

冠层结构对亚热带常绿林光能利用效率估算的影响

钱钊晖^{1,2}, 王绍强^{1,2}, 周国逸³, 张雷明^{1,2}, 孟 泽³

(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)

摘要: 利用遥感方法可以使用光化学植被指数(*PRI*) 在叶片尺度表征光能利用效率(*LUE*) 的动态变化, 但在冠层尺度上, 森林植被冠层结构是影响 *LUE* 估算精度的关键因素之一。利用 2014-2015 年中国科学院广东省鼎湖山森林生态试验站自动多角度高光谱观测系统的光谱反射数据, 分别计算常绿阔叶林 *PRI*、归一化植被指数(*NDVI*)、增强型植被指数(*EVI*) 和优化比值植被指数(*MSR*)。基于通量观测计算的 *LUE*, 分析不同表征冠层结构的植被指数对于 *LUE* 与 *PRI* 拟合精度的影响, 并利用不同类型植被指数的组合, 构建多元线性回归模型。研究结果表明: (1) 亚热带常绿阔叶林冠层结构型植被指数与冠层尺度 *PRI* 具有显著的相关性, 其中 *MSR* 与 *PRI* 相关性较为显著 ($R^2=0.40, P<0.01$); (2) 在植被冠层密度较大、*LAI* 较高 (即高 *NDVI* 和 *MSR*) 时, *PRI* 对于表征 *LUE* 的动态变化更具优势; (3) 利用 *NDVI*、*EVI*、*MSR* 和 *PRI* 所构建的估算 *LUE* 的多元回归模型, 能将 *LUE* 估算精度提高 18.14%, 对于冠层结构变化活跃期 (1-5 月), 能将 *LUE* 估算精度提高 54%。研究认为利用冠层结构参数能够进一步改进 *PRI* 对 *LUE* 的估算精度, 提升遥感精确评估亚热带常绿林生产力的能力。

关键词: 冠层结构; 亚热带常绿林; 光能利用效率; 光谱观测

借助于遥感手段的光能利用效率模型已成为陆地生态系统生产力估算的有效手段, 其利用卫星遥感所获得的全覆盖数据, 使得区域或全球尺度的生产力估算成为可能^[1]。但在光能利用效率模型中, 常假定“最大光能利用效率”是一个常数, 根据温度、水分等参数进行调整得到实际的光能利用效率 (Light Use Efficiency, *LUE*), 所以不同植被的总初级生产力 (Gross Primary Productivity, *GPP*) 估算结果存在较大误差^[2]。多数遥感方法在模拟区域尺度 *GPP* 时需要将 *LUE* 进行再校正, 因而在长期监测应用方面还存在一定的局限性。事实上, 植被光合作用是一个能够快速适应环境状况的动态调整过程, *LUE* 在日变化和季节变化中存在明显的调控机制^[3]。因而, 对 *LUE* 参数变化的认识不足是模拟 *GPP* 不确定性的主要来源之一^[3]。

近年来, 一些研究已开始利用高光谱遥感数据来估算 *LUE* 动态变化, 监测光合作用的复杂生理过程以及其对不同环境状况的依赖性, 并提供更加接近真实的 *GPP* 估算产品^[4]。研究发现, 叶片吸收的有效光合辐射将叶绿素 a 分子从活跃状态通过多种机制的组合回到基态, 这一机制过程包括光合作用 (或光化学淬灭)、非光化学淬灭和荧光发

收稿日期: 2018-07-08; 修订日期: 2018-11-22

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

作者简介: 钱钊晖 (1993-), 男, 安徽青阳人, 硕士, 研究方向为生态遥感及生态模型。

E-mail: qianzh.15s@igsnnr.ac.cn

通讯作者: 王绍强 (1972-), 男, 湖北襄樊人, 博士, 研究员, 研究方向为生态遥感及生态模型。

E-mail: sqwang@igsnnr.ac.cn

射^[5]。光化学植被指数 (Photochemical Reflectance Index, PRI) 利用 531 nm 和 570 nm 波段反射率能够监测与叶片水平非光化学淬灭关联的叶黄素变化, 是与光合状态直接相连的少数植被指数之一, 可以反映植物光合结构对于多余能量的耗散过程^[6]。PRI 提供了直接获取 LUE 短时间变化的能力, 并作为光合作用效率变化的敏感指示器, 成功地用于叶片水平 LUE 变化探测研究^[7]。

但在冠层尺度, 通过 PRI 进行 LUE 的估算不仅受到饱和水汽压差、光照条件等环境要素的影响^[8-9], 更受到冠层结构的影响^[10]。常用的冠层结构测量方式难以实现连续的区域尺度观测, 无法量化林冠结构对于 LUE 估算的影响。目前遥感方法广泛地应用于植被冠层生物物理参数的反演^[11], 以植被冠层反射光谱特征为基础所形成的比值植被指数 (Simple Ratio, SR)、归一化植被指数 (Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)、增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI) 等相继被用来反演以叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 为主要参量的冠层结构信息^[12-15]。

因此, 本文以中国南方亚热带常绿针阔混交林为研究对象, 在涡度通量站点开展地基高光谱观测, 同步获取多种光谱指数, 包括 PRI 和三种常用反演林冠结构的植被指数 NDVI、EVI 和优化的比值植被指数 (Modified Simple Ratio, MSR)。探讨冠层结构对亚热带常绿针阔混交林 LUE 估算的影响, 并利用三种结构型植被指数改进 LUE 与 PRI 之间的回归模型, 进而提高 LUE 估算精度。

