

# 基于高光谱遥感监测植被叶绿素含量的一种植被指数 MTCARI

孟庆野, 董恒, 秦其明\*, 王金梁, 赵江华

北京大学遥感与GIS研究所, 北京 100871

**摘要** 通过对现有的植被指数模型的研究, 指出了 TCARI 模型的不足, 进而提出关于模型的改进。利用 PROSPECT+SAIL 模型模拟出不同叶绿素含量和不同叶面积指数(LAI)下的作物冠层光谱, 代入模型演算相关常数因子, 得到了改进的转换型叶绿素吸收反射率指数 MTCARI, 最后通过引入土壤背景调节指数 OSAVI, 提出了最终的模型。经过实测数据验证, 模型有较好的可靠性。

**关键词** 叶绿素含量监测; 植被指数; TCARI

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)08-2218-05

## 引言

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素, 是光合过程发生的载体, 与太阳光能辐射的吸收利用、植物对 CO<sub>2</sub> 的固定以及植物体内能量的转化等有着密切的关系。监测植物叶绿素含量变化对于了解植物长势、固碳能力, 监测植被病虫害发生发展乃至监测植被对全球气候变化反馈有着重要的意义。随着遥感技术特别是高光谱遥感成像技术的发展, 为定量分析植物冠层理化参量与光谱特征的关系提供了有力的工具。

从 20 世纪 70 年代起, 植物冠层理化特征与植被光谱关系的基础研究受到人们的重视。早期的研究主要是采用多元统计的方法, 建立植被光谱与植被叶绿素含量的回归模型<sup>[1]</sup>。由于回归模型依据经验关系建立, 它受植物种类、发育阶段、生长条件以及背景环境等多种因素的影响, 难以对所选的波段及参数进行理论解释。为了从机理上阐述植物生化组分对光谱特征的影响, 一些学者<sup>[2, 3]</sup>提出了 LIBERTY 和 PROSPECT 等描述叶片机理的模型, 不过上述模型参数多且很难精确测量, 所以基于这些机理模型建立起来的反演模型不容易得到较好的结果。除了以上两类方法, 部分学者利用植被冠层在可见光和近红外波段反射率的不同组合即植被指数来监测植被冠层特征。

植被指数在一定程度上反映了植物冠层理化特征与植物光谱之间关系的物理机制, 其方法比起构建物理模型也简

单。其中反演叶绿素的植被指数中最典型的是叶绿素吸收反射率指数(CARI)<sup>[4]</sup>。在其基础上, 一些学者<sup>[3, 4]</sup>提出了修正型叶绿素吸收反射率指数(MCARI)和转换型叶绿素吸收反射率指数(TCARI)。本工作在山东禹城实验观测与对 TCARI 模型检验基础上, 提出了改进的转换型叶绿素吸收反射率指数 MTCARI, 该模型具有抑制土壤背景因素和冠层结构因素的影响, 为利用高光谱遥感实现植被冠层叶绿素含量的监测提供了方便。

## 1 MTCARI 模型的构建

通过对 TCARI 模型的理论分析, 利用 PROSPECT+SAIL 模型模拟出不同叶绿素含量和不同叶面积指数(LAI)下的作物冠层光谱, 代入模型求算相关常数因子, 得到了改进的转换型叶绿素吸收反射率指数 MTCARI。

### 2.1 TCARI 模型

TCARI 是在 CARI 基础上提出的叶绿素反演植被指数。CARI 是 Kim 在 1994 年提出的<sup>[4]</sup>, 其表达式如下

$$CARI = \frac{a \times 670 + R_{670} + b/R_{700}}{\sqrt{a^{2+1} \times R_{670}}} \quad (1)$$

$$a = (R_{700} - R_{550})/150, b = R_{550} - 550 \times a$$

CARI 有效地减少冠层非光合作用物质引起的光合有效辐射的变化所造成的影响, 但 CARI 很容易受到背景土壤反射率的影响, 很难估测低 LAI 下的叶绿素含量。Daughtry 等<sup>[3]</sup>认为背景反射率的变化会影响 550~700 nm 波长反射率

收稿日期: 2012-03-02, 修订日期: 2012-05-20

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAH29B03, 2012BAC16B04), 国家自然科学基金项目(41071221, 41101312)和公益性行业(气象)专项(GYHY200806022)资助

