,2</sup>, 周国逸<sup>3</sup>, 张雷明<sup>1,2</sup>, 李焱沐<sup>1,2</sup>, 孟泽<sup>3</sup>, 陈蝶聪<sup>4</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 中国科学院华南植物园, 广州 510650

4 广东省生态气象中心, 广州 510640

**摘要:** 利用遥感方法可以在区域尺度反演地表植被的光合生理状况和生产力变化, 但亚热带常绿林冠层结构季节变化较小, 传统的光谱植被指数对植被光合作用难以准确捕捉。利用 2014—2015 年中国科学院广东省鼎湖山森林生态试验站多角度自动光谱观测系统的光谱反射数据, 分别反演传统冠层结构型植被指数 (NDVI)、光合生理生化型植被指数 (CCI) 和叶绿素荧光型植被指数 (NDFI<sub>685</sub> 和 NDFI<sub>760</sub>), 并利用不同类型植被指数的组合, 构建多元线性回归模型。结果表明: 亚热带常绿阔混交林三种类型植被指数均与 GPP 的动态变化有显著的相关性, 其中, NDVI 是表征 GPP 较优的植被指数 ( $R^2 = 0.60, P < 0.01$ ), 其次为 CCI ( $R^2 = 0.55, P < 0.01$ ), 而 NDFI 能够作为辅助指数, 有效提高 NDVI ( $R^2 = 0.68, P < 0.001$ ) 和 CCI ( $R^2 = 0.67, P < 0.001$ ) 表征 GPP 的程度。多个植被指数参与构建的多元回归模型能够有效提高亚热带地区常绿林 GPP 季节动态变化的拟合精度, 提升遥感精确评估亚热带森林生产力的能力。

**关键词:** 亚热带; 常绿林; 光合作用季节变化; 植被指数

## Study of multiple vegetation indices reveals photosynthetic phenology in a subtropical evergreen forest

QIAN Zhaohui<sup>1,2</sup>, WANG Shaoqiang<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Jinghua<sup>1,2</sup>, ZHOU Guoyi<sup>3</sup>, ZHANG Leiming<sup>1,2</sup>, LI Yanmu<sup>1,2</sup>, MENG Ze<sup>3</sup>, CHEN Diecong<sup>4</sup>

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

4 Guangdong ecological meteorological center, Guangzhou 510640, China

**Abstract:** Remote sensing is an effective method to assess terrestrial vegetation photosynthetic physiology and productivity dynamics at a regional scale. The conventional spectral vegetation index such as normalized difference vegetation index does not accurately reveal the photosynthetic phenology of subtropical evergreen forests because canopy structure is relatively stable across seasons. This study calculated the conventional canopy structural vegetation index (normalized difference vegetation index, NDVI), photosynthetic physiological and biochemical vegetation index (chlorophyll/carotenoid index,

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2017YFC0503803), 中国科学院重点部署项目 (KFZD-SW-310-01), 国家自然科学基金 (41571192)

**收稿日期:** 2017-07-21; **网络出版日期:** 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sqwang@igsrr.ac.cn.

CCI), and chlorophyll fluorescence vegetation index (normalized difference fluorescence indices, NDFI) respectively, using the spectral reflection data from the automated multi-angular spectro-radiometer at the Dinghu Mountain Forest Ecosystem Research Station in Guangdong, China. We compared and analyzed their differences in tracking gross primary productivity (GPP) as measured by eddy covariance at the canopy level. A multivariate linear regression model was built to improve the fitting accuracy of GPP seasonal dynamics in this subtropical evergreen forest. The results show: for this mixed subtropical evergreen forest, 1) GPP was significantly correlated with all three indices, and the correlation with NDVI was the strongest ( $R^2 = 0.60$ ,  $P < 0.01$ ); 2) CCI could not replace NDVI as a better vegetation index to reveal GPP seasonal dynamics ( $R^2 = 0.55$ ,  $P < 0.01$ ); 3) NDFI could be used as a secondary index to effectively improve assessment of photosynthetic phenology ( $R^2 = 0.68$ ,  $P < 0.001$ ).

**Key Words:** subtropics; evergreen forest; photosynthetic phenology; vegetation index

全球陆地生物圈与大气圈之间气体交换的 90% 都是由植物光合作用进行调节的, 其中陆地植物总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 是全球最大的碳通量, 是量化生态系统固碳能力的关键参数<sup>[1]</sup>。而我国南方亚热带森林生态系统具有较高的固碳能力, 又处于对气候变化反应较敏感的地区, 对区域生态平衡起着巨大的调节作用<sup>[2]</sup>。因此, 精确评估我国南方亚热带森林生产力对研究该地区森林植被对气候变化的响应机制具有重要意义。

当前使用涡度协方差技术可以获取 GPP 的动态变化, 它可以精确观测站点尺度生态系统与大气间的碳水通量<sup>[3]</sup>。但是利用涡度协方差技术进行观测的通量站点数量有限, 观测尺度也较小, 只能通过其他的数据增补和空间扩展的方法估算区域和全球 GPP。而利用植被的光谱特性与碳通量的相关关系, 结合卫星遥感观测数据, 能够实现站点尺度 GPP 观测的空间扩展。

基于光谱观测的植被生产力 GPP 研究主要是依据地表植被反射率计算植被指数, 分析其在时间序列上对物候变化的敏感性, 从而探讨其与植被生产力 GPP 的关系<sup>[4]</sup>。但用于研究 GPP 的传统植被指数多为结构指数, 如归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)、增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI), 它们随着冠层结构的变化而变化<sup>[5]</sup>。但对由水、热或光照等引起的日尺度植被叶片生理性变化并不敏感, 仅能够在长时间尺度上反映出植被功能的变化<sup>[6]</sup>。这些植被指数和 GPP 之间虽具有很强的季节性相关关系, 但对常绿植物群落而言, 这种关系并不显著<sup>[7-9]</sup>。在估算 GPP 的光能利用率模型<sup>[10]</sup>中, 植物吸收的光合有效辐射 (absorbed photosynthetic active radiation, APAR) 和植物对于光能的利用效率 ( $\varepsilon$ ) 是重要参数:

$$GPP = APAR \times \varepsilon \quad (1)$$

而 APAR 又是由 400–700 nm 波谱范围的光合有效辐射 (photosynthetic active radiation, PAR) 及植物实际吸收的比例 ( $f_{APAR}$ ) 计算而来:

$$APAR = f_{APAR} \times PAR \quad (2)$$

式中  $f_{APAR}$  与冠层结构关系紧密, PAR 可由气象观测数据获取<sup>[10-11]</sup>。常绿林与落叶林的不同在于其冠层结构在不同季节几乎保持稳定, 常绿林  $f_{APAR}$  值也就较落叶林  $f_{APAR}$  稳定<sup>[11]</sup>。这使得由 NDVI 等冠层结构型植被指数所表示出的  $f_{APAR}$  信息难以准确描述常绿林光合作用季节动态变化。

