

文章编号: 1007-4619(2005)06-0742-09

光谱指数用于叶绿素含量提取的评价及一种改进的农作物冠层叶绿素含量提取模型

颜春燕¹, 牛 铮¹, 王纪华², 刘良云², 黄文江²

(1. 中国科学院 遥感信息科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100089)

摘 要: 对目前提出的光谱指数用以提取叶片叶绿素含量的适应性进行了分析和评价。通过分析, 解释了为什么研究者得出这些指数与他们的观测样本叶绿素含量有显著的相关的结论以及为什么某个研究者提出的某个指数和叶绿素含量间的关系用于其他样本时会失效。此外, 改进了一个农作物冠层叶绿素含量的提取模型, 通过独立实测数据验证, 效果较好, 认为是可以用于其他地区农作物叶绿素含量提取的模型。

关键词: 叶绿素含量; 光谱指数

中图分类号: TP701/TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

植被叶绿素含量是其胁迫状态的一个重要指示因子, 在生态系统的功能中具有重要作用。利用遥感提取植被叶绿素含量的研究方法有 3 种。最简单的方法是利用多元逐步回归建立植被(叶片, 冠层)的反射率或其一阶导数等变换形式与叶绿素含量间的回归关系, 再将此回归关系应用于其他样本, 这种方法用在控制良好的实验室叶片叶绿素含量提取时效果不错, 但是用在冠层水平时出现了很多问题, 并且后来遭到学者批评^[1], 因为不同的人所选的波段并不相同, 而且对所选波段的物理意义不能给出清楚的解释。

提取冠层叶绿素含量的另一种方法是反演物理模型, 例如 SAIL+PROSPECT。最近几年研究者朝此方向投入了较多精力^[2-5], 因为这种方法被认为是具有明确的物理意义而且具有鲁棒性(robustness)。但是有时, 由于冠层模型的其他参数, 例如 LAI 叶倾角等的敏感性, 使得叶绿素含量难以反演出来, 甚至反演陷入死循环或解出现丢失状况。

遥感提取叶绿素含量的第三个方向是利用光谱指数^[6-12]。这种方法可能是前两种方法的一个折

衷。因为光谱指数建立时考虑了部分植被内部的物理机制, 有一定的物理意义, 并且其算法也比模型反演简单得多。发展和改进新的光谱指数仍然是一个活跃的研究领域^[13-15]。

本文从第 3 种方法入手, 首先从叶片水平对研究者提出的这些光谱指数用以提取叶绿素含量的适应性进行了分析和评价。其次改进了一个农作物冠层叶绿素含量的提取模型, 并通过实测数据进行了验证。

2 光谱指数用于提取植被叶绿素含量

2.1 光谱指数

光谱指数是指某些特定波段的反射率的组合。按照光谱区域和所考虑的参数, 这些具有潜在价值的光谱指数可以分为 4 类^[16, 17]:

(1) 可见光比值指数: $NPCI((R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430}))$; $NPQI((R_{415} - R_{435}) / (R_{415} + R_{435}))$; $PR1^I((R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570}))$; $PR1^2((R_{550} - R_{531}) / (R_{550} + R_{531}))$; $PR1^3((R_{570} - R_{539}) / (R_{570} + R_{539}))$; $SRPI(R_{430} / R_{680})$; $Carter^1(R_{695} / R_{420})$; 绿度指数 $G(R_{554} / R_{677})$ 以及 $Lichtenhaler^1$ (简称为 $Lic1$, (R_{440} / R_{690})); 450nm 到 680nm 反射率下覆盖的面积 $AR = \int_{490}^{680} R;$

收稿日期: 2004-04-15; 修订日期: 2004-07-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900), 中国科学院知识创新工程重大项目——中国陆地和近海生态系统碳收支研究(KZCX1-SW-01)和国家自然科学基金(40271086)资助。

作者简介: 颜春燕(1975—), 女, 中国科学院遥感应用研究所博士毕业, 研究方向: 植被定量遥感, 已发表论文 6 篇。

(2) 可见光/近红外比值指数: $NDVI((R_{774} - R_{677}) / (R_{774} + R_{677}))$; $Lichtenhaler^2$ (简称为 Lic^2 , $(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$), $Lichtenhaler^3$ (简称为 Lic^3 , (R_{440} / R_{740})); $SIPI((R_{800} - R_{450}) / (R_{800} + R_{650}))$; $MCARI((R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550})) * (R_{700} / R_{670})$); $TCARI(3 * ((R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550})) * (R_{700} / R_{670}))$); $SR(R_{774} / R_{677})$; $PSSRa(R_{800} / R_{680})$, $PSSRb(R_{800} / R_{635})$;

(3) 红边反射率植被指数: $Vogelmann^1$ (简称为 Vog^1 , $(R_{734} - R_{747}) / (R_{715} - R_{720})$); $Vogelmann^2$ (简称为 Vog^2 , $(R_{734} - R_{747}) / (R_{715} - R_{726})$); $Vogelmann^3$ (简称为 Vog^3 , (R_{740} / R_{720})); $Gitelson$ 和 $Merzylak$ (1997) 提出的 (简称为 GM , (R_{750} / R_{700})); $Carter^2$ (R_{695} / R_{760}); 曲线指数 $CI(R_{675} * R_{690} / (R_{683}^2))$;

(4) 红边导数指数: $D(D_{715} / D_{705})$; $DPR1(D_{\lambda_p} / D_{\lambda_p+12})$; $DPR2(D_{\lambda_p} / D_{\lambda_p+22})$; $DP21(D_{\lambda_p} / D_{703})$; $DP22(D_{\lambda_p} / D_{720})$; 导数光谱红边下的面积 $AD = \int_{680}^{760} D$.