1 研究方法

1.1 研究区概况

鼎湖山自然保护区位于北半球亚热带地区, 夏长冬短, 热量丰富, 雨量充沛, 阳光充足, 年太阳辐射约 $4665 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均日照时数为 1433 h, 平均气温为 21.0°C , 平均降雨量为 1956 mm。其中 76% 的降雨集中在 4 月至 9 月, 10 月到次年 3 月为相对少雨季节。本研究所开展的光谱观测样地位于鼎湖山自然保护区核心区内 ($23^\circ10'24''\text{N}$, $112^\circ32'10''\text{E}$), 样地中分布着季风常绿阔叶林、针阔混交林和山地常绿阔叶林。优势树种为锥栗 (*Castanea henryi* (Skan) Rehd. et Wils.)、木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.) 和马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.), 平均树高约为 17 m ^[16]。

1.2 LUE 的计算

通过涡度相关法获得的湍流 CO_2 通量和 CO_2 储存通量可计算净生态系统 CO_2 交换量 (Net Ecosystem Exchange, NEE) ^[17]。将所得的 NEE 拆分为总初级生产力 GPP 和生态系统总呼吸 (Ecosystem Respiration, Re) ^[18], 由式 (1) 计算出以半小时为步长的 GPP:

$$GPP = -NEE + Re \quad (1)$$

白天生态系统呼吸可通过夜间 NEE 和 5 cm 处土壤温度之间的指数关系反推获得^[18]。

基于 LUE 的 GPP 模型由于其大尺度的优势, 被普遍应用于生态系统的监测和评价。其中, LUE 可由式 (2) 计算得出:

$$LUE = \frac{GPP}{PAR \times f_{PAR}} \quad (2)$$

式中: PAR 为太阳辐射中对植物光合作用有效的光谱部分, 即光合有效辐射 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); f_{PAR} 为植物吸收光合有效辐射的比例, 也可以理解为植被冠层对光合有效辐射的吸收

系数。本文利用 $NDVI$ 与 f_{PAR} 间的经验公式,通过光谱观测 $NDVI$ 值间接计算 f_{PAR} ^[19]:

$$f_{PAR} = \frac{(NDVI - NDVI_{\min})(f_{PAR_{\max}} - f_{PAR_{\min}})}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} + f_{PAR_{\min}} \quad (3)$$

式中: $NDVI_{\min}$ 是植被覆盖为5%时的 $NDVI$ 值,一般取0.01; $NDVI_{\max}$ 表示植被覆盖达到98%时的 $NDVI$ 值,根据观测样地的植被冠层结构特点,取值0.7^[20]; $f_{PAR_{\min}}$ 和 $f_{PAR_{\max}}$ 分别表示最小和最大的 f_{PAR} 值,一般分别假定为0.001和0.95^[21]。

1.3 光谱观测及植被指数计算

整套冠层高光谱观测系统安装于通量观测塔顶部,高度达到约两倍冠层高度。光谱观测系统核心采用UniSpec-DC(PP Systems)双通道光谱仪,该光谱仪的波长范围为330~1100 nm,光谱分辨率3.3 nm左右。光谱仪连接有两个光纤通道,其中下行通道通过连接装有余弦矫正器的光纤探头测量太阳入射辐射,上行通道通过接装有15°视场角限制器的光纤探头测量冠层反射辐射。将上、下行辐射的能量值经过白板校正后,计算特定波段下的光谱反射率,并通过光谱反射率计算各类植被指数(表1),并计算每半小时的平均值以匹配通量观测数据的时间尺度。

表1 通过高光谱仪测得的反射率所计算的植被指数及计算公式

Table 1 Vegetation indexes and their formulae

植被指数	计算公式	引用
光化学植被指数 PRI	$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$	Gamon 等 ^[6]
归一化植被指数 $NDVI$	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	Rouse 等 ^[22]
增强型植被指数 EVI	$EVI = 2.5 \times \left(\frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7.5\rho_{BLUE} + 1} \right)$	Huete 等 ^[14]

2 结果分析

2.1 时间动态特征分析

根据通量观测数据所计算的 LUE 时间动态变化可以看出,研究区 LUE 日均值在0.4~2 g·C/MJ范围内,观测期 LUE 较高值出现在2014年8月和2015年3月。在观测期 PRI 与 LUE 具有较一致的变化趋势,但没有表现出 LUE 峰值变化,如在2014年8月、2015年3-5月的一段时间(图1a,灰色条带), LUE 有显著的升高,而 PRI 的变化则比较缓和,没有表现出与 LUE 相应的上升幅度。在选择三个植被指数方面, $NDVI$ 与 MSR 表现出相似的变化特征,与 LUE 和 PRI 的时间动态变化趋势相反(图1b、图1c),并且两者的低谷能够较好地与 LUE 高峰时间相匹配。但在个别时间段,如2014年11月,两者展现出较 LUE 更强的动态变化。这可能在基于通量观测计算 LUE 的过程中引入了 $NDVI$ 这个变量,使得 $NDVI$ 与 LUE 具有显著的负相关性。在 EVI 方面,由于引入蓝光波段,加入土壤背景调节参数和大气修正参数,减少了土壤背景因素和大气因素的干扰,所以时间动态变化幅度小很多。研究发现, EVI 能体现出部分 LUE 的动态变化(图1,灰色条带),大部分日动态变化则因为其计算过程中的参数修正而没有体现出来。