另一方面, 光能利用率模型中光能利用效率 ( $\varepsilon$ ) 受环境状况影响较大, 动态调整过程复杂, 使得精确捕捉  $\varepsilon$  的快速变化变得尤为困难<sup>[12]</sup>。植物叶片叶黄素循环能够调整叶片内部能量分配, 将植物光合结构所接收的多余能量耗散, 对植物加以保护<sup>[13]</sup>。利用光谱观测获取光化学植被指数 (photochemical reflectance index, PRI) 能够监测这种生物化学过程, 继而提供了直接获取  $\varepsilon$  短时间变化的能力<sup>[14]</sup>。而在季节尺度上, 叶片和冠层 PRI 的主要驱动因素是叶片类胡萝卜素库的变化, 而不仅仅是叶黄素循环本身<sup>[15-17]</sup>, 因而叶绿素/类胡萝

卜素指数(chlorophyll/carotenoid index, CCI)<sup>[18]</sup>的变化可以更加直观地反映叶片光合作用活动的变化。CCI 由 MODIS 波段 11(531nm)和波段 1(645nm)构建而成,能够有效反应植物叶片色素比值的变化,在北美常绿林通量站的研究中相较于 MODIS NDVI,CCI 与 GPP 相关性更强<sup>[18]</sup>。

另一种量化  $\epsilon$  的方法是利用遥感手段监测光合作用中能量耗散的另一个途径——叶绿素荧光释放。荧光信号的强弱原则上与用做光合作用的能量成负相关,因此可以作为光合作用光转化的指示器<sup>[19]</sup>,并能够反映出植物光合作用速率及其有效程度<sup>[20-22]</sup>。通过测定叶绿素荧光,可将遥感技术从对冠层生物物理和生物化学的探测转移到对生态系统功能和光合活动变化的监测<sup>[23]</sup>。植物叶片吸收光能后释放的荧光峰值位于 680nm 和 760nm 左右<sup>[19]</sup>,日光诱导的叶绿素荧光(solar-induced fluorescence, SIF)包含了植物生化、生理和代谢功能以及 APAR 的信息,比传统植被指数对环境变化具有更高的敏感性<sup>[24]</sup>,利用荧光波段所构建的简单比值植被指数也对农作物水热胁迫具有很强的响应能力<sup>[6]</sup>。

本文以我国南方亚热带常绿针阔混交林为研究对象,利用地基高光谱观测技术,获取并计算与通量观测数据同步的多种冠层植被指数,包括 NDVI、CCI 和位于荧光发射波段的全新指数 NDFI。探讨在不同生物物理化学机制下,各植被指数对于我国南亚热带常绿针阔混交林 GPP 的表征程度,分析各植被指数的优缺点,并利用多指数构建多元回归模型,进而提高 GPP 表征效果。

## 1 研究区及方法

此次观测的针阔混交林样地位于鼎湖山自然保护区核心区内(23°10'24"N, 112°32'10"E)。保护区地处北半球亚热带,受季风湿润气候影响,水热资源丰富且同步,年太阳辐射约 4665 MJ m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>,年平均日照时数为 1433 h;年平均气温 21.0℃,最冷月平均气温约 12℃,最热月平均气温约 28℃;年均降水量 1956 mm,其中 76%集中在汛期(4—9月),10月到次年3月为相对少雨季节<sup>[25]</sup>。样地森林为人工种植的马尾松受到一些阔叶树种入侵而自然形成的过渡类型,是目前保存下来的最为典型、最为完整的亚热带常绿针阔叶混交林生态系统<sup>[25]</sup>。优势树种为木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)、锥栗(*Castanea henryi* (Skan) Rehd. et Wils.)和马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.),树龄约为 100 a、树高约 17 m<sup>[25]</sup>。

### 1.1 通量数据采集和 GPP 计算

日 GPP 观测值是通过涡度通量观测反演计算获得,其中主要观测系统开路涡度相关通量观测系统(Open Path Eddy Covariance, OPEC)安装于针阔混交林样地 1.5 倍冠层高度的 27m 处,对生态系统/大气界面的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 通量进行观测。OPEC 系统主要包括三维超声风温仪(CSAT3, Campbell Scientific Ltd.)和快速响应红外 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪(Li-7500, Li-Cor Inc.),分别进行三维风速以及 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 浓度脉动的测量<sup>[26]</sup>。日尺度净生态系统交换(net ecosystem exchange, NEE)由白天(PAR > 1.0 μmol<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>)半小时尺度 CO<sub>2</sub>通量计算得到。日生态系统总呼吸(ecosystem respiration, Re)由夜间 CO<sub>2</sub>交换量和 5 cm 土壤温度之间关系获得<sup>[27]</sup>,可将 NEE 拆分为 Re 和 GPP。根据公式(3)计算获得日尺度 GPP:

$$GPP = -NEE + Re \quad (3)$$

### 1.2 冠层光谱观测

植被反射率由冠层高光谱观测系统获得,采用的双通道光谱仪(UniSpec-DC; PP Systems)安装于通量观测塔顶部,高约 36 m(图 1)。其中一个通道连接装有余弦矫正器(UNI435; PP Systems)的光纤探头(UNI686; PP Systems)垂直向上测量太阳入射辐射,另一通道连接装有 15°视场角限制器(UNI688; PP Systems)的光纤探头(UNI684; PP Systems)向下同时测量冠层反射辐射。光谱仪可以接受波段范围长达 330–1100nm 的辐射,同时光谱分辨率达到 3 nm 左右。另装有自动角度旋转云台(PTU-D46; FLIR Systems)控制上行光纤的天顶角和方位角,使得光纤接收的冠层反射辐射尽可能来自通量塔周围较大面积,单个观测周期内能都覆盖通量塔周边约 7000 m<sup>2</sup>的范围,同时减少通量塔自身对光谱观测的影响。

双通道光谱仪和旋转云台都连接到塔下控制端计算机,通过 MATLAB 图形用户界面程序实现白天的自

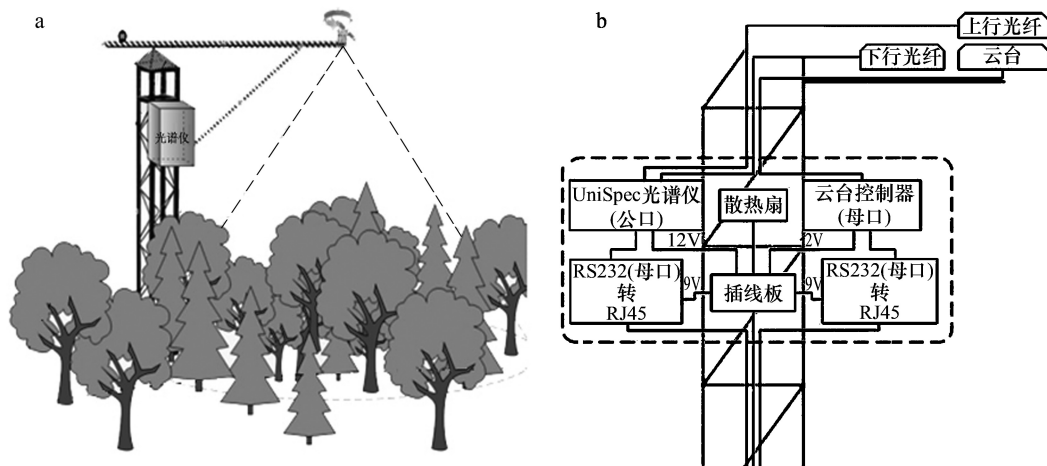


图1 森林冠层光谱观测示意图

Fig.1 Sketch map of forest canopy spectral observations

动观测。光谱仪每 2-3s 进行一次光谱采集,并于 15 min 保存一次文件。将每个文件中的数据进行观测角度插值和异常值剔除,再经过白色标准板参考辐射校正后计算光谱反射率。通过公式(4)、(5)、(6)、(7)计算得到 NDVI、CCI 和 NDFI:

