

小麦生长过程中光能利用率和光化学 反射指数的相关性研究*

吴朝阳^{1,2}, 牛铮¹, 汤泉^{1,2}, 黄文江³

(1 中国科学院遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘 要:以不同品种的小麦为材料,同时测量小麦生长过程的光谱反射率和光能利用率,研究了小麦整个生长期内光化学反射指数和光能利用率之间的关系变化,讨论二者之间关系的时间效应.实验结果表明,对小麦的整个生长期,光化学反射指数并不能作为估算光能利用率的一个有效指数.由于叶片叶绿素含量和叶面积指数的影响,在小麦的生长初期和末期,光化学反射指数和光能利用率之间的相关性不高,相关系数 R^2 分别为 0.222 4 和 0.210 6.对于小麦生长力旺盛的阶段,光化学反射指数可以作为估算光能利用率的一个可行方法,能够获得一定准确度的光能利用率,相关系数 R^2 分别为 0.612 7、0.641 2 和 0.601 1.

关键词:光化学反射指数;光能利用率;叶绿素;叶面积指数;小麦

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)01-0138-6

0 引言

光能利用率(LUE Light use efficiency)是估算净初级生产力(NPP Net primary productivity)的一个关键变量.获取可靠准确度的光能利用率对研究能量的分布以及全球环境的变化有着重要的意义^[1].高光谱技术的出现为精确获取提供了一种更可靠、迅速的方法,可以获取地表参量,特定地面目标等等^[2-4].科学家建立了很多植被指数来研究植被的各种生化组分.在这些植被指数中,应用最广泛的是归一化植被指数(NDVI Normalized difference vegetation index),这一指数成功地应用于获取准确的叶片氮元素含量(N_c)、叶绿素浓度以及光合有效辐射吸收比等等^[5-6],但对光能利用率的估算却无能为力.光能利用率可以很快的发生变化,同一植物同一叶片不同位置和时间的光能利用率都会不同,但归一化植被指数短时间内不会发生较大变化.光化学反射指数(PRI Photochemical reflectance index)的定义为 531 nm 和 570 nm 处反射率的归一化植被指数.这两个波段位置的反射率受到叶黄素循环的影响并和叶片的光能利用率密切相关.因此光化

学反射指数为估算叶片的光能利用率提供了一种有效的方法.当入射光强超过光合作用能够使用的能量时,就会引起叶黄素从环氧化状态转变为脱环氧化状态来散失热量以保护光合器官^[8-9],因而导致光能利用率的变化.

很多研究探讨了光化学反射指数和光能利用率的关系,这些研究表明光化学反射指数和 $\Delta F/F_m'$ (一个基于荧光的指数,可以用来反映光合作用 PS II 的利用效率^[10])以及光能利用率在叶片^[11]、冠层^[12]以及景观尺度^[13]上都能建立很好的相关关系.目前,更多的研究精力关注于各种干扰因素对建立光化学反射指数和光能利用率关系的影响,这些因素包括叶片水分含量、二氧化碳浓度等等^[14-15].Barton 和 North (2001)^[16]对影响冠层光化学反射指数的干扰因素做出了定量的研究,这些干扰因素包括太阳天顶角、观测天顶角、叶面积指数(LAI Leaf area index)、叶倾角分布(LAD Leaf angle distribution)以及土壤类型等等.在冠层内部性质保持不变的情况下,随着观测天顶角的变化光化学反射指数会发生很大的变化,并且同时也受到土壤类型和不同叶倾角分布的强烈影响.Guo 和 Trotter (2006)^[14]指出只有当光合作用 II 和 CO_2 固定的效率经过调整时,光化学反射指数和光能利用率的关系才成立.Nakaji 等(2006)^[17]研究了日本落叶松的光能利用率和光化学反射指数的季节性变化后指出,光化学反射指数和光能利用率的关系并不能一直存在,因此,光能利用率的准确变化信息不能仅通

* 国家重点基础研究发展计划(2007CB714406)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-313)和遥感科学国家重点实验室科研基金(KQ060006)资助