作者简介: 孟庆野, 1989 年生, 北京大学遥感与 GIS 研究所硕士研究生 e-mail: mqytc@sina.com

\* 通讯联系人 e-mail: qmqin@pku.edu.cn

的一阶导数。Daughtry 发现背景反射率对于  $(R_{700} \sim R_{550})$  的影响大于对于  $(R_{700} \sim R_{670})$  的影响, 使用比值  $R_{700}/R_{670}$  抵消背景对  $(R_{700} \sim R_{550})$  的影响, 因此产生了 TCARI。Daughtry 基于大量实测光谱, 计算出常数因子, 得到的 TCARI 计算公式如下<sup>[3]</sup>

$$TCARI = 3 \left[ (R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550}) \frac{R_{700}}{R_{670}} \right] \quad (2)$$

整个 CARI 体系的设计核心在于端点在 550 和 700 nm 的 670 nm 的波段吸收深度。Kim 等<sup>[4]</sup>认为 670 nm 波段是叶绿素 a 的强烈吸收波段, 550 及 700 nm 波段是叶绿素 a 的强烈反射波段。在研究地面实测数据和其他相关文献后发现, 叶绿素 a 强吸收波段应当为红谷位置而非简单的 670 nm, 且 550 及 700 nm 处也不是叶绿素的最强反射波段, 实际上还要受到其他很多因素的影响。基于以上的原因, 本研究提出了对 TCARI 的改进。

### 2.2 模型理论分析

为了选取最有效的波段, 分析植被光谱中这些特征波段随叶绿素含量变化的规律, 选取了植被光谱曲线的蓝边、黄边、红边等特征波段的位置, 以及植被光谱曲线一阶导数的峰值所确定的光谱拐点等 6 个特征位置点来描述可见光到近红外波段 (350~900 nm) 的光谱曲线 (如图 1)。

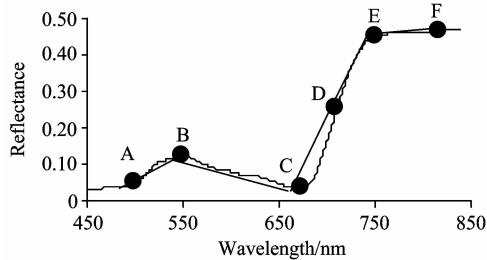


Fig. 1 Spectral characteristics position in visible light and near infrared regions

A 为蓝边位置, 是光谱在蓝波段的拐点, 植被光谱曲线一阶导数在此波段的极大值。B 为绿峰位置, 是植被光谱在绿波段的最大点。C 为红波段吸收谷 (红谷), 是光谱在红波段的反射率最小值。D 为红边位置, 是光谱的一阶导数在红边波段的极大值对应的位置。E 为近红外平台位置, 是光谱在红外波段平台和红边之间的过渡点, 相当于红边与红外平台的交点。F 为近红外平台上的一点。

由于 TCARI 的波段选择为 550, 670 和 700 nm 接近于 B, C 和 D 点, 下面分析 BCD 三点与叶绿素的相关关系。B 点即绿峰位置的反射率反映了植被在可见光波段范围内对于绿色光的反射作用, 由于叶绿素强烈吸收蓝紫光和红光, 基本不吸收绿光, 这是绿峰位置的反射率高于红光及蓝紫光的重要原因。C 点即红谷位置是植被中的叶绿素吸收最为强烈的波段之一, 当叶绿素含量增高时, 更多的辐射被吸收。与绿峰位置相比, 在红谷位置, 叶绿素对太阳辐射表现为强烈吸收<sup>[1-7]</sup>, 其反射率与叶绿素含量存在着很强的相关性, 红谷位置对于叶绿素的反演有着重要的作用。D 点即红边位置的反射率与叶绿素含量也存在相关关系, 红边位置对应光谱

的一阶导数在红边波段的极大值。前人研究表明<sup>[1-7]</sup>, 红边位置对叶绿素含量很敏感, 当叶绿素含量升高时, 红边位置会向长波方向移动, 红边位置反射率会随之增大。当植物叶绿素含量降低时, 红边位置就会向短波方向移动, 红边位置的反射率减小。

由此可见, 绿峰位置、红谷位置、红边位置的反射率均与叶绿素含量呈现密切的关系。其中, 红谷位置反射率随着冠层叶绿素含量升高而降低, 绿峰位置红边位置反射率与叶绿素含量正相关。