$$NDVI = \frac{R_{800} - R_{630}}{R_{800} + R_{630}} \quad (4)$$

$$CCI = \frac{R_{531} - R_{645}}{R_{531} + R_{645}} \quad (5)$$

$$NDFI_{685} = \frac{R_{600} - R_{685}}{R_{600} + R_{685}} \quad (6)$$

$$NDFI_{760} = \frac{R_{800} - R_{760}}{R_{800} + R_{760}} \quad (7)$$

式中, $R$  代表该波长下的反射率值。计算完植被指数后利用算数平均法将每日 9:00—17:00 时的共 32 个文件中的植被指数平均值作为当天的植被指数观测值。

### 1.3 多元回归模型构建

利用多个植被指数构建二元线性回归模型去表征 GPP 动态变化时,先构建单一指数线性回归模型,再使用输入法加入第二个指数构建二元线性回归模型,统计每个指数在加入不同指数后, $R^2$  值的变化情况  $\Delta R^2$ 。通过比较  $\Delta R^2$  可以看出各指数表征 GPP 动态变化时的独立性,寻找各指数合适的合作指数。使用多元回归进行 GPP 的反演时,使用前进回归法对 NDVI、CCI、NDFI<sub>760</sub> 和 NDFI<sub>685</sub> 与 GPP 进行回归分析,逐步选择显著性最强的组合构建回归模型,并排除出加入后导致显著性较差的指数。

## 2 结果分析

### 2.1 归一化荧光植被指数特征分析

在光照条件良好的亚热带森林冬季和夏季正午时分(12 时—12 时 30 分),测定同一片森林冠层 400—850 nm 波段光谱反射率(图 2)。二者的波段反射率差值在 531 nm、685 nm 和 760 nm 处有明显的峰值,其中 760 nm 波段差异最大,季节反射率差值达到 0.8%。另外,在 531 nm 和 685 nm 波段附近也有 0.2%—0.4% 反射率的变化。位于 760 nm 与 685 nm 附近的远红光与红光波段正好与叶绿素荧光发射波段相吻合,531 nm 与叶黄素循环反射低谷波段相吻合。从光谱反射率的季节变化可以看出,在亚热带针阔混交林地区,光合作



用活动中叶绿素荧光变化和色素含量比值变化同样具有监测光合作用季节变化的潜力。

利用 760 nm 和 685 nm 附近的荧光发射波段的植被冠层反射率构成的植被指数被证实具有反映光合作用的能力。Dobrowski<sup>[6]</sup>利用 740 nm 和 690 nm 构建了简单的荧光比值植被指数 (fluorescence ratio indices) R690/R600 和 R740/R800, 成功反演出作物环境胁迫下光合作用的变化。为追踪森林光合作用的季节变化, 参考荧光比值植被指数所用的光谱反射波段, 将远红光和红光波段的峰值与附近波段的峰谷作归一化荧光指数 (normalized difference fluorescence indices, NDFI)。

NDFI 计算公式 (6)、(7) 中, 位于 685 nm 附近归一化荧光植被指数  $NDFI_{685}$  由 (R600-R685) 与 (R600 + R685) 的比值构建, 位于 760 nm 附近归一化荧光植被指数  $NDFI_{760}$  由 (R800-R760) 与 (R800 + R760) 的比值构建, 其中 600 nm 和 800 nm 是参考波段。使用归一化类型的指数能够有效放大光谱信息在时间序列上的动态变化, 形成更加直观的季节变化特征。作为计算 NDFI 分子的 (R600-R685) 较 (R800-R760) 的动态变化稍大, 它们主要控制指数的正负性; 而分母 (R600 + R685) 和 (R800 + R760) 则能更多的显示出反射率的季节变化 (图 3)。

从 2015 年 2 月开始, (R600 + R685) 和 (R800 + R760) 表现出显著增加的趋势。与此同时, 两个 NDFI 指数也迅速降低, 直到 3 月到达谷底, 之后在春季生长季来临后便逐步回升。在 4 月春夏季生长季到来时, (R600 + R685) 和 (R800 + R760) 都有一个峰值, 但  $NDFI_{685}$  与  $NDFI_{760}$  则表现出不同的变化趋势。这段时间 R600 小于 R685, 而 R800 大于 R760, 导致 (R600-R685) 与 (R800-R760) 呈现出不同的正负值, 使得  $NDFI_{685}$  有小幅的下降, 而  $NDFI_{760}$  则一直上升。

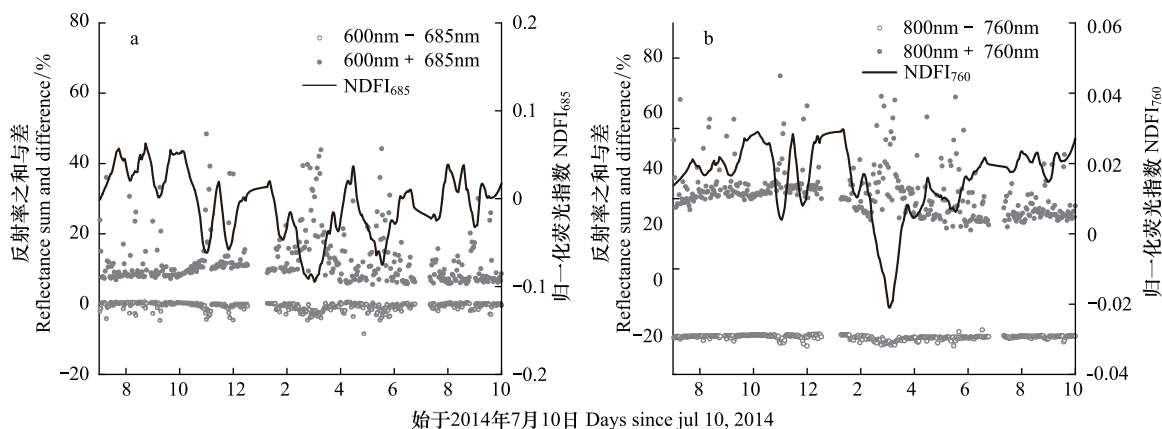


图 3 用于计算  $NDFI_{685}$  (a),  $NDFI_{760}$  (b) 的波段反射率和与差的时间变化序列图

Fig.3 Temporal behavior of  $NDFI_{685}$  (a),  $NDFI_{760}$  (b) and sum and difference of reflectances at 600 and 685 nm (a), 800 and 760 nm (b) since Jul 10, 2014.