2.2 相关性分析

PRI 捕捉的是植物光合作用变化时的信号,而光合作用受外界环境影响在一天内会

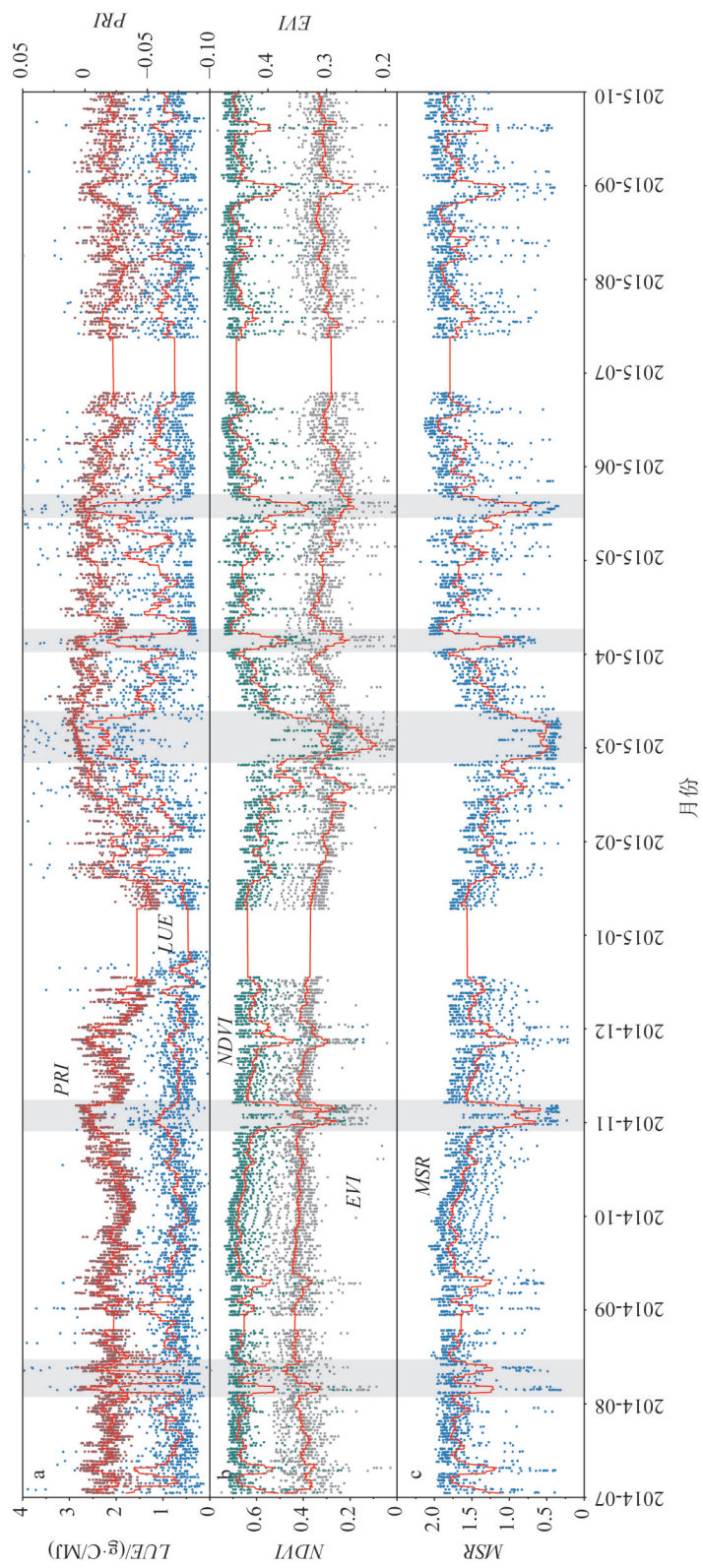


图1 LUE与PRI、NDVI、EVI、MSR的时间动态变化(红线为卷积平滑处理后数据动态变化)

Fig. 1 Seasonal patterns of canopy photosynthesis LUE, PRI, NDVI, EVI and MSR

不断变化,所以PRI不宜采用如日尺度等较长时间尺度的概念来阐述。受制于通量观测计算出的LUE是半小时尺度的,因此在LUE和PRI的相关性分析中,均使用半小时尺度的LUE和PRI数据。在观测的450天内,LUE与PRI具有显著的相关性, R^2 值为0.309 ($P<0.01$) (图2a)。LUE与PRI在指数函数模型下形成最优的拟合效果,为将指数关系简化为线性关系,构建 $\ln LUE$ 与PRI进行统计分析。在此线性回归分析中, $\ln LUE$ 与PRI具有显著的正相关, R^2 值为0.347 ($P<0.01$) (图2b)。利用PRI单独反演的 LUE_{PRI} 与观测LUE值的均方根误差 $RMSE=0.667$ (图2c)。PRI无法与LUE的高值部分形成较好的拟合效果, LUE_{PRI} 集中在 $2.5 \text{ g} \cdot \text{C}/\text{MJ}$ 以下,与观测LUE间的主要误差来源于当观测LUE大于 $2.5 \text{ g} \cdot \text{C}/\text{MJ}$ 时的部分。通过图1可以看出,LUE高值多出现于NDVI、EVI和MSR较低、冠层较稀疏的时期。这一时期较低的LAI对PRI的光谱观测产生较大的影响,导致这一时期的LUE模拟误差变大。