2.2 光谱指数用于叶片叶绿素含量提取的评价

评价某个光谱指数的有效方法是考察叶片样本叶绿素含量与该指数的相关性。这就需要有大量的范围广泛的样本, 即一个各种类型植被叶片的叶绿素含量与光谱的大型数据库, 限于各种因素, 目前这个条件一般很难达到。因此我们考虑应用某个得到普遍认可的模型, 模拟不同种类叶片、不同叶绿素含量下的叶片光谱, 然后考察它们的光谱指数对叶片种类及叶绿素含量的敏感性。

$PROSPECT^{[18]}$ 是一个基于平板模型的叶片光谱模型, 它表述了植株叶片从 400nm 到 2500nm 的反射率和透过率。叶片 $PROSPECT$ 模型经过验证并得到了广泛应用, 因此我们以 $PROSPECT$ 模型为基础, 通过改变叶绿素含量及其他参数来考察各个光谱指数的表现。

$PROSPECT$ 模型通过一个表征叶片结构的参数 N 和生化组分含量参数来模拟叶片的反射率和透过率。不同种类叶片的 N 有所不同, 因此 N 实际上也代表了叶片种类。在可见光部分, 叶绿素含量和 N 主导了叶片光谱。因此考察某个光谱指数能否可靠的用于叶绿素含量估计, 我们有必要考察随着不同的 N 和叶绿素含量的变化, 某个光谱指数的变化。在这里我们令 N 从 1 到 2, 每隔 0.2 变化, 叶绿素含量从 $0-80 \mu g/cm^2$, 每隔 $5 \mu g/cm^2$ 变化, 模拟了一系列的光谱, 图 1 (绘出了部分图形) 是 2.1 节中列出

的 4 类光谱指数在不同的 N 和叶绿素含量下的变化曲线。

可以看到, 除了指数 $DPR1$ 和 $DPR2$ (只绘出 $DPR1$ 为例) 随着 N 和叶绿素含量的变化显得没有秩序之外, 其他每个指数在任意个 N 和一定的叶绿素含量范围内, 都随着叶绿素含量的变化有单调增或单调减的趋势。因此这解释了为什么研究者得出了这些指数与他们的观测样本叶绿素含量有显著的相关的结论, 因为这种关系与其所使用的观测样本范围有关; 但是在整个叶绿素含量范围 ($0-80 \mu g/cm^2$) 内, 对于多数指数, 这种单调性却不唯一, 因此如果用该指数去预测叶绿素含量就会存在混淆。此外, 我们也可以看到, 大多数的光谱指数在相同的叶绿素含量, 不同的 N 下, 光谱指数值也不相同, 也就是说, 光谱指数估计叶绿素含量受 N 的影响。这一点解释了为什么某个研究者提出的某个指数和叶绿素含量间的关系用于其他样本时会失效。以指数 $NDVI$ 和 $MCARI$ 为例, 可以看到, 在叶绿素含量从 $0-40 \mu g/cm^2$ 的范围内, $NDVI$ 值随着叶绿素含量的增加而增加, 因此, 在这个范围内, 建立 $NDVI$ 和叶绿素含量的回归关系是可能的; 但是当叶绿素含量大于 $40 \mu g/cm^2$ 后, $NDVI$ 呈饱和趋势, 因此如果用 $0-40 \mu g/cm^2$ 范围内建立的回归关系来预测大于 $40 \mu g/cm^2$ 后的叶绿素含量, 显然是不可能的。而对于 $MCARI$ 不仅存在与 $NDVI$ 类似的问题, 而且, 它对于叶片种类也非常敏感, 因此如果用这个指数来建立一个各种植被叶片通用的叶绿素含量提取模型也是不可能的。但是, 对于这两个指数, 建立某个范围内或某种类型叶片叶绿素含量通用关系是可能的。当然, 还应结合具体的问题对待, 比如对于 $NDVI$ 由于其只在 $0-40 \mu g/cm^2$ 范围内对叶绿素含量敏感, 而多数植被多数生长阶段的叶绿素含量均大于这个范围, 因此, 利用 $NDVI$ 建立预测方程通常显然是不可取的。

我们也看到, 在这些光谱指数中, Vog^1 , Vog^2 , Vog^3 , GM , D , $Carter^2$ 和 $DP22$ (本文中只绘出 Vog^3 和 GM 为例) 随着 N 的变化与叶绿素含量的变化单调升或降, 而且比较集中 (也即对 N 敏感性小), 预示着利用这些指数建立一个适合于各种植被叶片的叶绿素含量估计关系是可能的, 但是正如文献 [19] 指出的: 设计一个对于任意某个影响光谱的因子完全敏感, 而对于其他干扰因子完全不敏感的光谱指数是不可能的。这些指数只是对于叶片种类敏感性较弱, 并不代表完全不敏感。因此是建立适于各种叶片叶绿素含量的通用提取关系, 但是准确性降低;