## 2.2 植被指数与 GPP 时间动态分析

利用通量观测获取的鼎湖山亚热带常绿林日 GPP 的季节波动在  $2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  之间, 整个观测时间内的最低值出现在 2015 年 3 月 (图 4)。在 3 月, NDVI 也表现出明显的低值。由于 NDVI 所表示的是植被冠层结构

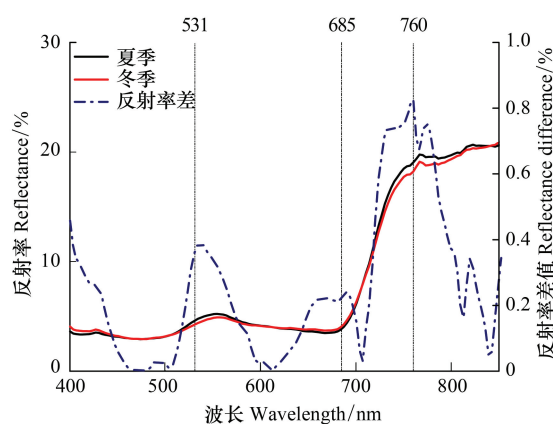


图 2 夏季和冬季不同波段冠层反射率及其差异

Fig.2 Canopy reflectance spectra in Dinghu Mountain, Guangdong Province, China, at 12 o'clock in winter

红线和黑线分别表示冬季和夏季正午时分 400—850 nm 反射率, 虚线是反射率差值

所发生的变化,所以在该时间段 GPP 的动态变化受到冠层结构影响较大,可能是受低温影响的冠层绿度较低,光合作用能力较弱所导致的。而 GPP 在高位发生短时动态变化时,NDVI 会维持在 0.7 附近,其微弱地动态变化与 GPP 趋势相同,但难以捕捉 GPP 的波动极值点(图 4a)。如在 2014 年 9 到 11 月之间,NDVI 一直保持高位,只出现几天的低值,难以捕捉 GPP 的整体变化,效果较差。而此时 CCI 却能够很好的表征出 GPP 一次明显地下降过程(图 4b),结合 CCI 和 NDVI 的变化,可以看出这段时间内光合作用变化主要是由于季节变化引起的植物叶片叶绿素及类胡萝卜素等色素库发生变化,其冠层结构并未发生较大改变,通过 CCI 的变化较好地表现出来。但是,CCI 在次年春季出现了较大的数据离散情况,而这段时间,NDFI<sub>685</sub> 也同样出现数据离散较大的情况(图 4c)。这段时间是温度上升后的春季,降雨增多,光合作用强度增加,GPP 已经从冬季的低谷中恢复到较高值,而频繁降雨会使得光谱观测结果受到一定的影响,使得 GPP 与观测 CCI 形成较大差异。

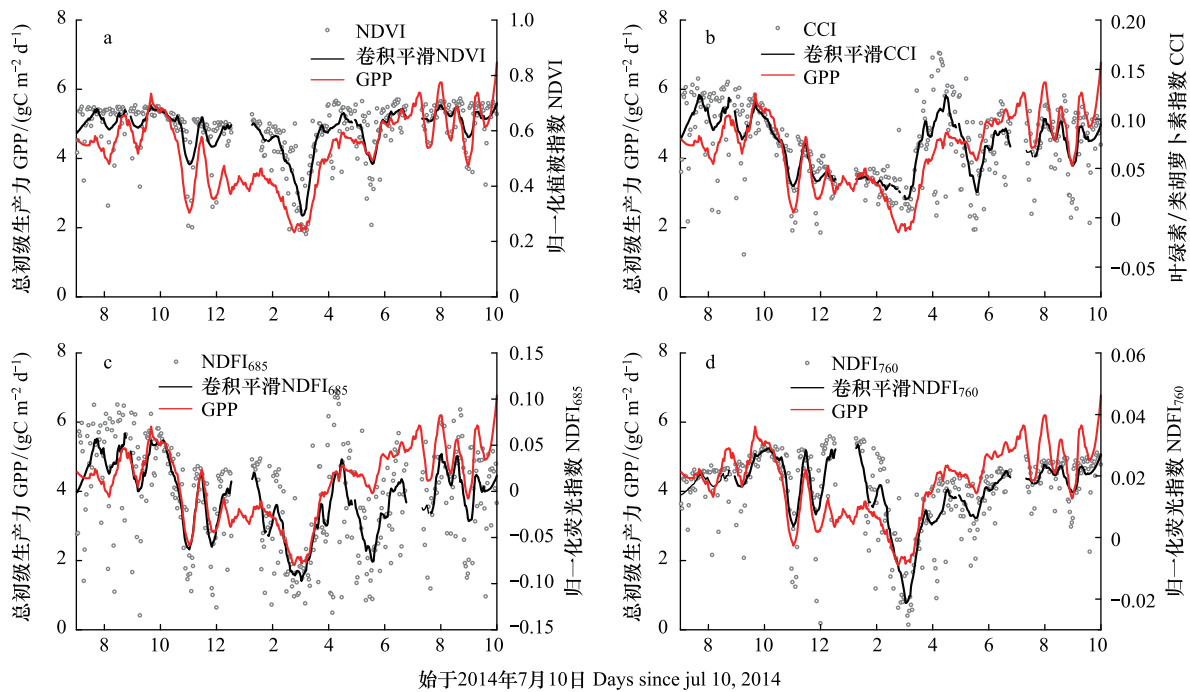


图 4 NDVI(a)、CCI(b)、NDFI<sub>685</sub>(c)和 NDFI<sub>760</sub>(d)与 GPP 的时间序列图

Fig.4 Seasonal patterns of canopy photosynthesis (expressed as daily GPP, red lines) and vegetation indexes (black dots), include NDVI (a), CCI (b), NDFI<sub>685</sub>(c) and NDFI<sub>760</sub>(d).

在本文中新增建的归一化荧光指数方面,NDFI<sub>685</sub>整体上与 CCI 在时间序列上表现相似(图 4b 和图 4c)。在经过卷积平滑处理后的图中可以看到,NDFI<sub>685</sub>在 2014 年 9 月到 12 月与 GPP 基本保持同步,捕捉 GPP 峰值和低值的效果比 CCI 更优。但相较于 CCI,NDFI<sub>685</sub>在次年春季到来后表现出更加地不稳定,数据离散,数值波动浮动也远大于 GPP 的短时间波动。NDFI<sub>760</sub>方面,在 7—10 月份的夏季,NDFI<sub>760</sub>较 GPP 的动态变化更加平缓(图 4d),无法有效捕捉到 GPP 变化的极值,这一点与 NDVI 的表现相似。而在 11—12 月和 4—6 月的晚秋末春季则保持相对同步,追踪效果良好。

### 2.3 各植被指数与 GPP 间相关性分析

在亚热带针阔混交常绿林地区,四种植被指数与 GPP 之间都具有显著的相关性(图 5),其中相关性最强的是传统的植被指数 NDVI, $R^2=0.60$ ( $p<0.01$ )。NDVI 虽被认为在常绿林难以捕捉 GPP 的动态变化,但与其与 GPP 之间紧密的生物物理机制,使其在 GPP 季节变化并不大的亚热带针阔混交常绿林地区仍具有较其他指数明显的优势。NDVI 在追踪 GPP 变化时的主要问题在于其数据多集中于 GPP 高值的时间段(图 5a),对 GPP 低值捕捉不足。这使得在全年 GPP 多位于高位的亚热带地区,NDVI 并没有失去自身的表征能力;而在