### 2.3 模型构建

综上所述, 可认为可以采用绿峰、红谷和红边斜率等位置的反射率代替 550, 670 和 700 nm 波段的反射率构建模型, 从而获得对于叶绿素含量变化更加敏感的植被指数模型。由于改变了 TCARI 的波段, 所以需要调整模型中的各个比例因子进行调整。改进的 TCARI 植被指数模型为

$$MTCARI = a(R_{\text{红边}} - R_{\text{红谷}}) - b(R_{\text{红边}} - R_{\text{绿峰}}) \frac{R_{\text{红边}}}{R_{\text{红谷}}} \quad (3)$$

式中,  $a$  和  $b$  是与反射率, 植被覆盖度等因素无关的常数因子。

为了使改进的转换型叶绿素吸收反射率指数 MTCARI (modified transformed chlorophyll absorption ratio index) 有着更好的普适性, 利用 PROSPECT+SAIL 模型<sup>[3, 8]</sup>模拟的数据对两个常数因子进行了解算。模型具体参数如表 1 所示。

Table 1 Input parameters of the model Prospect+SAIL

输入参数	输入值
叶片叶绿素含量 / ( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
LAI	0.01, 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6
叶肉结构参数	1.3
太阳直射光比例	1
太阳赤纬	0
地球纬度	40
观测方位角 & 天顶角	0
观测时间	10
LAD	Custom

### 2.4 参数值的计算

根据 Daughtry 等<sup>[3]</sup>的研究, 叶绿素含量与  $\ln(\text{MTCARI})$  线性相关, 其关系式可以表达为

$$Y(\text{Chl}) = k \times \ln(\text{MTCARI}) + m \quad (4)$$

其中,  $Y(\text{Chl})$  代表叶绿素含量,  $k$  和  $m$  为常数项。经过简单的数学运算可以得到

$$Y(\text{Chl}) = k \times \ln(\text{MTCARI}/b) + [m + k \times \ln(b)] \quad (5)$$

式中,  $m + k \times \ln(b)$  为与叶绿素含量无关的常数项。实际上只需要计算 MTCARI 公式中  $a$  与  $b$  的比例即可, 可设定  $b=1$ , 代入 Prospect+SAIL 模拟光谱。总共有 10 种叶绿素含量和 10 种 LAI 值共 100 组光谱可以解得 100 个方程, 最终将方程联立, 通过最小二乘解法得到常数值  $a=3.3$ 。MTCARI

最终的公式为

$$\text{MTCARI} = 3.3(R_{\text{红边}} - R_{\text{红谷}}) - (R_{\text{红边}} - R_{\text{绿峰}}) \frac{R_{\text{红边}}}{R_{\text{红谷}}} \quad (6)$$

MTCARI 与应用 Prospect+SAIL 模拟叶绿素值得结果如图 2, 其相关系数  $R^2 = 0.8968$ 。由于 Prospect+SAIL 是利用地物对于太阳辐射的辐射传输过程进行模拟的辐射传输模型, 由植被类型不一致所带来的下垫面的不同是通过叶肉结构参数  $n$  来体现的, 其本身具有普适性。应用 Prospect+SAIL 模拟计算常数因子的 MTCARI 应当可以用于多种植被类型, 具有广泛的适用性。

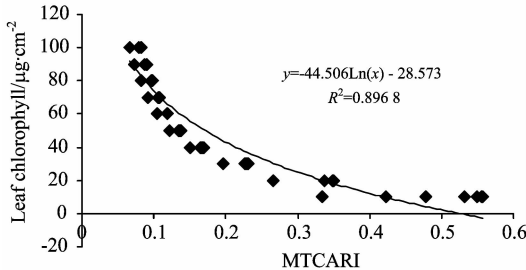


Fig. 2 Correlation of leaf chlorophyll with MTCARI using simulation data

### 3 野外观测验证及模型进一步改进

#### 3.1 实验设计及研究区概况

为了进一步验证 MTCARI 模型的有效性, 采用实际的观测值进行模型验证。由于植被叶绿素含量的变化主要受到植物种类、生长阶段和水分、养分、光照、温度等外界条件影响, 一般的野外观测试验很难采集到具有明显差异性的植被叶绿素含量及其对应光谱。采用养分池精准控制水氮要素的小区域研究方法, 通过控制养分池中水分和养分条件, 获取生长状况明显差异的植物叶绿素含量和对应光谱。