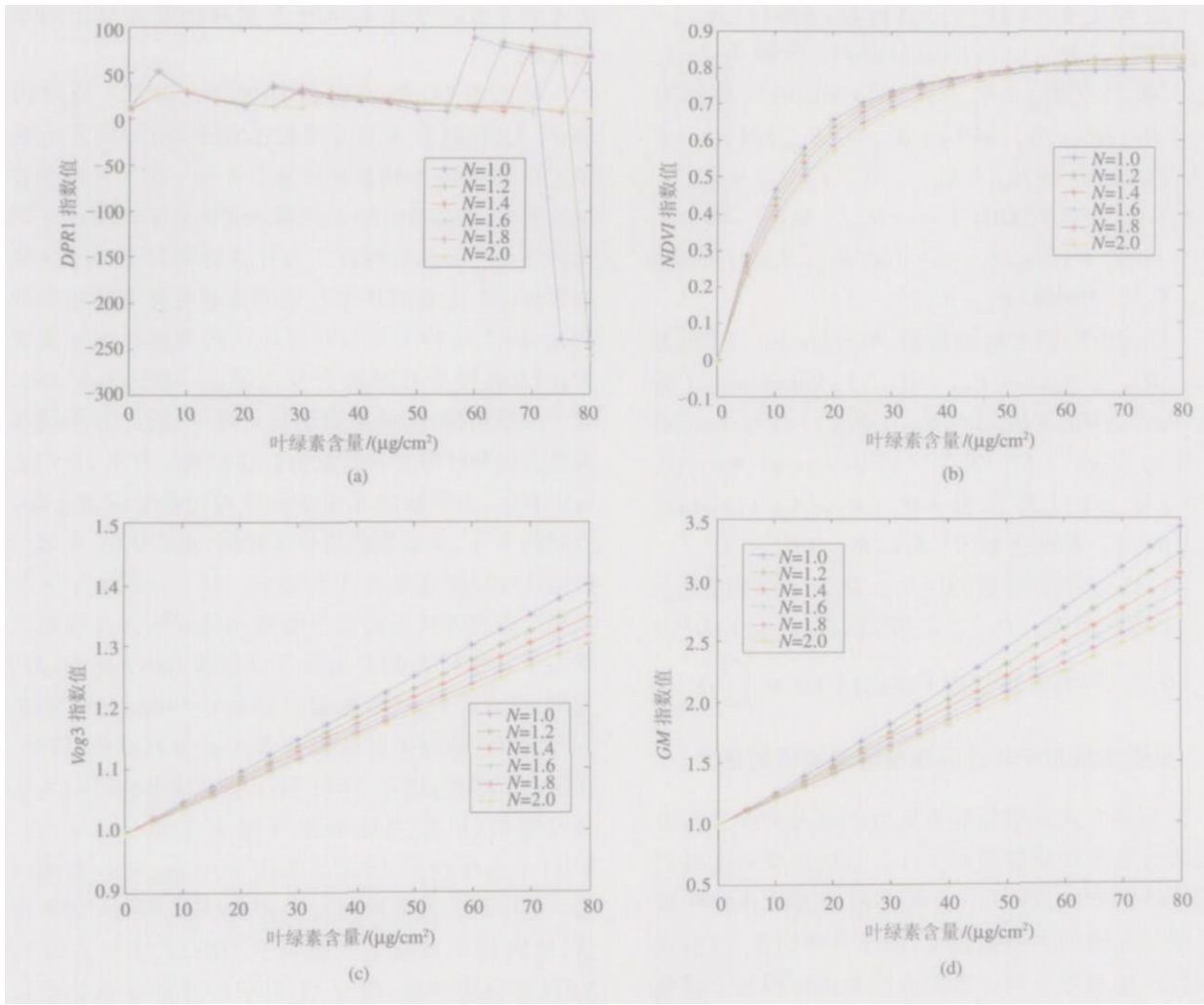


图 1 各个光谱指数随 N 和叶绿素含量的变化

(a), (b), (c), (d) 分别绘出 DPR1, NDVI, Vog3 和 GM 指数的图像

Fig 1 Variation of spectral indices with N and chlorophyll content

还是建立适于某类叶片的叶绿素含量提取关系,但是适用面较窄;这取决于研究者的目的和兴趣。此外,具体应用时,需考虑指数的建立过程及应用目的,例如,指数 D 和 DP22 的建立需要对光谱求导数及红边处的导数值,显然这需要相对连续的光谱,因此对于应用目的,还应考虑能否得到这些光谱范围及光谱分辨率。

2.3 改进的农作物冠层叶绿素含量提取模型

在 2.2 中我们看到在叶片水平,对于研究者提出的各种光谱指数应用于叶绿素含量的提取时,建立一个适用于各种叶片叶绿素含量的提取模型虽然也是可能的,但是,相比较与对应于某类叶片叶绿素含量的提取模型,其准确度必然降低。而到了冠层水平,当研究目标为叶绿素含量时,干扰因子相比较

于叶片水平就更多了,如土壤, LAI 等,企图找到一个适于各种植被冠层的叶绿素含量提取模型是不现实的,因此我们希望能够建立一个适用于某类冠层的提取模型,它要不受下垫面和 LAI 等的干扰。

Haboudane^[14]提出了一个提取农作物冠层叶绿素含量的预测方程。本文中将对他的预测方程做一改进,使其更符合理论和实际。他利用了光谱指数 TCARI 和土壤可调节指数 SAVI 的结合来建立其模型。首先我们来看一看他的方法。

近年来的一些研究发现土壤可调节植被指数 SAVI (soil adjusted vegetation index)^[20]与某个光谱指数结合,能够大大地减小背景的影响。例如 OSAVI (optimized soil adjusted vegetation index)^[21]是一个土壤可调节植被指数。它是冠层 800nm 和 670nm 反射率的一个组合,定义为:

$$OSAVI = \frac{(1 + 0.16)(R_{800} - R_{670})}{R_{800} + R_{670} + 0.16}$$

从 OSAVI 的定义可以看出,相对于其他依赖于一定实际土壤光谱特性的指数而言,它的确定不要任何土壤,或特定场景的信息,而且,对于大部分农作物,它去除土壤背景影响的效果也是最好的。

那么,将某个光谱指数与某个 SAVI 结合,建立与叶绿素含量的普适关系从理论上说是可能的。当然这里的普适也不是万能的,我们在叶片层次看到,光谱指数受叶肉结构 N 的明显影响,而 N 代表了叶片类型,因此这里说的是,建立针对某个 N 或者说是某种植被的普适关系。

光谱指数 TCARI ($TCARI = 3 * ((R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550}) * (R_{700} / R_{670}))$) 是对 MCARI (定义如 2.1) 的一个改进,从叶片层次的讨论可以看到,对于某种植被,MCARI 在叶绿素含量大于 $20 \mu g/cm^2$ 后,随叶绿素含量的增加呈单调减的趋势,而在 $20 \mu g/cm^2$ 以前随叶绿素含量的增加呈单调增的趋