北方受温度胁迫较大的常绿林, GPP 在夏冬季有较大差异, NDVI 在捕捉 GPP 时就产生了明显的缺陷<sup>[18]</sup>。

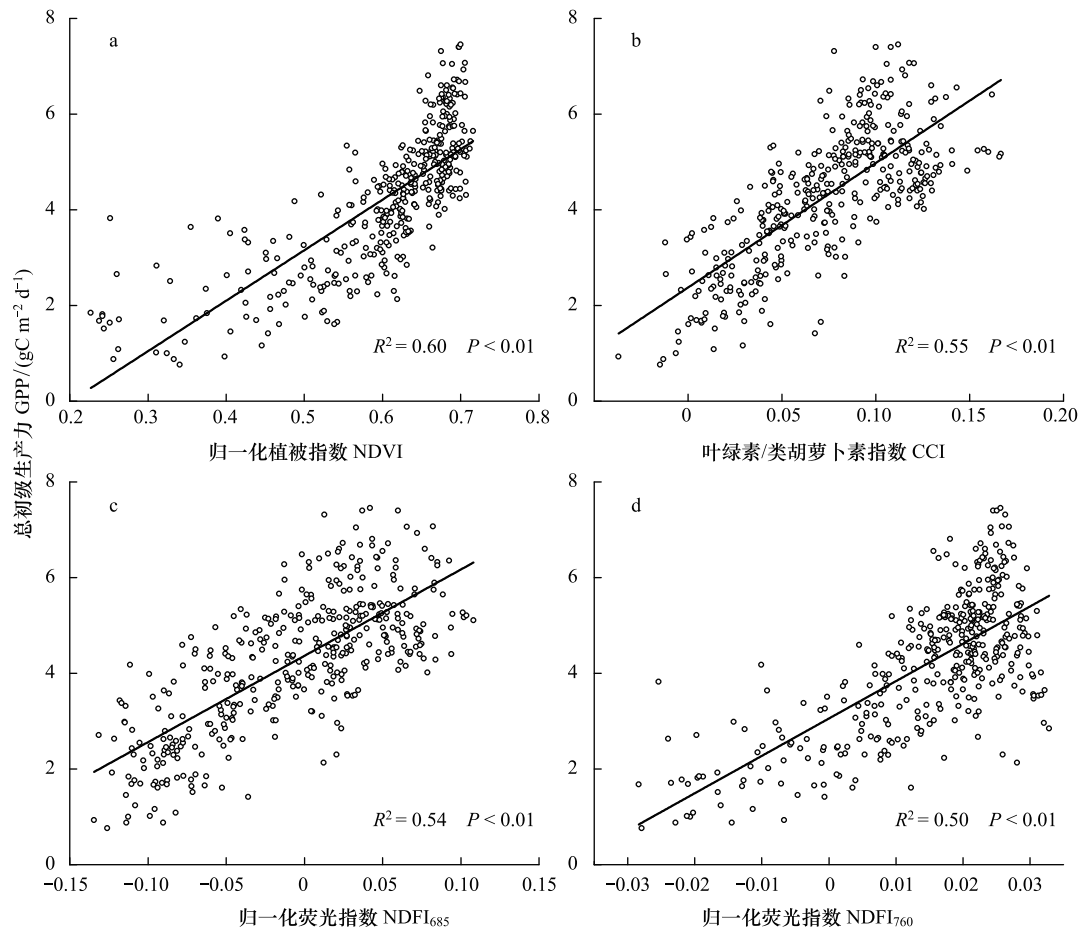


图5 日尺度 NDVI (a)、CCI (b)、NDFI<sub>685</sub>(c)和 NDFI<sub>760</sub>(d)与 GPP 散点图

Fig.5 Scatter plot showing the relationship between the canopy level NDVI (a), CCI (b), NDFI<sub>685</sub>(c) and NDFI<sub>760</sub>(d) with GPP for day timescale.

CCI 与 GPP 之间存在极显著的关系( $R^2=0.55, P<0.01$ ), 并且较 NDVI 能很好地捕捉不同大小的 GPP 值(图 5b), 尤其对 GPP 低值有很好的捕捉能力, 说明通过光合生理过程中各种色素的光谱分析能够在一定范围内解释亚热带针阔混交常绿林 GPP 的季节变化。但 CCI 在亚热带针阔混交常绿林并没有达到在追踪北方常绿林 GPP 时极高的相关性, 没有优于传统的 GPP 估算指数 NDVI。因此, 在亚热带针阔混交常绿林地区, CCI 难以代替 NDVI 来描述 GPP 的季节动态变化, 但 CCI 能够在一定季节内具有追踪 GPP 动态变化的能力, 可以作为 NDVI 模拟 GPP 变化的补充。

NDFI<sub>685</sub> 与 GPP 的相关性与 CCI 接近,  $R^2$  为 0.54 ( $p<0.01$ ), 并且表现出与 CCI 相似的分布特征。NDFI<sub>760</sub> 是四个指数中相关性最弱, 其在数据分布上与 NDVI 相似, 且与 GPP 仍具有极显著的相关性,  $R^2$  也达到了 0.50 ( $p<0.01$ )。利用 685 nm 和 760 nm 两个荧光发射波段构建的反射光谱植被指数同样具有反演 GPP 季节动态变化的能力。

从月尺度的相关性来看, 利用 NDVI 来表征该地区的 GPP 动态变化具有较为明显的优势( $R^2=0.77, p<0.01$ )(图 6)。而 CCI、NDFI<sub>685</sub> 和 NDFI<sub>760</sub> 与 GPP 的相关性都有不同程度地减弱。这是由于这 3 个指数所表达的叶片色素变化、叶绿素荧光的变动都是较短时间尺度上的生物化学变化, 长时间的统计计算会弱化其中的生物化学机制, 从而导致了相关性的减弱。而 NDVI 则恰好相反, 它所代表的森林冠层的变化时间稍长, 在符合其变化时间的统计尺度上所体现出来的相关性就有所提升。所以, 较慢频率的 NDVI 观测与较快频率 CCI