试验区位于中国科学院山东禹城综合试验站水-氮平衡试验场, 试验的作物是小麦。试验共设有 32 个试验区, 各个小区均是独立的  $10 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  深) 的水泥池, 以保证各试验区拥有独立的水分和氮素控制条件。水分分为 60% 和 80% 田间持水量两个级别。氮素分为每亩 0, 70, 140, 210 和 280 kg 五个级别。水氮控制总共 10 个级别, 在试验区内随机分布, 并且保证每个控制级别至少有 3 个重复。

#### 3.2 数据采集

采集的植被理化指标主要是叶片叶绿素含量、植被覆盖度、LAI、叶片氮素含量以及相应的冠层光谱。

冬小麦叶绿素含量的测定采用分光光度法, 于每次冠层光谱实验之后, 采集试验区内测量冠层光谱区域的叶片, 密封避光条件下即时处理。除尘去茎后剪碎混匀, 用 95% 乙醇浸泡 24 h, 浸泡过程中定时摇动。取萃取液用分光光度计分别于 645 和 663 nm 处测定吸光度值, 利用下式进行计算叶绿素浓度。

$$\text{Chl} = 20.29A_{645} + 8.05A_{663} \quad (7)$$

式中 Chl 代表叶绿素浓度,  $A_{645}$  和  $A_{663}$  代表 645 和 663 nm 处

吸光度值。分光光度计得到的是叶绿素浓度, 再利用下式计算得到叶绿素含量。

$$\text{叶绿素含量} (\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}) = \text{叶绿素浓度} (\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}) \times \frac{\text{叶片鲜重} (\text{g})}{\text{叶片面积} (\text{cm}^2)} \quad (8)$$

冠层光谱的采集使用的是美国 ASD 公司的 FieldSpec Pro FR 便携式分光辐射光谱仪。在天气晴朗少云的正午测量, 探头方向垂直于冠层进行。每个小区设定 4 个样点, 对每个样点采集 5 条光谱曲线。将每个小区的采集的光谱曲线进行滤波和综合, 从而得到每个小区冠层的反射率光谱。

#### 3.3 验证结果

使用禹城野外观测试验中 3 月—4 月共 55 组数据对 MTCARI 与 TCARI 进行了验证。验证结果如图 3 所示。

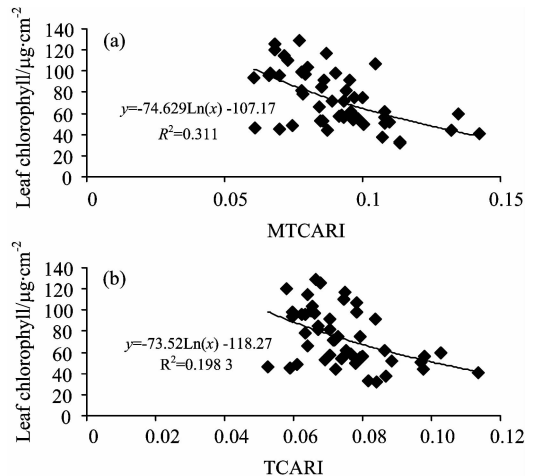


Fig. 3 Correlation of leaf chlorophyll with TCARI and MTCARI

从图 3 可以看出, MTCARI 较 TCARI 具有更好的拟合效果, 尤其是在叶绿素含量较高的情况下, MTCARI 拟合的效果更佳, 这可能是由于在较高叶绿素含量时, 红边的反射率比 700 nm 更能代表叶绿素的反射波段, 其反射率与叶绿素含量的相关关系更小。

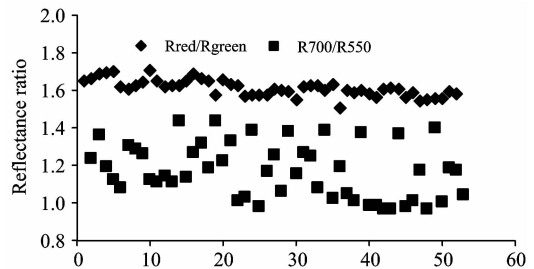


Fig. 4 Distribution comparison of  $R_{\text{red}}/R_{\text{green}}$  and  $R_{700}/R_{550}$