势,也就是说,如果在 $0 - 80 \mu g/cm^2$ 的叶绿素含量范围内,那么 MCARI 与叶绿素含量的关系不确定,某个 MCARI 可能对应了两个叶绿素含量值。MCARI 只适用于预测 $20 \mu g/cm^2$ 以后的叶绿素含量。而 TCARI 在 $10 \mu g/cm^2$ 以后就随叶绿素含量呈单调降的趋势。

下面来分析一下 TCARI 在冠层随叶绿素含量变化的趋势。首先考察在不同的 LAI 下,TCARI 随叶绿素含量的变化关系。同叶片层次一样,为了有大量变化较大的样本,仍然求助于获得普遍应用的冠层光谱模型 SA II^[21]。利用 PROSPECT 和 SA II 模型,模拟了在不同叶绿素含量和叶面积指数 LAI 下 TCARI 的变化。图 2 是 MCARI 和 TCARI 在不同的 LAI 下随叶绿素含量的变化关系。在光谱的模拟中,叶肉结构参数设为 1.4,水分含量不影响可见光部分的光谱,将其设在象征性的值 $0.001 cm$,观测天顶角为 0° ,太阳天顶角为 30° ,相对方位角为 0° ,叶倾角分布为球形 ($ALA = 57.3^\circ$),土壤光谱为实验室测量的多条光谱的平均。

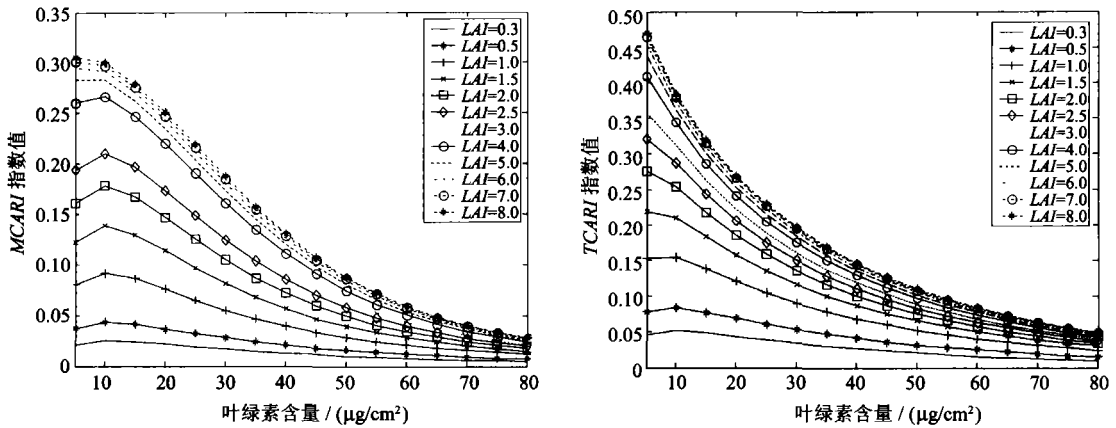


图 2 MCARI 和 TCARI 在不同叶面积指数下和叶绿素含量的关系

Fig 2 Relationship of MCARI and TCARI with chlorophyll content (Cab in the following) under different LAIs

从图中可见, LAI 对于这两个指数与叶绿素含量的关系的影响都非常大。但是,对于 MCARI 的影响比 TCARI 的影响更大。MCARI 在低和中的 LAI (一直到 LAI=2.5) 下对于 LAI 都很敏感,而 TCARI 即使在小的 LAI (LAI=1.5) 下随 LAI 的变化也变化得较小。实际上,当 LAI ≥ 1.5 以后,对于大部分的叶绿素含量范围 ($15 - 60 \mu g/cm^2$), TCARI 随 LAI 的变化都变化得较少,因此比 MCARI 对 LAI 影响的抵抗能力更强。

尽管如此,对于低 LAI 的敏感以及 LAI 和叶绿素含量的交叉作用的问题仍然存在,所以仅用 TCARI 还是不能满足冠层叶绿素遥感的需要,特别

是对于植被生长早期,土壤反射率主导了遥感的观测数据,所以必须以某种方式把土壤影响加以考虑。因此,可以尝试将 TCARI 和 OSAVI 结合以图将 LAI 和土壤背景从叶绿素含量的影响中分离开来。图 3 显示在不同叶绿素含量,不同叶面积指数下 TCARI 和 OSAVI 的分布。

从图 3 可见,不论是 TCARI 还是 OSAVI 都和 LAI 正相关,也就是说,低的 TCARI 和 OSAVI 对应于低的 LAI 反之亦然。因此,那些代表裸露土壤的点将会集中在散点图的原点附近,而密植被将会集中在相反的一侧。而图 3 给出的最重要的信息是叶绿素含量值在 OSAVI-TCARI 空间的分布。对于所有