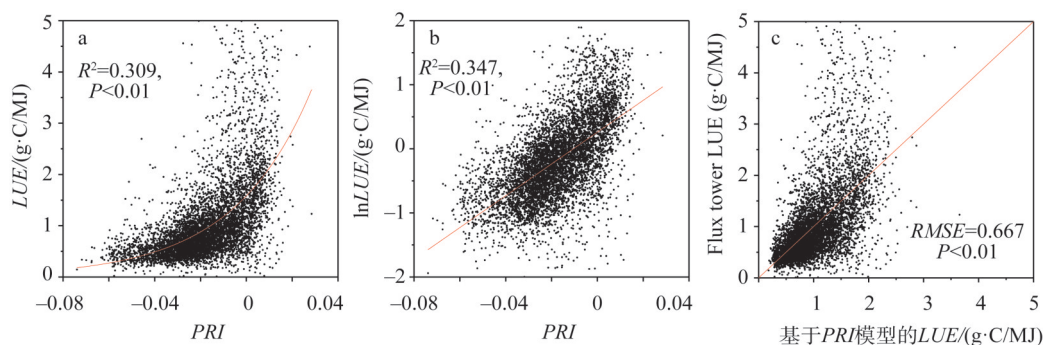


图2 半小时尺度LUE、 $\ln LUE$ 与PRI、 LUE_{PRI} 与LUE的散点图

Fig. 2 Scatter plot showing the relationship between the canopy level LUE, $\ln LUE$ and PRI, the LUE from flux tower and the LUE simulated by PRI

不同结构冠层型植被指数与PRI相关性不一样。NDVI和MSR与PRI都有显著相关性,在二项式回归拟合下, R^2 值分别为0.390 ($P<0.01$)和0.400 ($P<0.01$) (图3a、图3c)。而EVI与PRI也具有显著相关性,但其相关性较弱, $R^2=0.053$ ($P<0.01$) (图3b)。可以看出,表征叶黄素循环和叶片色素库变化的PRI在进行冠层尺度监测时会受到来自植被冠层的影响,并且利用NDVI和MSR能够更明显地体现出来。

通过计算日均冠层结构植被指数和每日PRI对 $\ln LUE$ 的决定系数 $R^2(\ln LUE-PRI)$,进一步探究冠层光谱观测的PRI受冠层结构影响的程度。可以看出 $\ln LUE$ 与PRI在NDVI和MSR较高时表现出较好的相关性 (图4),这可能由于在冠层较密、LAI较高时LUE与PRI之间的关系受到背景噪音的干扰较小。这说明较高的NDVI和MSR是LUE与PRI形成良好关系的重要条件之一。而在NDVI和MSR最低的一个区间, $\ln LUE$ 与PRI的相关性也比较高,这可能由于较低的NDVI和MSR多出现于3月份 (图1),这一阶段的LUE和PRI的时间动态变化特征与其他时间段不同,PRI明显较LUE变化更平缓,使得这一阶段的LUE与PRI有不同的拟合方程,形成较高的相关性。而这一特殊的拟合方式表达出来的更多可能是叶片色素或外界环境在这一阶段的特殊性。对于日均EVI,可以看出其集中于0.3~0.36之间,季节间变化相对稳定。与NDVI和MSR不同,LUE与PRI最好的相关关系并没有出现在EVI较高的天数中。这可能由于EVI高植被覆盖区较为敏感,且针对土

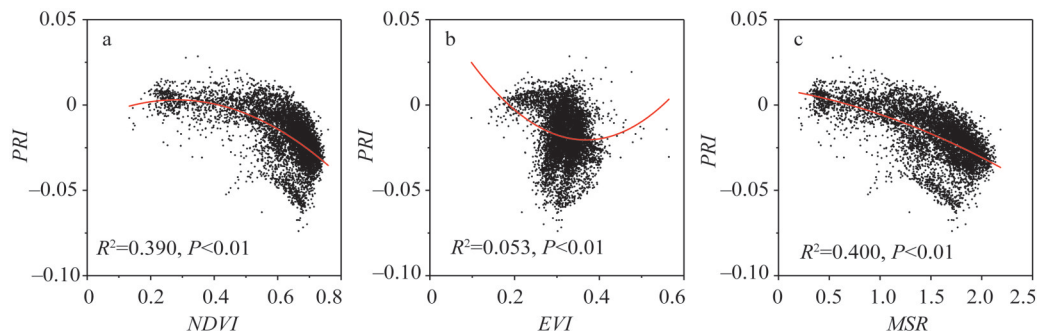
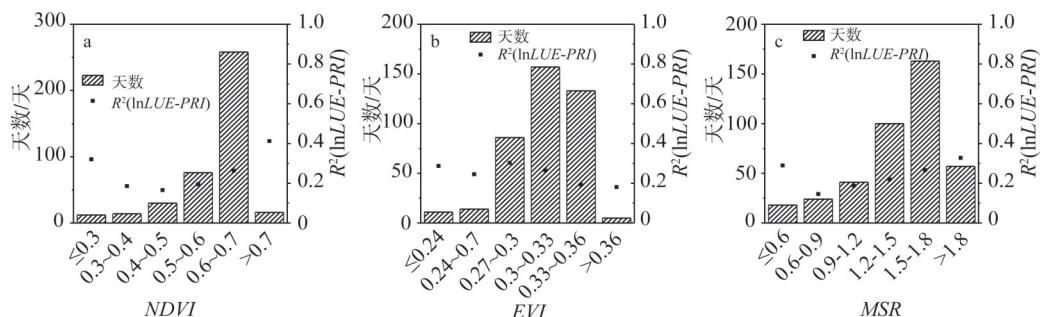