及 NDFI 观测有利于 GPP 动态变化的遥感估算。

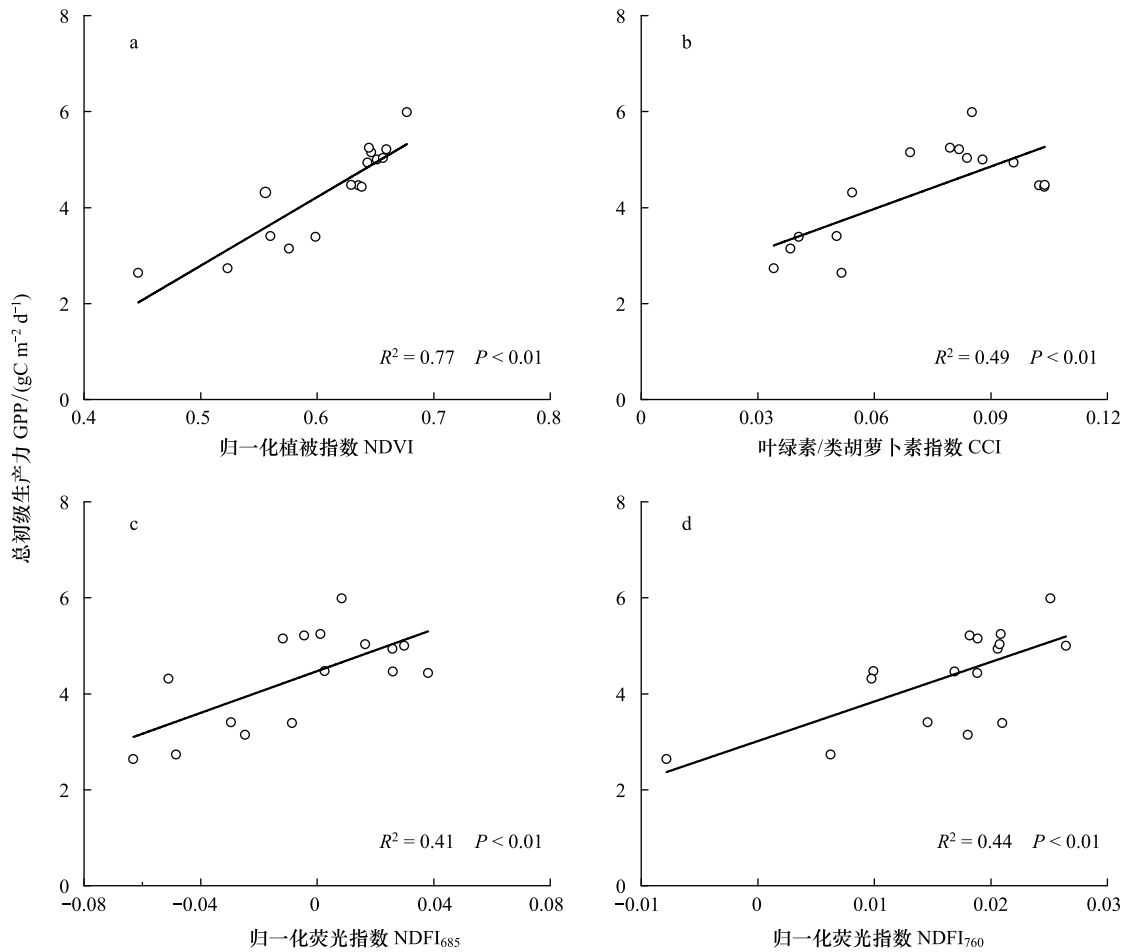


图 6 月尺度 NDVI(a)、CCI(b)、NDFI<sub>685</sub>(c)和 NDFI<sub>760</sub>(d)与 GPP 散点图

Fig.6 Scatter plot showing the relationship between the canopy level NDVI (a), CCI (b), NDFI<sub>685</sub>(c) and NDFI<sub>760</sub>(d) with GPP for monthly scale.

分季节来看,在气温较低的冬季,除 1 月的光谱观测数据中断导致有效数据不足之外,NDFI<sub>760</sub>都表现出一定的优势(图 7)。其中,在 2014 年 11 月,NDFI<sub>760</sub>在所有指数和月份中表现出与 GPP 最高的相关性, $R^2$ 值达到 0.93( $P < 0.01$ ),而此月 CCI 和 NDFI<sub>685</sub>两个指数也与 GPP 相关性最强, $R^2$ 分别为 0.89( $P < 0.01$ )和 0.88( $P < 0.01$ )。此外,NDFI<sub>760</sub>与 GPP 相关性在全年的波动最大,可以看出 NDFI<sub>760</sub>表征 GPP 的效果受季节变化影响最大。此外,4 个光谱植被指数与 GPP 间的相关性表现出基本一致的变化趋势,说明通过光谱观测表征 GPP 动态变化会受季节差异所带来的观测环境差异的影响。另一方面,在不同月份,各指数表征 GPP 的效果又存在一定的差异,这说明不同光谱波段对季节变化带来的观测环境变化敏感度不一样。这两点造成了利用不同波段构建的、具有不同生物物理化学机制的植被指数难以在全年水平上独立地精确捕捉亚热带常绿林 GPP,需要同时利用不同指数来提高 GPP 的表征效果。

#### 2.4 多元回归模型下对 GPP 表征能力的优化

每一个植被指数都有其独特的机制去揭示 GPP 的动态变化,但在经过相关性分析后发现,每个指数都有自身的一些缺陷,导致部分时段内  $R^2$  值不高。因此我们尝试利用多个指数,构建多元线性回归模型,提高 GPP 的反演精度。在二元线性回归模型下, $\Delta R^2$  最小的是将 NDFI<sub>760</sub> 加入到 NDVI 的回归模型(表 1),说明在捕捉 GPP 动态变化方面,NDFI<sub>760</sub> 对于 NDVI 的优化很小,NDVI 中已经包含了近乎全部 NDFI<sub>760</sub> 中的信息。但



是对于 CCI 来说, NDFI<sub>760</sub> 的加入却能够较好地提高对于 GPP 的捕捉精度 ( $\Delta R^2 = 0.086$ )。同时, CCI 对于 NDFI<sub>760</sub> 的改良效果也是其他指数中最优的 ( $\Delta R^2 = 0.169$ ), 这表明在双指数的线性 GPP 估算模型中, CCI 与 NDFI<sub>760</sub> 相对表达出不同的信息, 能够形成良好的合作关系, 有效提高 GPP 的估算精度,  $R^2$  值较 CCI 提升 23.45%, 达到 0.679 ( $P < 0.001$ )。此外, NDVI 与 NDFI<sub>685</sub> 也能够形成良好的互补关系, 两者共同估算 GPP 能将  $R^2$  值提升到 0.669 ( $P < 0.001$ )。

在多元线性回归模型的构建中, NDVI、CCI 和 NDFI<sub>760</sub> 逐步进入, 形成最优的多元线性回归模型, NDFI<sub>685</sub> 则因为在加入回归模型后显著性不强而被剔除 (表 2)。由 NDVI、CCI 和 NDFI<sub>760</sub> 三个指数共同组成的模型表征 GPP 动态变化的能力较 NDVI 提升了 13.31%,  $R^2$  值达到 0.681 ( $P < 0.001$ )。

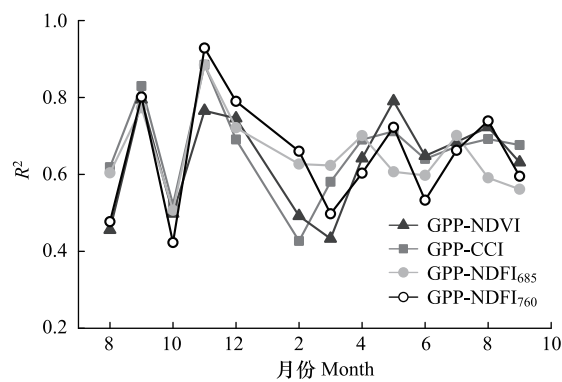


图 7 2014 年 7 月到 2015 年 9 月 NDVI、CCI、NDFI<sub>685</sub> 和 NDFI<sub>760</sub> 与 GPP 的月度相关性

Fig. 7 Correlation of NDVI, CCI, NDFI<sub>685</sub> and NDFI<sub>760</sub> with GPP monthly (from Jul 2014 to Sep 2015)