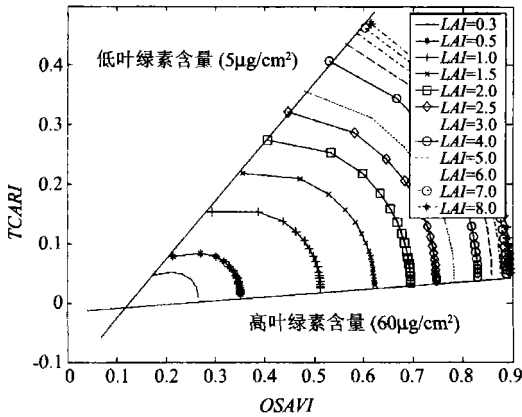


图 3 在不同叶绿素含量,不同叶面积指数下 TCARI和 OSAVI的分布

Fig 3 Distribution of TCARI and OSAVI under different Cab and LAIs

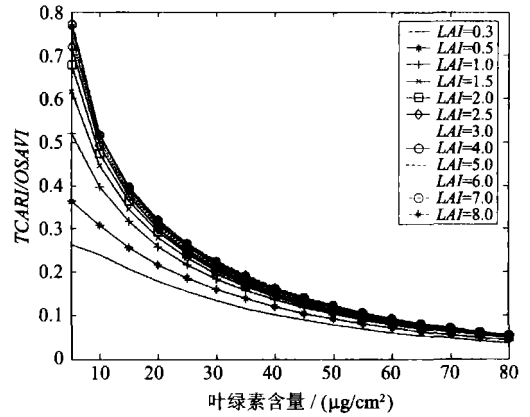


图 4 TCARI/OSAVI和冠层叶绿素含量的关系

Fig 4 Relationship of TCARI/OSAVI with canopy Cab

的覆盖水平 (LAI), 叶绿素含量沿着相同中心的弧线分布, 高的值靠近 x 轴 (OSAVI), 低值靠近 y 轴 (TCARI)。此外, 代表相同叶绿素含量水平而不同 LAI 水平的点沿着以裸露土壤为原点的直线分布。这些叶绿素含量的等值线在散点图的原点附近相交, 并且随着覆盖度 (LAI) 的增加向外辐射。为了看得清楚, 图中只列出了低叶绿素含量值 ($5\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 和高叶绿素含量值 ($60\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 的两条等值线。这个图显示叶绿素含量只和等值线的斜率有关, 而与 LAI 无关, 随着叶绿素含量的增加, 等值线的斜率减小。

这些结果表明, 叶绿素含量和 TCARI 对 OSAVI 的斜率相关。因此, TCARI/OSAVI 的比率同时将土壤和 LAI 的影响进行了考虑, 那么得到叶绿素含量和 TCARI 与 OSAVI 组合的唯一的的关系就成了可能。实际上, 如图 4, TCARI/OSAVI 明显的结合了这两个指数随叶绿素含量变化而变化的优势: 最小化了对于背景和 LAI 的影响。它们的比率明显地减小了对 LAI 的敏感性, 同时保留了对叶绿素含量变化的高敏感性: 它在很宽的 LAI 范围内 (0.3-8) 都与叶绿素含量呈现近似唯一的的关系, 对于叶绿素含量在 $15-60\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的范围内, 这一点表现得尤为明显。

通过以上这些分析, Haboudane 提出了叶绿素含量和 TCARI/OSAVI 之间的一个预测关系式, 如图 5 中所列出, 其中 y 代表叶绿素含量, x 代表 TCARI/OSAVI。认为这可能是一个普适的提取农作物冠层叶绿素含量的关系。

作物的叶绿素含量提取的普适关系具有重要的意义。以往虽然有很多研究者提出了很多关系, 但都是基于自己的样本, 难以推广。

但是我们也发现, 在 Haboudane 建立这个关系的过程中存在某些问题, 本文试图在这一点上做出一些改进。Haboudane 建立的叶绿素含量的提取关系是以 TCARI 和 OSAVI 的简单比值为自变量的一个对数关系。但是实际上, 我们看图 3 中叶绿素含量在 TCARI 和 OSAVI 的空间中的分布, 等值线的斜率与叶绿素含量的大小有关, 这些等值线的交点接近坐标原点, 但并不是原点。Haboudane 的关系的建立隐含着认为这个交点是原点, 或者忽略了其影响。但是, 我们从图中大致找到一个交点, 假设为 $O'(0.11, -0.01)$, 如果假设叶绿素含量是与以 O' 点为原点的直线的斜率相关的, 重新绘出叶绿素含量与 $(\text{TCARI} - (-0.01)) / (\text{OSAVI} - 0.11)$ 的关系, 如图 6。我们看到, 相对于图 5, 图 6 的样本更加集中, 也即对于 LAI 和土壤的影响更加不敏感。因此, 在建立叶绿素含量与 TCARI 和 OSAVI 组合间的关系时, 最好考虑这个交点的影响。当然, 交点 O' 是我们通过图形目视得到的, 实际建模时, 为准确起见, 这个点我们将设为未知数, 通过样本拟合得到。

此外, 根据图 5 和图 6, 从叶绿素含量和 TCARI/OSAVI 的分布来看, 叶绿素含量与 TCARI/OSAVI 的关系以倒数函数的形式更为宜。因此, 综合起来, 我们认为叶绿素含量与 TCARI/OSAVI 的关系应以 (1) 式拟合得到:

$$y = \frac{a'}{\frac{\text{TCARI} - b'}{\text{OSAVI} - c'}} + e \quad (1)$$

Haboudane 的分析无疑对找到一个对应于某种

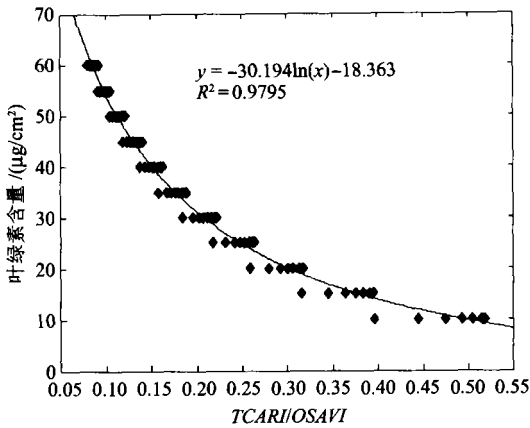


图 5 不考虑交点的冠层叶绿素含量与 TCARI/OSAVI 之间的关系

Fig 5 Relationship of TCARI/OSAVI with canopy Cab not considering the intersected point