Tel: 13488752199 Email: hefery@163.com

收稿日期: 2007-07-17

过光化学反射指数来获取,其他的参量比如叶片的色素浓度或者归一化植被指应该同时被引入,以此更好地捕捉光能利用率的变化信息。

以往的研究通常只关注的是光化学反射指数和光能利用率在单一时间内的相关关系,而对于整个时间序列的研究却很少。但是在估算净初级生产力的过程中,时间因素是非常重要的,因此获取与时间相关的光能利用率就更有实际意义。本文实验选取了小麦生长全过程作为研究的时间区间,对整个过程中的光化学反射指数和光能利用率关系进行了分析,以此为利用光化学反射指数估算光能利用率的实际应用提供必要的参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于国家农业信息化工程技术研究中心的小汤山国家精细农业实验基地(40°10.6'N, 116°26.3'E)。实验基地属于温带气候,年平均降水量为 507.7 mm,年平均温度为 13 °C。实验基地于 2001 年建成,主要应用于精细农业方面的实验。本次实验选择的材料是冬小麦(*Triticum aestivum* L.),是我国主要的农作物之一。小麦种植于有机土壤中,土壤表面 0~30 cm 的主要成分如下:有机质:1.42~1.48%;总氮量:0.081~0.100;铵态氮:58.6~68.0 mg/kg;有效磷:20.1~55.4 mg/kg;有效钙:7.6~29.1 mg/kg。

1.2 实验样品

实验中供选择了不同叶片形状和叶色的 6 种小麦,叶片形状主要包括竖直型、中间型和披散型三种;叶色主要包括深绿和淡绿两种,见表 1。

表 1 实验样本选择信息

编号	名称	叶片形状	叶色
1	莱州 3729	竖直型	深绿
2	超优 66	中间型	深绿
3	林抗 2	披散型	深绿
4	京 8	中间型	深绿
5	京 411	竖直型	淡绿
6	9507	披散型	淡绿

1.3 地面测量数据

实验时间从 2007 年 4 月初至 5 月底,分别是 4 月 3 日、4 月 17 日、4 月 28 日、5 月 16 日和 5 月 29 日。天气晴朗,分别测量了各小麦样本的反射率和光能利用率,进而研究小麦整个生长过程中二者之间关系的变化。

反射率数据获取使用的是 ASD 便携式光谱仪(FS-FR2500, ASD, USA),波长范围从 380~2500 nm,采样间隔为 1 nm,视场角 25°,垂直测量,距离地面

约 130 cm。实验中使用的参考板为 99% 的朗伯体白板(Labsphere, Inc., North Sutton, New Hampshire, USA)。每种样本选取了 10 个均匀分布采样点,每个采样点测量 10 次,取平均值作为反射率计算以消除偶然误差。光化学反射指数的获取方法如式(1)。

$$PRI = \frac{(R_{531} - R_{570})}{(R_{531} + R_{570})} \quad (1)$$

式中 R_{531} 、 R_{570} 分别表示 531 nm 和 570 nm 处的反射率。

净光合速率和外界辐射强度的测量使用的是 LI-6400 便携式的气体分析系统(LI-COR, Inc., Lincoln, Nebraska, USA)。外界辐射由仪器中测量单元中的一个量子传感器获取,并用来计算光能利用率。每个样本选择 10 个采样点,测量叶片选择的规则如图 1。



图 1 叶片的选择原则示意

Fig. 1 Principle of leaf selection in the ground measurements

光能利用率的定义是冠层吸收的每摩尔光合有效辐射中碳的固定量,计算方法为

$$LUE = \frac{P_n}{PPFD} \quad (2)$$

式中, P_n 表示净 CO_2 的固定速率,PPFD (Incident Photosynthetic Photon Flux Density) 代表冠层截获的光合有效辐射。

叶片叶绿素含量获取的标准方法分为两步,首先是色素的提取:取新鲜叶片,剪去粗大的叶脉并剪成碎块,称取 0.5 g 放入研钵中加纯丙酮 5 mL,少许碳酸钙和石英砂,研磨成匀浆,将匀浆转入量筒中,并用适量 80% 丙酮洗涤研钵,用 80% 丙酮定容至 10 mL,吸取 2.5 mL 加入有 10 mL 80% 丙酮的量筒中;然后是测定光密度,取上述色素提取液 4 mL,转入比色杯中,以 80% 丙酮为对照,分别测定 663 nm、645 nm 处的光密度值,进而根据已有的公式计算叶片的叶绿素含量^[18]。

叶面积指数的获取使用的是冠层分析仪 LAI-2000 (LI-COR, Inc., Lincoln, Nebraska, USA),每个小麦样区测量 10 次,取平均值作为分析。

2 结果和分析

2.1 光化学反射指数和光能利用率之间的关系

光化学反射指数估算光能利用率的原理在于,当叶片接收到的光强超过光合作用需要的光强时,

就会引起叶片内部叶黄质由环氧化状态转变为脱环氧化状态来散失热量以保护光合器官,这一过程和PSⅡ密切相关,因而光化学反射指数可以作为光能利用率的一种估算方式.本次实验中选择了不同品种的小麦,对其整个生长过程进行研究,考察光化学反射指数和光能利用率之间的关系状况.