图3 半小时尺度PRI与NDVI、EVI和MSR散点图

Fig. 3 Scatter plot showing the relationship between the canopy level NDVI, EVI, MSR and PRI

图4 不同数值区间的日均NDVI、EVI和MSR的天数和对应区间的 $R^2(\ln LUE-PRI)$ Fig. 4 Days of NDVI, EVI and MSR in different numerical ranges and the $R^2(\ln LUE-PRI)$

壤背景进行了修正,无法体现出LAI变化对LUE与PRI之间相关性的影响。

由于常绿林的冠层结构季节变化较小,每月冠层结构型植被指数的平均值在该月具有一定的代表性,因此选择每月PRI对于lnLUE的决定系数 $R^2(\ln LUE-PRI)$ 与植被指数进行比较(图5)。*NDVI*和*MSR*在月尺度上仍然具有相似的变化特征,在冬季表现出较为明显的低值。*EVI*的变化趋势与前两者相似,但仍保持平缓变化。对比 $R^2(\ln LUE-PRI)$ 变化可以看出,在1-5月的整个阶段,*NDVI*、*MSR*和 $R^2(\ln LUE-PRI)$ 三者表现出了极为一致的变化趋势,从这点可以看出在3月出现的 $R^2(\ln LUE-PRI)$ 极小值和4月出现的 $R^2(\ln LUE-PRI)$ 极大值与冠层结构在这一时间段的急剧变化密不可分。另一方面,可以看到在其他季节, $R^2(\ln LUE-PRI)$ 并没有与*NDVI*、*MSR*保持同步高位,而是维持在较低水平。这可能由于1-5月冠层结构变动较为活跃,植物光合作用变化主要受制于冠层结构的变动。而在其他季节,冠层结构维持在高位且变化较小,光合作用的时间动态变化更多受外界环境如降雨、升温等过程的影响。

2.3 多元回归模型对LUE表征能力的优化

利用PRI表征LUE季节动态变化的效果受冠层结构影响,并且经相关性分析发现,*MSR*和*NDVI*在一定程度上具有一定改善表征效果的潜力。考虑到*NDVI*和*MSR*表现出较为相似的信息,尝试在lnLUE与PRI的回归分析中分别加入*MSR*和*NDVI*,构建二元线性回归模型。其中,*MSR*对于lnLUE与PRI的相关性提升最大,决定系数的变化量 ΔR^2 达到0.054(表2)。将三个指数都加入回归模型,能将PRI对于lnLUE的决定系数 R^2 值提升

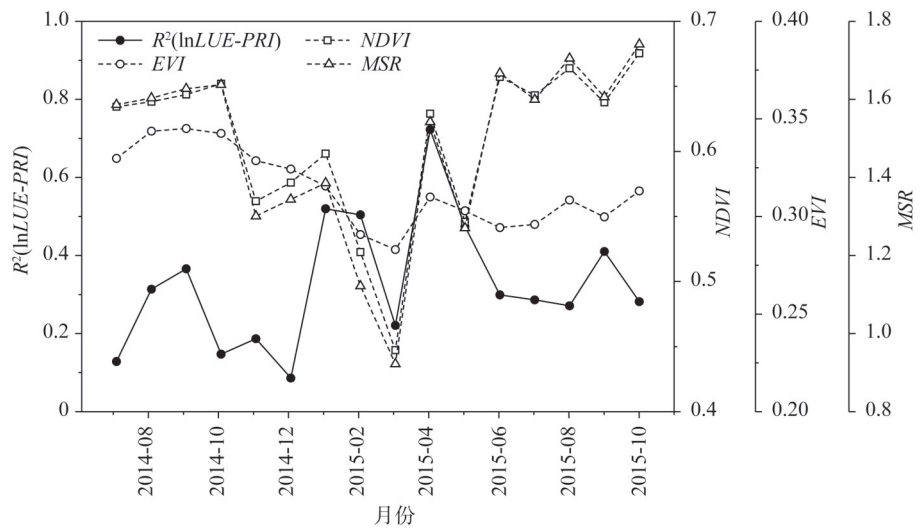


图5 月尺度NDVI、EVI、MSR和 $R^2(\ln LUE-PRI)$ 时间动态变化
Fig. 5 Seasonal patterns of NDVI, EVI, MSR and $R^2(\ln LUE-PRI)$

18.14%，达到0.410 ($P<0.001$)。

另一方面，针对冠层结构变动较为活跃的1-5月单独计算。这一时间段植物光合作用变化更多地受制于冠层结构的变动，冠层结构型植被指数的加入对提高LUE的表征精度有更大潜力。在二元线性回归模型中，MSR对于lnLUE与PRI的相关性提升仍然最大，决定系数变化量 ΔR^2 达到0.173。而且，相较于整个观测期的回归分析，无论加入哪一种植被指数，冠层结构变化较大时期的决定系数变化量 ΔR^2 都更大，LUE表征精度的提升更为明显。NDVI、MSR和EVI三个冠层结构型植被指数和PRI共同组成的回归模型较PRI单因子回归模型对于LUE动态变化表征能力提升了54%， R^2 值达到0.636 ($P<0.001$)。同时，通过赤池信息量准则（Akaike Information Criterion, AIC）判别，可以看出增加冠层结构型植被指数后，拟合的优良性得到提高，没有出现过度拟合情况。