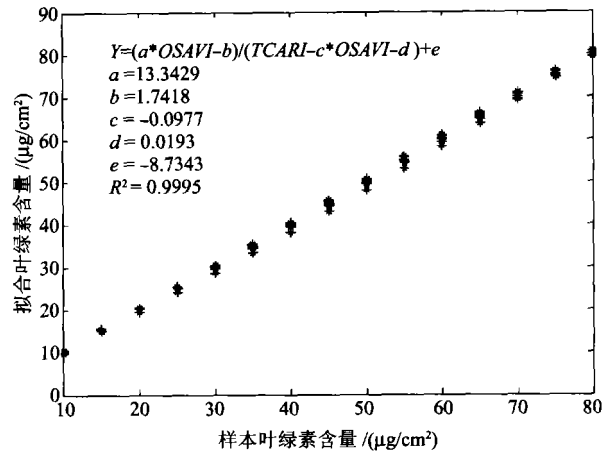


图 7 样本的叶绿素含量与拟合叶绿素含量间的关系及本文提出的冠层叶绿素含量估计模型

Fig 7 Relationship between sample Cab and fitted Cab as well as canopy Cab estimation model given in this paper

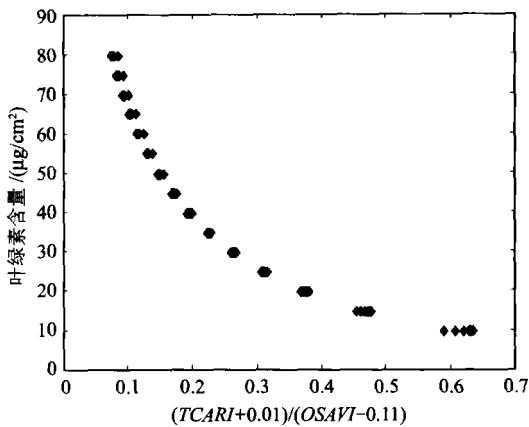


图 6 简单考虑交点后的冠层叶绿素含量与 TCARI/OSAVI 之间的关系

Fig 6 Relationship of TCARI/OSAVI with canopy Cab simply considering the intersected point

其中 y 为叶绿素含量, b' 和 c' 为要找的等值线的交点的纵坐标和横坐标。为方便最小二乘拟合, 将该式化简得到:

$$y = \frac{a \times OSAVI - b}{TCARI - c \times OSAVI - d} + e \quad (2)$$

以 (2) 式的函数形式, 我们重新拟合了叶绿素含量与 TCARI 和 OSAVI 间的回归关系, 图 7 为样本的叶绿素含量与拟合叶绿素含量间的关系, 图中列出了回归关系和对应于 (2) 式中的 a , b , c , d 和 e 。

2.3.2 实测数据的验证

在 2.3.1 中我们利用理论模型模拟的数据改进了一个农作物冠层的叶绿素含量提取模型, 在此节

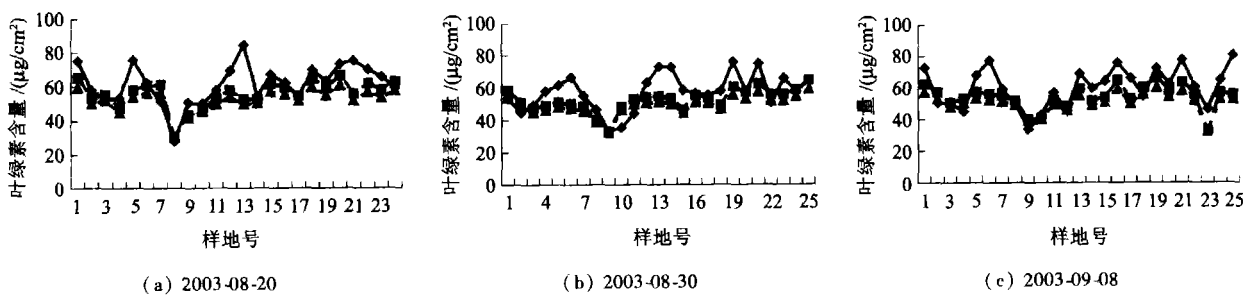
中我们利用实测数据来检验该模型。所用数据为 2003 年 7、8、9 月间在北京市农林科学院获得的玉米冠层光谱和叶绿素含量。该实验测量了不同生长期夏玉米的冠层光谱, 并准同步采样了冠层叶绿素含量。具体的实验设计和测量方法详见参考文献 [23]。

利用 Haboudane (H 方法) 和我们建立的冠层叶绿素含量的提取模型, 对在北京市农林科学院测量的 8 月 20 日, 30 日和 9 月 8 日的玉米冠层光谱数据, 分别提取了各个样点的叶绿素含量, 并与实测值进行了对比。如表 1, 为了直观, 同时绘出了 3 种数据的折线图, 如图 8。

从表 1 和图 8 可见, 利用本文改进的冠层叶绿素含量提取关系提取实测玉米的叶绿素含量无论从估计的叶绿素含量与实测叶绿素含量的相关关系看, 还是估计值与实测值的均方根误差与真实值平均值的比 (RMSE 均值, 代表总体误差) 来看, 本文提出的预测关系都优于 Haboudane 提出的关系。对于这 3 天的估计, 本文提出的预测关系总体估计精度分别为 82.89%, 83.7%, 83.15%, 比 Haboudane 关系的预测效果提高了 4%。由于建模时所用的数据均为理论模型得到的样本, 因此, 本文改进的预测关系是有可能应用于其他地区玉米冠层叶绿素含量的估计的。而很多农作物都属于禾本科单子叶植物, 它们具有相近的叶肉结构, 因此, 该关系也很可能可以用于这些种类农作物冠层的叶绿素含量提取。当然, 这还有待更多的实测数据的进一步验证。

表 1 利用式(2)得出的关系式估计玉米冠层叶绿素含量结果
Table 1 Estimated corn canopy Cab using formula (2) and true values