从整个生长过程来看,光化学反射指数和光能利用率之间的相关关系不够稳定,尤其是对4月3日和5月29日的实验数据,相关系数 $R^2=0.2224$ 和 0.2106 .这两个实验时间对应的为小麦的生长初

期和末期.对小麦生长中期的数据分析表明,光化学反射指数估算光能利用率的准确度有了较大的提高,相关性很好, R^2 分别为 0.6127 、 0.6412 和 0.6011 .这一结果表明,在小麦的生长中期,光化学反射指数可以作为光能利用率的一个有效估算方式,但是对小麦生长的前期和末期,光能利用率的估算准确度不高,即利用光化学反射指数估算光能利用率的普适性还有待提高.整个生长期光化学反射指数和光能利用率的关系如图2.

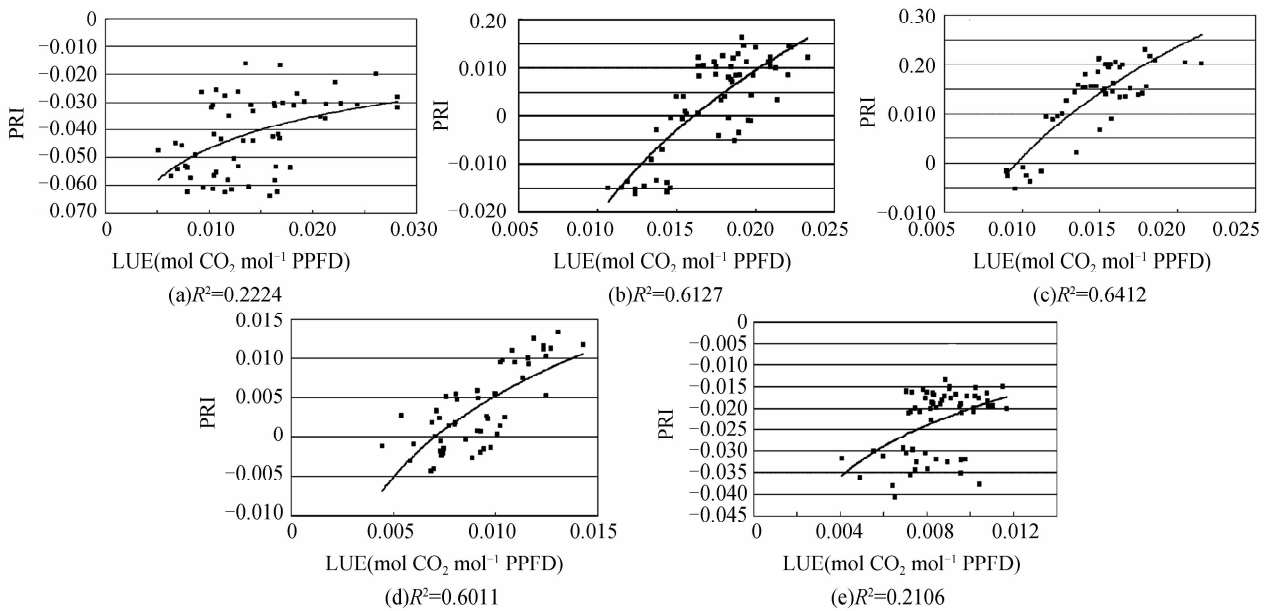


图2 小麦整个生长期光化学反射指数和光能利用率的关系(A、B、C、D、E分别对应为4月3日、4月17日、4月28日、5月16日和5月29日5次实验时间)

Fig. 2 Relationship between PRI and LUE in the whole duration of wheat. A, B, C, D and E represent for the five experiment days

2.2 影响光化学反射指数和光能利用率关系的因素

影响光化学反射指数和光能利用率之间的关系很多, Barton 和 North(2001)对这方面已经做出了一定的研究,主要是分析了冠层尺度各因素对光化学反射指数的影响.从本文的实验分析来看,影响光化学反射指数和光能利用率的主要因素集中于叶片叶绿素含量和叶面积指数两个方面,分别属于叶片尺度和冠层尺度.这些因素对光化学反射指数和光能利用率之间关系的影响往往并不是独立的,通常是共同作用的结果,但对于某一特定阶段,总存在着主要的影响因素.因此以下对小麦生长阶段的主要因素进行分析.