NDVI: 归一化植被指数, Normalized Difference Vegetation Index; CCI: 叶绿素/类胡萝卜素指数, Chlorophyll/Carotenoid Index; NDFI: 归一化荧光指数, Normalized Difference Fluorescence Indices

表 1 GPP 回归模型加入第二个指数后的  $R^2$  变化量

Table 1 The change in  $R^2$  when the other index added in the GPP model

| 加入参量<br>Added parameter     | 归一化植被指数<br>NDVI | 叶绿素/类胡萝卜素指数<br>CCI | 归一化荧光指数<br>NDFI <sub>685</sub> | 归一化荧光指数<br>NDFI <sub>760</sub> |
|-----------------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 归一化植被指数 NDVI                | —               | 0.043              | 0.035                          | 0.003                          |
| 叶绿素/类胡萝卜素指数 CCI             | 0.074           | —                  | 0.019                          | 0.086                          |
| 归一化荧光指数 NDFI <sub>685</sub> | 0.097           | 0.051              | —                              | 0.041                          |
| 归一化荧光指数 NDFI <sub>760</sub> | 0.104           | 0.169              | 0.081                          | —                              |

### 3 讨论

在落叶林生态系统, APAR 是影响 GPP 动态变化的最重要的因素, 这使得通过遥感手段计算获取的 NDVI 是良好的 GPP 追踪工具<sup>[11]</sup>。但在常绿林 GPP 的遥感估算中, 因为其冠层结构较为稳定, NDVI 所代表的 APAR 被认为难以有效的捕捉 GPP 的动态变化<sup>[18]</sup>。因此在北美温带常绿林, NDVI 无法准确捕捉 GPP 季节变化中的极值, 拟合效果较差, 而 CCI 却表现出明显的优势<sup>[18]</sup>。这是由于 CCI 自身不受冠层结构的影响, 它只和叶片中色素库的变化相关。光合作用季节变化伴随叶片色素库的变化, 所以 CCI 能够体现出光合作用的强度, 准确捕捉 GPP 的动态变化<sup>[18]</sup>。而在我国南方亚热带常绿林, 丰富的水热条件使得 GPP 在除冬季外都处于高位并表现相对稳定, 这使得 NDVI 仍然能够较好地表征出 GPP 的动态变化。与此同时, CCI 也与 GPP 存在显著的正相关, 具有一定的表征 GPP 季节变化的能力。但 CCI 在亚热带常绿林却没有如温带常绿林一般形成较 NDVI 显著的优势, 这可能是亚热带地区季节温度变化较小, 而色素变化却与温度的变化相关<sup>[18]</sup>, 这使得 CCI 难以与光合作用保持良好的拟合优势。这也体现出在亚热带常绿林, 利用植被指数进行的 GPP 遥感估算不能只依靠一种生物物理或化学过程, 需要综合运用多种植被指数的组合来提高 GPP 的表征精度。本文利用多元线性回归模型在一定程度上提高了 GPP

表 2 四个指数与 GPP 构建的前进法回归模型

Table 2 The correlation of GPP model with forward regression

| 模型 Model                           | R     | R <sup>2</sup> | $\Delta R^2$ | p       |
|------------------------------------|-------|----------------|--------------|---------|
| f(NDVI)                            | 0.775 | 0.601          | 0.601        | < 0.001 |
| f(NDVI, CCI)                       | 0.815 | 0.664          | 0.063        | < 0.001 |
| f(NDVI, CCI, NDFI <sub>760</sub> ) | 0.825 | 0.681          | 0.017        | < 0.001 |

NDVI: 归一化植被指数, Normalized Difference Vegetation Index; CCI: 叶绿素/类胡萝卜素指数, Chlorophyll/Carotenoid Index; NDFI: 归一化荧光指数, Normalized Difference Fluorescence Indices

的拟合效果,但仍需要进一步发挥各指数的特色,构建更加精确的多元模型。

通过分析不同月份上植被指数对 GPP 的追踪效果(图 7),发现不同波段构建的植被指数对于季节变化的敏感度是不同的,因而可以尝试组合使用不同的植被指数,并给予不同的权重来表征植被不同的物候期,从而更加精确地捕捉不同季节的光合作用变化。也可将 CCI 和 PRI 作为能够显示光合作用调控过程的重要参数加入到模拟 GPP 的模型中,以此来提高模型对于常绿林的适用性<sup>[24]</sup>。

除利用多种植被指数进行合作模拟之外,根据亚热带常绿林自身特色改进或设计新型植被指数也是进一步提高 GPP 表征精度的有效途径。本文利用了反射率季节变化较为明显的 685nm 和 760nm 构建了新型的植被指数 NDFI,经过相关性分析,发现 NDFI 确实能够与 GPP 形成显著的正相关,对于优化 NDVI 和 CCI 对 GPP 的表征效果也具有重要贡献,但其仍无法完全取代 NDVI 和 CCI。

此外,与 NDFI 位于相近光谱波段的 SIF 也被认为具有监测光合作用动态的能力<sup>[28]</sup>。近年来,众多学者利用 GOSAT、GOME-2 卫星和无人机遥感数据反演的 SIF 荧光信息,结合涡度碳通量数据,优化和发展 GPP 模型、动态植被模型和过程机理模型,提高对 GPP 的模拟精度<sup>[5, 29-30]</sup>。由于 SIF 卫星遥感产品的空间和时间分辨率非常粗,使得与通量站的验证数据匹配存在较大的差异,也难以有效揭示景观尺度或区域尺度植被 GPP 动态变化的特征。因此,SIF 与地基遥感观测的反射光谱植被指数相互结合,将具有进一步提高森林冠层光合作用动态变化监测效果的潜力。

#### 4 结论

通过对亚热带常绿针阔混交林冠层光谱的连续观测,分析运用多种植被指数表征光合作用季节变化的可靠性,得出以下结论:

(1) 基于冠层光谱观测所计算的结构型植被指数(NDVI)仍具有较好的描述亚热带常绿林 GPP 季节尺度动态变化的能力;色素型植被指数(CCI)能够在一定程度上表征亚热带常绿林 GPP 的季节变化,但效果弱于结构型植被指数(NDVI)。这一结果与位于北美温带大陆气候常绿林的研究结果并不一致。

(2) 基于冠层光谱观测所新构建的荧光型植被指数(NDFI)与 GPP 具有显著的正相关,其表征 GPP 长时间动态变化的效果较 NDVI 和 CCI 差,但在冬季具有表征 GPP 动态变化的优势。

(3) 将 NDFI 作为 NDVI 和 CCI 的辅助参量,构建二元回归模型,能够将亚热带常绿林 GPP 的表征效果分别提高 11.5% 和 23.45%。而综合三种指数构建的多元回归模型能够描述最多 68.1% 的 GPP 动态变化。

(4) 进一步提高亚热带常绿林光合作用的季节动态表征效果,需要考虑冠层结构对植被指数与光合作用的影响,以及植被指数在不同季节的特征,从而建立能反映生物物理化学机制的多元模型,并充分利用日光诱导叶绿素荧光(SIF)信息优化模型,实现多源卫星遥感信息的综合集成。