样本号	2003-08-20				2003-08-30				2003-09-08			
	真实值	本文方法	H方法	LAI	真实值	本文方法	H方法	LAI	真实值	本文方法	H方法	LAI
1	53.97	58.55	53.74	6.7	75.39	65.62	59.47	6.3	72.75	62.54	57.15	5.3
2	44.67	51.28	48.41	6.0	58.09	53.43	49.78	5.6	50.90	57.17	52.94	5.8
3	49.06	47.73	44.91	5.6	52.61	55.84	51.88	8.4	50.28	50.74	47.91	6.5
4	58.05	49.01	46.20	7.2	53.11	47.26	44.79	6.1	45.39	53.21	50.43	5.4
5	61.67	51.34	47.91	7.4	75.54	58.15	53.73	7.7	67.96	57.27	52.98	7.2
6	66.84	50.08	47.13	6.6	62.21	60.75	56.32	7.8	77.73	56.41	52.16	6.8
7	55.22	48.87	45.64	8.5	51.70	61.06	55.87	8.9	59.35	55.02	51.04	7.7
8	46.75	40.23	38.65	7.2					49.86	52.01	48.82	5.1
9	33.08	33.29	32.21	6.7	27.84	30.46	29.74	5.9	33.95	39.98	39.03	6.2
10	35.39	48.26	46.35	4.7	50.49	43.45	41.72	6.1	43.16	41.32	40.07	4.9
11	43.89	52.93	49.86	4.9	50.12	47.37	45.23	4.3	57.01	52.14	49.25	1.4
12	63.17	54.14	50.38	5.2	57.68	52.80	49.57	4.7	45.77	48.01	45.78	1.2
13	73.43	54.98	51.22	5.3	69.50	58.00	53.81	5.4	68.99	59.67	55.22	1.7
14	72.86	53.35	49.82	5.6	84.48	52.50	49.42	5.3	59.78	51.84	48.93	1.4
15	58.39	46.46	44.04	5.8	54.10	52.51	50.03	4.7	64.22	54.10	50.68	1.7
16	56.85	55.43	51.30	7.0	67.02	61.93	56.78	4.8	76.27	65.10	59.27	1.9
17	55.77	53.95	50.63	5.4	62.17	59.62	55.22	5.8	66.10	52.88	49.83	4.1
18	57.99	49.57	46.88	5.3	54.45	54.80	51.60	4.9	54.79	60.24	55.79	5.0
19	76.23	60.71	55.60	5.3	69.70	64.99	59.38	5.2	72.69	66.52	60.38	5.2
20	57.43	57.43	53.18	5.8	63.18	59.10	54.54	4.4	62.32	58.55	54.35	4.8
21	75.03	62.58	57.25	4.6	73.12	66.49	60.33	4.9	78.07	63.53	58.11	1.9
22	50.99	55.96	52.10	5.8	75.14	55.62	51.60	4.6	60.59	55.59	51.85	1.9
23	65.92	55.99	52.04	4.4	70.09	61.92	56.75	3.6	46.78	32.85	32.23	2.1
24	57.35	58.80	54.56	4.2	65.52	57.95	53.36	6.9	64.94	56.82	52.88	1.8
25	64.63	64.46	58.73	5.4	59.08	62.78	57.47	5.1	80.93	55.88	52.43	1.8
相关系数 R		0.6379	0.6229			0.7053	0.7089			0.7504	0.7397	
RMSE 均值		0.1711	0.2101			0.1630	0.2083			0.1695	0.2152	



—●— 真实值 -■- 本文方法 -▲- H方法

图 8 利用本文和 H 方法估计的玉米冠层叶绿素含量

Fig 8 Estimated corn canopy Cab using the method of this paper and H method

3 结论和讨论

本文利用理论模型分析了目前研究者提出的各种光谱指数应用于叶绿素含量提取的适用性。我们看到,除了个别指数,大多数的光谱指数在相同的叶绿素含量,不同的叶片种类下,光谱指数值也不相同,也就是说,光谱指数估计叶绿素含量受叶片种类影响。同时,一些指数并不适用于叶绿素含量提取(过早饱和及非单调性,如 NDVI 和 MCARI)。我们也看到,个别指数随着叶片种类变化与叶绿素含量的变化单调升或降,而且比较集中(也即对叶片种类敏感性小),预示着利用这些指数建立一个适合于各种植被叶片的叶绿素含量估计关系是可能的,但是具体应用时,需考虑指数的建立过程及应用目的。

此外,本文改进了一个农作物冠层叶绿素含量的提取关系,该关系的建立是通过利用物理模型模拟的样本得到,不依赖于实测样本,但是通过实测样本的检验,获得了较为理想的结果。本文改进的预测关系是有可能应用于其他地区玉米冠层叶绿素含量的估计的。而很多农作物都属于禾本科单子叶植物,它们具有相近的叶肉结构,因此,该关系也很可能可以用于这些种类农作物冠层的叶绿素含量提取。当然,这还有待更多的实测数据的进一步验证。

光谱指数考虑了部分植被内部的物理机制,有一定的物理意义;并且用其提取植被叶绿素含量的算法比模型反演容易得多,因此具有一定的优势,发展和改进光谱指数,最大限度的剔除背景的影响,从而提取植被冠层叶绿素含量,仍有许多工作值得开展。

参考文献 (References)