2.2.1 叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是叶片内部的主要色素之一,并且叶绿素含量对植物光合作用的强弱起到决定性的作用.叶片内部叶绿素的含量是植被整个生长状况的一个很好的指标.有着生长潜力的健康植被往往叶绿素

含量较高,因此,叶绿素含量可以用来研究植物的环境胁迫和营养状况.

当叶绿素含量过低,叶片光合作用的能力下降,进而影响到光能利用率.所以当叶片内部叶绿素含量过低时,可能会造成光化学反射指数和光能利用率之间关系的削弱.同时光化学反射指数由531 nm和570 nm处的反射率构成,531 nm处的反射率只受到叶绿素含量的影响,而570 nm处的反射率除受叶绿素影响之外,还受到胡萝卜素的影响.因此光化学反射指数测量了这两个波段之间反射率的相对差值,叶绿素含量越低,这两个波段为反射率的差异越小,进而造成光化学反射指数和光能利用率之间关系的变化.这是造成图2(e)中光化学反射指数和光能利用率相关性降低的主要原因.具体各实验时间的叶绿素含量如表2.从表中可以看出,小麦生长中期叶绿素含量较高,此时利用光化学反射指数估算光能利用率的准确度也较高;当小麦快成熟时,叶绿素含量下降,光化学反射指数和光能利用率之间

的关系减弱。

表 2 各实验期小麦样本的叶绿素含量

样本	叶绿素含量 (mg/g)				
	4月3日	4月17日	4月28日	5月16日	5月29日
1	2.479 8	2.235 2	2.807 2	2.985 0	0.413 0
2	2.177 6	1.904 5	2.532 0	2.623 6	0.569 1
3	1.868 4	1.992 9	2.465 1	2.319 4	1.144 0
4	2.283 8	1.626 0	2.565 2	3.388 0	1.450 6
5	2.284 0	2.052 5	2.513 8	2.032 4	0.487 7
6	2.158 0	1.851 4	2.108 9	2.794 3	0.422 0

为了证实叶绿素含量对光能利用率的影响,文中对不同品种小麦的光能利用率也进行得细致地分析.选取了各品种小麦每次实验的平均值为参考,研究光能利用率和叶绿素之间的关系,如图 3.从图中可以看出,随着小麦的生长,叶片的叶绿素含量增加,光能利用率增大.光能利用率和叶绿素具有明显的正相关关系,相关系数 R^2 为 0.445 5,各品种小麦的光能利用率都具有类似的特征。

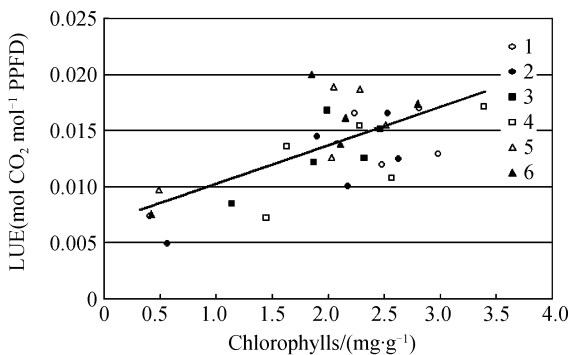


图 3 整个生长期各品种小麦的光能利用率变化和叶绿素之间的关系

Fig. 3 Relationship between LUE and chlorophylls for different types of wheat in the growth duration

2.2.2 叶面积指数的影响

叶面积指数主要造成对冠层反射率的影响,进而影响光化学反射指数的分布.叶面积指数的定义为单位地表面积上方叶面面积的总和,反映了叶片的密集程度,是反应生物量的一个重要参量.叶面积指数是影响光化学反射指数和光能利用率之间相关关系的一个重要因素,主要原因是由于叶面积指数变化造成的冠层背景的影响程度不同.当叶面积指数较小时,意味着更多的背景(非冠层信息)可见,这时,背景反射率就会对光化学反射指数产生影响.通常情况下,土壤的光化学反射指数值低,一般在 -0.2 上下;叶片的光化学反射指数值高,一般在 -0.11 到 0.12 ,因此背景的影响直接导致整个冠层光化学反射指数值被拉低,一般在 -0.20 到 -0.11 .当叶面积指数增大时,光化学反射指数增大,主要是因为叶面积指数越大,意味着叶片越多,整个冠层更多表现出的是由绿色叶片贡献的