表2 多元线性回归模型下 R^2 的变化

Table 2 The change of R^2 under the multiple linear regression model

lnLUE	完整观测期				冠层结构变化较大时期（1-5月）				P
	R	R^2	ΔR^2	AIC	R	R^2	ΔR^2	AIC	
f(PRI)	0.589	0.347	—	-8382	0.643	0.413	—	-2608	
f(PRI, NDVI)	0.628	0.394	0.047	-8846	0.743	0.552	0.139	-3204	
f(PRI, EVI)	0.593	0.352	0.005	-8433	0.651	0.424	0.013	-2650	< 0.001
f(PRI, MSR)	0.633	0.401	0.054	-8930	0.765	0.586	0.173	-3374	
f(PRI, NDVI, MSR, EVI)	0.640	0.410	0.063	-9037	0.797	0.636	0.223	-3656	

3 结论与讨论

3.1 结论

通过开展亚热带常绿林冠层光谱观测，分析多种冠层结构型植被指数对PRI估算

*LUE*的影响,得出以下结论:

(1) 冠层结构对于遥感观测冠层尺度的 *PRI* 具有一定的影响,能够体现观测结构的植被指数 *NDVI*、*EVI* 和 *MSR* 与 *PRI* 都存在显著的相关性,其中 *MSR* 与 *PRI* 形成相对较强的相关性。

(2) 冠层结构对基于 *PRI* 估算 *LUE* 具有一定的影响,在冠层密度较大、*LAI* 较高,即高 *NDVI* 和 *MSR* 时, *PRI* 能更好地表征 *LUE* 的动态变化。

(3) 利用 *NDVI*、*EVI*、*MSR* 和 *PRI* 所构建的估算 *LUE* 的多元回归模型,能将 *LUE* 估算精度提高 18.14%,对于冠层结构变化活跃期,能将 *LUE* 估算精度提高 54%。

(4) 为进一步提高亚热带常绿林 *LUE* 估算精度,需要同时考虑环境因素和冠层结构对于植被指数监测的影响,从而建立能反映植被冠层光合作用生物化学和生物物理机制的多元模型。

3.2 讨论

相较于北半球温带北方针叶林,基于 *PRI* 的亚热带常绿林 *LUE* 遥感估算存在较多的不确定性^[23-25]。在北方针叶林地区, *PRI* 可以作为 *LUE* 的替代指标^[26-27]。而在中国南方亚热带常绿林, *PRI* 与 *LUE* 的相关性较弱,利用 *PRI* 表征 *LUE* 动态变化的能力也较差^[28-29]。在位于江西省千烟洲生态试验站的中亚热带人工针叶林样地,冠层观测的 *PRI* 与 *LUE* 的相关关系受频繁降水的影响较大, *PRI* 难以准确表征 *LUE* 的动态变化^[28]。频繁降水过程使得外界环境如有效光合辐射、饱和水汽压差和温度等产生不断变化,直接影响植被光合作用过程。而光谱观测 *PRI* 对这一时期的变化并不敏感,导致其与通量观测计算的 *LUE* 拟合效果较差。相反,在天气晴朗的观测条件下, *LUE* 与 *PRI* 的相关性较好^[28]。位于鼎湖山亚热带常绿林的研究也进一步证实了光合有效辐射是影响中国南方亚热带森林 *LUE* 估算最大的环境因素^[29]。

另一方面,不同植被类型在冠层结构上的区别,也使得 *PRI* 进行 *LUE* 遥感估算的精度在不同植被类型上产生差异。有研究人员结合气象变量和 LiDAR 描述的森林冠层阴影,证明了在不同站点、不同森林成分结构类型下 *PRI* 对 *LUE* 表征能力的不同^[30]。在对农田生态系统 *LUE* 估算研究中发现,剔除 *LAI* 影响因素的 *PRI* 值能够有效提高 *LUE* 的估算精度^[31]。在湿地生态系统,冠层 *PRI* 对冠层下垫面的变化较为敏感,当 *LAI* 小于 5 时就无法表现出真实的光谱反射率^[32]。这些研究也说明了源于北方针叶林且在叶片尺度作为 *LUE* 替代指标的 *PRI*,在应用到其他植被类型下要充分考虑冠层结构所带来的误差。本文以中国南方亚热带常绿林为例,使用与 *PRI* 同一光谱仪获取的光谱反射信息计算植被指数,对 *PRI* 进行冠层结构方面的优化,提升 *LUE* 估算精度。这一方法在光谱仪波段允许的情况下,无需添加其他观测设备,只需提取几个波段反射率进行计算即可对 *PRI* 进行实时优化。当然,对于不同站点、不同植被类型,需要根据环境及其冠层光谱特征挑选修正效果最优的结构型植被指数和计算波段。

值得注意的是,植物吸收的有效光合辐射 (*APAR*) 是确定 *LUE* 通量观测值的重要参数。包括本文所用方法在内的不同经验模型间接计算出的 *APAR* 对 *LUE* 的测算有较大的差别,使得基于通量设备测算出的 *LUE* 存在一定的不确定性。这需要在今后的研究中使用多个辐射计置于植被的上层和下层实地观测,以直接获取 *APAR* 值,提高 *LUE* 计算精度。此外,在森林生态系统,复杂的林冠和林下环境使得光照在林中的传输过程十分复杂,寻找有效的方法解释林中辐射传输过程对 *PRI* 估算 *LUE* 的影响也显得非常重要。