#### 参考文献(References):

- [1] Goetz S J, Prince S D. Modelling terrestrial carbon exchange and storage: Evidence and implications of functional convergence in light-use efficiency. *Advances in Ecological Research*, 1999, 28:57-92.
- [2] Li Y L, Zhou G Y, Zhang D Q, Wenigmann K O, Otieno D, Tenhunen J, Zhang Q M, Yan J H. Quantification of ecosystem carbon exchange characteristics in a dominant subtropical evergreen forest ecosystem. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 48(1):1-10.
- [3] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11):2415-2434.
- [4] Huete A R, Didan K, Shimabukuro Y E, Ratana P, Saleska S R, Hutrya L R, Yang W Z, Nemani R R, Myneni R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(6):L064054.
- [5] Damm A, Elbers J, Erler A, Gioli B, Hamdi K, Hutjes R, Kosvancova M, Meroni M, Miglietta F, Moersch A, Moreno J, Schickling A, Sonnenschein R, Udelhoven T, van der Linden S, Hostert P, Rascher U. Remote sensing of sun-induced fluorescence to improve modeling of diurnal courses of gross primary production (gpp). *Global Change Biology*, 2010, 16(1):171-186.
- [6] Dobrowski S Z, Pushnik J C, Zarco-Tejada P J, Ustin S L. Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state

- chlorophyll fluorescence at the canopy scale. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(3):403-414.
- [ 7 ] Garbalsky M F, Penuelas J, Papale D, Filella I. Remote estimation of carbon dioxide uptake by a mediterranean forest. *Global Change Biology*, 2008, 14(12):2860-2867.
- [ 8 ] Sims D A, Rahman A F, Cordova V D, El-Masri B Z, Baldocchi D D, Flanagan L B, Goldstein A H, Hollinger D Y, Misson L, Monson R K, Oechel W C, Schmid H P, Wofsy S C, Xu L K. On the use of modis evi to assess gross primary productivity of north american ecosystems. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(G4):G04015.
- [ 9 ] Pederson N, Dyer J M, McEwan R W, Hessler A E, Mock C J, Orwig D A, Rieder H E, Cook B I. The legacy of episodic climatic events in shaping temperate, broadleaf forests. *Ecological Monographs*, 2014, 84(4):599-620.
- [ 10 ] Heinsch F A, Zhao M S, Running S W, Kimball J S, Nemani R R, Davis K J, Bolstad P V, Cook B D, Desai A R, Ricciuto D M, Law B E, Oechel W C, Kwon H, Luo H Y, Wofsy S C, Dunn A L, Munger J W, Baldocchi D D, Xu L K, Hollinger D Y, Richardson A D, Stoy P C, Siqueira M B S, Monson R K, Burns S P, Flanagan L B. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from modis using regional tower eddy flux network observations. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7):1908-1925.
- [ 11 ] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, Zhao M S, Reeves M, Hashimoto H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 2004, 54(6):547-560.
- [ 12 ] Garbalsky M F, Penuelas J, Papale D, Ardo J, Goulden M L, Kiely G, Richardson A D, Rotenberg E, Veenendaal E M, Filella I. Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(2):253-267.
- [ 13 ] DemmigAdams B, Adams W W. Chlorophyll and carotenoid composition in leaves of euonymus kiautschovicus acclimated to different degrees of light stress in the field. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1996, 23(5):649-659.
- [ 14 ] Garbalsky M F, Penuelas J, Gamon J, Inoue Y, Filella I. The photochemical reflectance index (pri) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies a review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2):281-297.
- [ 15 ] Stylinski C D, Gamon J A, Oechel W. Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species. *Oecologia*, 2002, 131(3):366-374.
- [ 16 ] Nakaji T, Oguma H, Fujinuma Y. Seasonal changes in the relationship between photochemical reflectance index and photosynthetic light use efficiency of japanese larch needles. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(3):493-509.
- [ 17 ] Wong C Y S, Gamon J A. The photochemical reflectance index provides an optical indicator of spring photosynthetic activation in evergreen conifers. *New Phytologist*, 2015, 206(1):196-208.
- [ 18 ] Gamon J A, Huemmrich K F, Wong C Y S, Ensminger I, Garrity S, Hollinger D Y, Noormets A, Penuelas J. A remotely sensed pigment index reveals photosynthetic phenology in evergreen conifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(46):13087-13092.
- [ 19 ] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. *Annual review of plant biology*. 2008, 59:89-113.
- [ 20 ] Franck F, Juneau P, Popovic R. Resolution of the photosystem i and photosystem ii contributions to chlorophyll fluorescence of intact leaves at room temperature. *Biochimica et Biophysica Acta(BBA) Bioenergetics*, 2002, 1556(2/3):239-246.
- [ 21 ] Meroni M, Picchi V, Rossini M, Cogliati S, Panigada C, Nali C, Lorenzini G, Colombo R. Leaf level early assessment of ozone injuries by passive fluorescence and photochemical reflectance index. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(17/18):5409-5422.
- [ 22 ] Meroni M, Rossini M, Picchi V, Panigada C, Cogliati S, Nali C, Colombo R. Assessing steady-state fluorescence and pri from hyperspectral proximal sensing as early indicators of plant stress: The case of ozone exposure. *Sensors*, 2008, 8(3):1740-1754.
- [ 23 ] Magnani F, Raddi S, Mohammed G, Middleton E M. Let's exploit available knowledge on vegetation fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(25):E2510.
- [ 24 ] Gamon J A. Reviews and syntheses; Optical sampling of the flux tower footprint. *Biogeosciences*, 2015, 12(14):4509-4523.
- [ 25 ] 王春林, 于贵瑞, 周国逸, 闫俊华, 张雷明, 王旭, 孙晓敏. 鼎湖山常绿针阔叶混交林 CO<sub>2</sub> 通量估算. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2006, 36(S1):119-129.
- [ 26 ] 王春林, 周国逸, 王旭, 周传燕, 于贵瑞. 复杂地形条件下涡度相关法通量测定修正方法分析. *中国农业气象*, 2007, 28(3):233-240.
- [ 27 ] Wohlfahrt G, Anfang C, Bahn M, Haslwanter A, Newesely C, Schmitt M, Drösler M, Pfadenhauer J, Cernusca A. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128(3/4):141-162.
- [ 28 ] Walther S, Voigt M, Thum T, Gonsamo A, Zhang Y G, Köhler P, Jung M, Varlagin A, Guanter L. Satellite chlorophyll fluorescence measurements reveal large-scale decoupling of photosynthesis and greenness dynamics in boreal evergreen forests. *Global Change Biology*, 2016, 22(9):2979-2996.
- [ 29 ] Zarco-Tejada P J, Morales A, Testi L, Villalobos F J. Spatio-temporal patterns of chlorophyll fluorescence and physiological and structural indices acquired from hyperspectral imagery as compared with carbon fluxes measured with eddy covariance. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133:102-115.
- [ 30 ] Zhang Q Y, Cheng Y B, Lyapustin A I, Wang Y J, Gao F, Suyker A, Verma S, Middleton E M. Estimation of crop gross primary production (GPP):  $f_{\text{apar\_chl}}$  versus MOD15A2 FPAR. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 153:1-6.