光化学反射指数,因此光化学反射指数值迅速增加。

从图 2 中可以看出,对于 4.3 日的反射率数据,光化学反射指数的范围为 $-0.07 \sim -0.01$,总体比较低,主要就是因为叶面积指数较低的原因.随着小麦的生长,叶面积指数迅速增大,背景的影响减小,此时光化学反射指数也随之增大,这一点从图 2 中的(a)、(b)、(c)可以看出.部分采样点的光化学反射指数值都大于 0,这主要是由于单叶叶片面积增加导致叶面积指数增大的影响.当小麦处于生长末期的时候,由于叶片已经不能进行较强的光合作用,叶片的养分不断转移到穗部,叶片逐渐衰老,植株下部的叶片逐渐枯黄,叶面积指数降低,背景的影响增大,因而图 2(e)中光化学反射指数值又下降为负值。

实验中每次测量时间和小麦样本的叶面积指数如图 4.总体而言,叶面积指数随着小麦的生长先增大,在 4 月 28 日左右达到最大值,然后下降.4 月 3 日的叶面积指数最小,此时反射率受到地面背景的影响明显,因而整体的光化学反射指数值较低,这是造成图 1(a)中光化学反射指数和光能利用率之间相关关系差的主要原因。

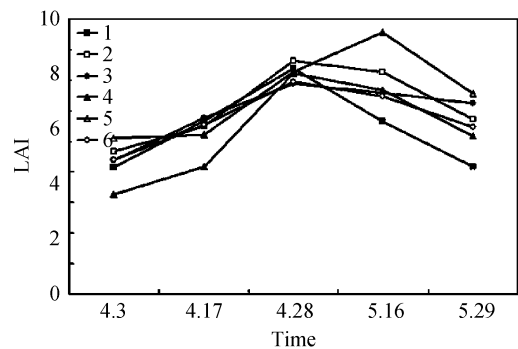


图 4 不同生长期各品种小麦的叶面积指数变化
Fig. 4 LAI for different types of wheat in each growth stages

3 结论

光化学反射指数为估算光能利用率提供了一种快速和准确的方法,为在此基础上估算植被净初级生产力模型的改进提供了可能.由于光化学反射指数考虑了更多因素的影响,如叶绿素浓度、观测时间、叶面积指数、太阳和传感器之间的几何关系等,因此可以避免以往通过以温度和水分对最大光能利用率的胁迫来求取实际光能利用率的不足,进而提高光能利用率的估算准确度.然而,任何方法都存在一定的不足和值得改进的方面.本文通过对不同品种小麦在整个生长期内的光化学反射指数和光能利用率的关系研究,一方面证实了光化学反射指数作为光能利用率估算方法的可行性,另一方面也反映

了光化学反射指数在时间效应上的不足,即对整个小麦的生长期,光化学反射指数并不能准确反映实际光能利用率的变化.对小麦生长的初期,由于叶面积指数较小,背景的影响明显,光化学反射指数更多的是反映了整个背景的信息,因此影响了光化学反射指数和光能利用率之间的关系,进而会造成光能利用率估算的较大误差.在小麦生长的末期,由于叶片内部叶绿素含量的降低,造成了光能利用率的下降,因而削弱了光化学反射指数和光能利用率之间的关系.对于小麦生长的旺盛期,光化学反射指数估算光能利用率的准确度很高,相关系数分别是0.6127、0.6412和0.6011.

今后的研究需要更多的关注于光化学反射指数作为光能利用率估算形式的普适性.通过引入更精确的模型和参量,如叶片色素和叶面积指数的信息,对光化学反射指数做出必要的修正和改进,不断提高光能利用率的估算准确度,为精准农业和田间管理提供更多的参考信息.