同时,考虑到在森林生态系统开展站点尺度光谱观测时,光纤探头距离植被冠层有十几米的高度,气溶胶等大气环境因素对于光谱观测的干扰也值得重视。合适的大气校正方法是进一步提高地基光谱观测精度的有效手段,也能更加清晰地认识到不同生态系统下 *PRI* 估算 *LUE* 存在较大差异的原因。

此外,对荧光释放与非光化学淬灭过程的联合监测,能够表现出更加精确的植被光合状态信息^[33]。通过 *GOSAT* 和 *GOME-2* 等卫星遥感数据反演的日光诱导叶绿素荧光 (solar-induced fluorescence, *SIF*) 信息,从植被荧光释放与光合作用关系的角度,尝试优化和发展植被生产力模型、动态植被模型和过程机理模型。这一方法也取得了良好的效果,并在一定程度上提高了全球植被生产力的模拟精度^[34-36]。但是,大尺度的 *SIF* 产品在空间分辨率和时间分辨率上都无法与地面通量观测站的小尺度验证数据进行印证,难以在景观和区域尺度上表征植被光合效率和能力的动态变化特征。因此,针对植被的 *SIF* 信息开展小尺度超高光谱观测,并结合 *PRI* 观测数据,将能够提供更加完整的光合生理变化信息,进一步提高植被光合动态变化的监测效果。

参考文献(References):

- [1] 朱文泉,陈云浩,徐丹,等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300. [ZHU W Q, CHEN Y H, XU D, et al. Research progress on the calculation model of net primary productivity of terrestrial vegetation. *Journal of Ecology*, 2005, 24(3): 296-300.]
- [2] 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.
- [3] TURNER D P, URBANSKI S, BREMER D, et al. A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 383-395.
- [4] GRACE J, NICHOL C, DISNEY M, et al. Can we measure terrestrial photosynthesis from space directly, using spectral reflectance and fluorescence. *Global Change Biology*, 2007, 13(7): 1484-1497.
- [5] KRAUSE G H, WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42: 313-349.
- [6] GAMON J A, PENUÉLAS J, FIELD C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(1): 35-44.
- [7] RASCHER U, NICHOL C J, SMALL C, et al. Monitoring spatio-temporal dynamics of photosynthesis with a portable hyperspectral imaging system. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(1): 45-56.
- [8] NAKAJI T, KOSUGI Y, TAKANASHI S, et al. Estimation of light-use efficiency through a combinational use of the photochemical reflectance index and vapor pressure deficit in an evergreen tropical rainforest at Pasoh, Peninsular Malaysia. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 150: 82-92.
- [9] SOUDANI K, HMIMINA G, DUFRÊNE E, et al. Relationships between photochemical reflectance index and light-use efficiency in deciduous and evergreen broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 144(1): 73-84.
- [10] 于泉洲,王绍强,黄昆,等. 基于 hyperion 高光谱数据的温带森林不同冠层结构的光谱特征分析. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(7): 1980-1985. [YU Q Z, WANG S Q, HUANG K, et al. Spectral characteristics of different canopy structures in temperate forest based on hyperion hyperspectral data. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(7): 1980-1985.]
- [11] TREITZ P M, HOWARTH P J. Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems. *Progress in Physical Geography*, 1999, 23(3): 359-390.
- [12] 吴朝阳,牛铮. 基于辐射传输模型的高光谱植被指数与叶绿素浓度及叶面积指数的线性关系改进. 植物学报, 2008, 25(6): 714-721. [WU C Y, NIU Z. Linear relationship between hyperspectral vegetation index and chlorophyll concentration and leaf area index improved based on radiation transfer model. *Chinese Bulletin of Botany*, 2008, 25(6): 714-721.]
- [13] BROGE N H, LEBLANC E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76