- [1] Grossman Y L, Ustin S L, Jacquemoud S, et al. Critique of Stepwise Multiple Linear Regression for the Extraction of Leaf Biochemistry Information from Leaf Reflectance Data [J]. *Remote Sens Environ*, 1996, **56**: 182—193.
- [2] Jacquemoud S. Inversion of the PROSPECT + SAIL Canopy Reflectance Model from AVIRIS Equivalent Spectra: Theoretical Study [J]. *Remote Sensing of Environment* 1993, **44**: 281—292.
- [3] Jacquemoud S, Baret F, Andrieu B, et al. Extraction of Vegetation Biophysical Parameters by Inversion of the PROSPECT + SAIL Models on Sugar Beet Canopy Reflectance Data Application to TM and AVIRIS Sensors [J]. *Remote Sens Environ*, 1993, **52**: 163—172.
- [4] Yan C Y, Liu Q, Niu Z, et al. Inversion of Vegetation Biochemicals by Remote Sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **8**(4): 300—308 [颜春燕, 刘强, 牛铮等. 植被生化组分的遥感反演方法 [J]. *遥感学报*, 2004, **8**(4): 300—308]
- [5] Weiss M, Baret F, Myneni R B, et al. Investigation of a Model Inversion Technique to Estimate Canopy Biophysical Variables from Spectral and Directional Reflectance Data [J]. *Agronomy* 1999, **20**: 3—22.
- [6] Tang Y L, Wang R C, Huang J F, et al. Rice Hyperspectral and Red Edge Study Under Different Nitrogen Conditions [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **8**(2): 185—192 [唐延林, 王人潮, 黄敬峰等. 不同供氮水平下水稻高光谱及其红边特征研究 [J]. *遥感学报*, 2004, **8**(2): 185—192]
- [7] Gitelson A A, Merzlyak M N. Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus Hippocastanum* L. and *Acer Platanoides* L. Leaves: Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation [J]. *J Plant Physiol* 1994, **143**: 286—292.
- [8] Peñuelas J, Baret F, Filella I. Semiempirical Indices to Assess Carotenoids/Chlorophyll a Ratio from Leaf Spectral Reflectance [J]. *Photosynthetica*, 1995, **31**: 221—230.
- [9] Bisun Datt. Remote Sensing of Chlorophyll a, Chlorophyll b, Chlorophyll a + b, and Total Carotenoid Content in Eucalyptus Leaves [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, **66**: 111—121.
- [10] Blackburn G A. Quantifying Chlorophylls and Carotenoids at Leaf and Canopy Scales: an Evaluation of Some Hyperspectral Approaches [J]. *Remote Sens Environ*, 1998, **66**: 273—285.
- [11] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating Canopy Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, **74**: 229—239.
- [12] Thenkabail P S, Ronald B Smith, Eddy De Pauw. Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, **71**: 158—182.
- [13] Broge N H, Mortensen J V. Deriving Green Crop Area Index and Canopy Chlorophyll Density of Winter Wheat from Spectral Reflectance Data [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, **81**: 45—57.
- [14] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Integrated Narrow-band Vegetation Indices for Prediction of Crop Chlorophyll Content for Application to Precision Agriculture [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, **81**: 416—426.
- [15] Sims D A, Gamon J A. Relationships between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, **81**: 337—354.
- [16] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, et al. Canopy Optical Indices from Infinite Reflectance and Canopy Reflectance Models for Forest Condition Monitoring: Applications to Hyperspectral CASI Data [A]. *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'99* [C], Hamburg, Germany, 1999.

- [17] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, et al. Optical Indices as Bioindicators of Forest Condition from Hyperspectral CASI Data [A]. Proceedings 19th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSEL), Valladolid, Spain, 1999.
- [18] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties [J]. *Remote Sens Environ*, 1990, **34**: 75–91.
- [19] Verstraete M M, Bernard Pinty. Designing Optimal Spectral Indexes for Remote Sensing Applications [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(5): 1254–1265.
- [20] Huete A R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) [J]. *Remote Sens Environ*, 1988, **25**: 295–309.
- [21] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of Soil-adjusted Vegetation Indices [J]. *Remote Sens Environ*, 1996, **55**: 95–107.
- [22] Verhoef W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: the SAIL Model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, **16**: 125–141.
- [23] Yan C Y. Study on Methods and Models for Vegetation Biochemical Information Retrieval by Remote Sensing [D]. PhD dissertation [D]. Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, 2004. [颜春燕. 遥感提取植被生化组分信息方法与模型研究 [D]. 博士论文, 中国科学院遥感应用研究所, 2004.]

The Assessment of Spectral Indices Applied in Chlorophyll Content Retrieval and a Modified Crop Canopy Chlorophyll Content Retrieval Model

YAN Chun-yan¹, NIU Zheng¹, WANG Ji-hua², LIU Liang-yun², HUANG Wen-jiang²

(¹ Remote Sensing Information Science State Key Lab, CAS, Beijing 100101, China;

² National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

Abstract Vegetation chlorophyll content is a key component in ecosystem function. Study on vegetation chlorophyll content retrieval is carried out in 3 directions in which developing or modifying spectral index to retrieve canopy chlorophyll content is a direction which may be a compromise between multiple stepwise regression and inverting physical models because it has some physical meaning while is easier than the latter.

At leaf level, we analyzed the applicability of the spectral indices when applied to chlorophyll content retrieval. The reasons that why some studies found these spectral indices are highly correlated with chlorophyll content of their observed samples and why these relationships can not be applied to other peoples' observed samples are explained in this paper.

A recent study developed a semi-empirical model to retrieve canopy crop chlorophyll content which combines spectral index TCARI and soil adjusted index OSAVI. According to this study, the chlorophyll content is determined by the slope of the intersected isolines whose independent variable y is the value of TCARI and the dependent variable x is the value of OSAVI. So a semi-empirical model was derived which is a logarithmic function of TCARI/OSAVI value and through validation with observed canopy reflectance and chlorophyll content, this model gives promising results.

In this paper, we give some modifications for this semi-empirical model. First, the intersection point of the isolines is considered which was taken as the origin while actually is not; it is the chlorophyll content is determined by (TCARI-a/OSAVI-b) with a and b being the Y-coordinate and X-coordinate of the intersection point respectively in TCARI-OSAVI space. Second, a reciprocal function is thought to be more appropriate than a logarithmic one. Considering these two points, a modified model is given in this paper. With our observed canopy reflectance and chlorophyll content, this modified model gives better results.

Key words chlorophyll content; spectral indices