参考文献

- [1] ADAMS J M, FAURE H, FAURE-DENARD L. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial Maximum to the present[J]. *Nature*, 1990, **348**: 711-714.
- [2] DU Pei-jun, FANG Tao, TANG Hong, *et al.* Spectral features extraction in hyperspectral RS data and its application to information processing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 293-298.
杜培军, 方涛, 唐宏, 等. 高光谱遥感信息中的特征提取与应用研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 293-298.
- [3] LÜ Qun-bo, XIANG-LI Bin, XUE Bin, *et al.* Endmember determination in hyperspectral data [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 1336-1339.
吕群波, 相里斌, 薛彬, 等. 高光谱图像中纯光谱提取方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 1336-1339.
- [4] XUN Li-na, FANG Yong-hua. Target detection in hyperspectral images using projection pursuit [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(10): 1584-1588.
寻丽娜, 方勇华. 基于投影寻踪的高光谱图像目标检测算法[J]. *光子学报*, 2006, **35**(10): 1584-1588.
- [5] GAMON J A, FIELD C B, GOULDEN M L. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types [J]. *Ecological Applications*, 1995, **5**: 28-41.
- [6] JUSTICE C O, VERMOTE E, TOWNSHEND J R G. The moderate resolution imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(4): 1228-1249.
- [7] GAMON J A, PENUELAS J, FIELD C B. A narrow waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **41**(1): 35-44.
- [8] DEMMING - ADAMS B, ADAMS B. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis [J]. *Trends in Plant Science*, 1996, **1**(1): 21- 26.
- [9] DEMMING - ADAMS B, GILMORE A M, ADAMS WW (1996) In vivo functions of carotenoids in higher plants[J]. *ASEB Journal*, 1996, **10**: 403-412.
- [10] MEHTHY M. A two-channel hyperspectral radiometer for the assessment of photosynthetic radiation-use efficiency [J]. *J agric Engng Res*, 2000, **75**(1): 107-110.
- [11] GAMON J A, SERRANO L, SURFUS J S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthesis radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels[J]. *Oecologia*, 1997, **112**: 492-501.
- [12] PENUELAS J, LLUSIA J, PINAOL J, *et al.* Photochemical reflectance index and leaf photosynthetic radiation-use-efficiency assessment in Mediterranean trees [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**(13): 2863-2868.
- [13] PENUELAS J, INOUE Y. Reflectance assessment of canopy CO₂ uptake[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**(17): 3353-3356.
- [14] GUO J M, TROTTER C M. Estimating photosynthetic light-use efficiency using the photochemical reflectance index: the effects of short-term exposure to elevated CO₂ and low temperature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(20): 4677-4684.
- [15] INOUE Y, PENUELAS J. Relationship between light use efficiency and photochemical reflectance index in soybean leaves as affected by soil water content [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(22): 5109-5114.
- [16] BARTON C V M, NORTH P R J. Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index Model and sensitivity analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **78**(3): 264-273.
- [17] NAKAJI T, OGUMA H, FUJINUMA Y. Seasonal changes in the relationship between photochemical reflectance index and photosynthetic light use efficiency of Japanese larch needles [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(3): 493-509.
- [18] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenoloxidase in beta vulgaris[J]. *Plant Physiology*, 1949, **24**: 1-15.

Relationship Between Photochemical Reflectance Index and Light Use Efficiency in Growth Duration of Wheat

WU Chao-yang^{1,2}, NIU Zheng¹, TANG Quan^{1,2}, HUANG Wen-jiang³

(1 *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China*)

Received date: 2007-07-17

Abstract: Different types of wheat were selected to study the time effect on relationship between photochemical reflectance index and light use efficiency in the whole growth duration. The results prove that photochemical reflectance index is not a feasible index of light use efficiency in the growth duration of wheat. There is not an obvious relationship between photochemical reflectance index and light use efficiency in the early and mature stage of wheat because of influences of chlorophyll contents and leaf area index; regression coefficients R^2 are 0.222 4 and 0.210 6 respectively. For the stages with maximum growth capabilities, photochemical reflectance index has provided a reliable method in estimating light use efficiency with regression coefficients R^2 of 0.612 7, 0.641 2 and 0.601 1 respectively. Therefore, other parameters should be introduced to improve the feasibility of PRI and enhance the precision of LUE estimation.

Key words: Photochemical reflectance index; Light use efficiency; Chlorophyll contents; Leaf area index; Wheat



WU Chao-yang was born in 1982. He received the B. S. degree from China University of Geoscience of Beijing in 2005. Now he is pursuing the Ph. D. degree at Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences. His research work focuses on vegetation remote sensing.