- (2): 156-172.
- [14] PRIVETTE J L, MYNENI R B, KNYAZIKHIN Y, et al. Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 232-243.
- [15] 刘洋, 刘荣高, 陈镜明, 等. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望. *地球信息科学学报*, 2013, 15(5): 734-743. [LIU Y, LIU R G, CHEN J M, et al. Current status and perspectives of leaf area index retrieval from optical remote sensing data. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(5): 734-743.]
- [16] 王春林, 于贵瑞, 周国逸, 等. 鼎湖山常绿针阔叶混交林 CO₂ 通量估算. *中国科学: 地球科学*, 2006, 36(S1): 119-129. [WANG C L, YU G R, ZHOU G Y, et al. CO₂ flux estimation of evergreen needle broad-leaved mixed forest in Dinghu Mountain. *Scientia Sinica Terrae*, 2006, 36(S1): 119-129.]
- [17] GRECO S, BALDOCCHI D D. Seasonal variations of CO₂ and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 183-197.
- [18] REICHSTEIN M, FALGE E, BALDOCCHI D, et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 2005, 11(9): 1424-1439.
- [19] LIU L Y, GUAN L L, LIU X J. Directly estimating diurnal changes in GPP for C₃ and C₄ crops using far-red sun-induced chlorophyll fluorescence. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 1-9.
- [20] 江东, 王乃斌, 杨小唤, 等. 吸收光合有效辐射的时序变化特征及与作物产量的响应关系. *农业系统科学与综合研究*, 2002, 18(1): 51-54. [JIANG D, WANG N B, YANG X H, et al. The time-series variation characteristics of absorption of photosynthetic effective radiation and its response to crop yield. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2002, 18(1): 51-54.]
- [21] SELLERS P J, TUCKER C J, COLLATZ G J, et al. A global 1-degrees-by-1-degrees NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(17): 3519-3545.
- [22] ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, 1973, NASA SP-351 I, 309-317.
- [23] WONG C, 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.
- [24] WONG C, GAMON J A. Three causes of variation in the Photochemical Reflectance Index (PRI) in evergreen conifers. *New Phytologist*, 2015, 206(1): 187-195.
- [25] GAMON J, KOVALCHUCK O, WONG C, et al. Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. *Biogeosciences*, 2015, 12(13): 4149-4159.
- [26] HALL F G, HILKER T, COOPS N C. Data assimilation of photosynthetic light-use efficiency using multi-angular satellite data: I. Model formulation. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 301-308.
- [27] HILKER T, HALL F G, TUCKER C J, et al. Data assimilation of photosynthetic light-use efficiency using multi-angular satellite data: II. model implementation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 287-300.
- [28] ZHANG Q, JU W, CHEN J M, et al. Ability of the photochemical reflectance index to track light use efficiency for a sub-tropical planted coniferous forest. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 16938-16962.
- [29] 李焱沐, 王绍强, 钱钊晖, 等. 亚热带针阔混交林光化学植被指数与光能利用效率关系研究. *地理研究*, 2017, 36(11): 2239-2250. [LI Y M, WANG S Q, QIAN Z H, et al. Investigating the relationship between Photochemical Reflectance Index (PRI) and Light-use Efficiency (LUE) during different seasons in a subtropical needle-leaf and broadleaf mixed forest. *Geographical Research*, 2017, 36(11): 2239-2250.]
- [30] HILKER T, COOPS N C, SCHWALM C R, et al. Effects of mutual shading of tree crowns on prediction of photosynthetic light-use efficiency in a coastal douglas-fir forest. *Tree Physiology*, 2008, 28(6): 825-834.
- [31] WU C Y, HUANG W J, YANG Q Y, et al. Improved estimation of light use efficiency by removal of canopy structural effect from the Photochemical Reflectance Index (PRI). *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 199: 333-338.
- [32] 王景旭, 丁丽霞, 程乾. 湿地植被叶面积指数对光化学指数和光能利用率关系的影响: 基于实测数据和 prospect-sail 模型. *自然资源学报*, 2016, 31(3): 514-525. [WANG J X, DING L X, CHENG Q. Research on the effect of wetland vegetation lai on the relationship between LUE and PRI by in situ data and PROSPECT-SAIL model. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(3): 514-525.]
- [33] ALONSO L, WITTENBERGHE S V, AMORÓS-LÓPEZ J, et al. Diurnal cycle relationships between passive fluorescence, PRI and NPQ of vegetation in a controlled stress experiment. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 770. doi: 10.3390/rs9080770.
- [34] DAMM A, ELBERS J, ERLER A, et al. 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.

- [35] ZARCO-TEJADA P J, MORALES A, TESTI L, et al. 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.
- [36] ZHANG Q, CHENG Y-B, LYAPUSTIN A I, et al. Estimation of crop Gross Primary Production (GPP): Faparchl versus MOD15A2 FPAR. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 153: 1-6.

Assessing canopy structure effect on the estimation of light-use efficiency in a subtropical evergreen forest

QIAN Zhao-hui^{1,2}, WANG Shao-qiang^{1,2}, ZHOU Guo-yi³, ZHANG Lei-ming^{1,2}, MENG Ze³

(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. Collaege 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)

Abstract: Remote sensing is an effective method to assess Light-use Efficiency (LUE) by using Photochemical Reflectance Index (PRI) at leaf level. But when extending this approach to canopy level, we found that the structure of forest canopy is one of the factors that influence the estimation accuracy of *LUE*. This study calculated the *PRI*, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI) and Modified Simple Ratio (MSR) respectively, using the spectral reflection data from the spectro-radiometer at the Dinghu Mountain Forest Ecosystem Research Station in Guangdong, southern China. We compared and analyzed the influence of different canopy structural vegetation indexes (*NDVI*, *EVI* and *MSR*) on *PRI* used to track *LUE* as measured by eddy covariance at the canopy level. A multivariate linear regression model was built to improve the fitting accuracy of *LUE* seasonal dynamics in this subtropical evergreen forest. The results show that: (1) Canopy structural vegetation index of subtropical evergreen forest has a significant correlation with *PRI* at canopy scale, and the correlation between *MSR* and *PRI* was the strongest ($R^2=0.40$, $P<0.01$); (2) The estimation accuracy of *LUE* is better when high *NDVI* and *MSR* are observed because of larger canopy density and higher *LAI*; (3) Multivariate regression model between *LUE* and *PRI* constructed by *NDVI*, *EVI* and *MSR* improves the estimation accuracy of *LUE* by 18.14% in the observation period, and 54% from January to May. The *LUE* estimation method modified by the canopy structure can improve assessment of *LUE* in the light-use efficiency model, and the ability of remote sensing to accurately assess subtropical evergreen forest productivity.

Keywords: canopy structure; subtropical evergreen forest; light-use efficiency; spectral observation