此外, 从 TCARI 构建理论分析, Kim 等<sup>[4]</sup>认为由于 700 和 550 nm 是叶绿素的反射波段, 两者反射率均随着叶绿素含量的增加而增加。比值  $R_{700}/R_{550}$  基本不随着叶绿素的差异而产生变化。对比  $R_{\text{红边}}/R_{\text{绿峰}}$  与  $R_{700}/R_{550}$ , 可以发现  $R_{700}/R_{550}$  的平均值为 1.175。方差为 0.208。  $R_{\text{红边位置}}/R_{\text{绿峰位置}}$  的平均值为 1.609。方差为 0.0019。可以在 95% 的置信区间内认为  $R_{\text{红边位置}}/R_{\text{绿峰位置}}$  比值恒定。

### 3.4 模型的进一步改进

尽管 MTCARI 较 TCARI 对于冠层叶绿素含量的反演有了很大的提高,但由于 CARI 系列指数受土壤反射率和冠层非光合作用物质的影响较大,其很容易受到背景因素和 LAI 的影响。为了进一步去除这些因素的影响, Haboudane<sup>[5, 8, 9]</sup>提出了一个将光谱指数 TCARI 和 OSAVI (optimized soil adjusted vegetation index)结合的提取农作物叶片叶绿素含量的关系式,引入只与 LAI 等冠层结构因素相关的 800 nm 波段,试图剔除 LAI 和土壤背景的影响。其中, OSAVI 的计算公式如下

$$\text{OSAVI} = (1 + 0.16) \frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670} + 0.16} \quad (9)$$

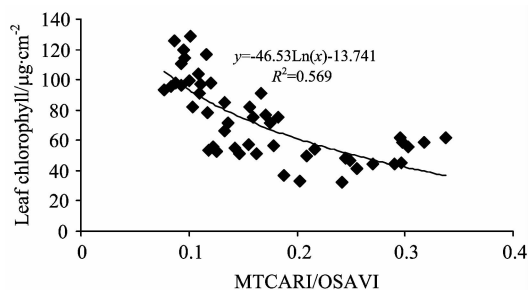


Fig. 5 Correlation of leaf chlorophyll with MTCARI/OSAVI

参照式(9),本研究使用 MTCARI 与 OSAVI 进行组合,计算其与叶绿素含量的相关性关系。

从 MTCARI/OSAVI 对于叶绿素含量的相关关系图对比则可以发现 MTCARI/MSAVI 所得到的相关系数为 0.569,测量值与估计值的均方根误差(RMSE)为 17.057。相关关系好于单独使用 MTCARI。

## 4 结 论

应用植被指数对冠层叶绿素含量进行反演,评价植被指数对叶绿素含量反演的精确性是植被遥感领域主要的研究内容之一。而减少植被指数对影响冠层反射率的其他因素的敏感性,提高叶绿素含量的反演精度则是植被遥感领域的研究难点。在 CARI 系列模型理论研究的基础上,结合红边特征的相关分析,提出了基于 TCARI 的改进转换型叶绿素吸收反射率指数 MTCARI。该指数是在 Prospect+SAIL 辐射传输物理模拟基础上建立的。经过野外测量结果验证其比 TCARI 对叶绿素的模拟效果更好。为了进一步减弱土壤背景与 LAI 的影响,引入 OSAVI,实地验证表明, MTCARI/OSAVI 在冠层叶绿素含量的遥感模拟方面具有更大的优势,获得了较好的相关关系,但是由于验证数据地点的单一<sup>[10]</sup>,研究结果还需要更多的实地验证。

## References

- [1] PU Rui-liang, GONG Peng(浦瑞良, 宫 鹏). Hyperspectral Remote Sensing and Application(高光谱遥感及其应用). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2003. 2.
- [2] Dawson T P, Curran P J. Remote Sensing of Environment, 1998, 65: 50.
- [3] Daughtry C S T, Walthall C I, Kim M S. Remote Sensing of Environment, 2000, 75: 229.
- [4] Kim M S, Daughtry C S T, Chappelle E W, et al. Proceedings of the 6th Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing Val D' Isere, 1994. 299.
- [5] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 416.
- [6] Qi J. Remote Sensing Environment, 1994, 48: 119.
- [7] TONG Qing-xi, TIAN Guo-liang(童庆禧, 田国良). Typical Object Spectrum and Its Characteristics Analysis in China(中国典型地物光谱及其特征分析). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1990. 32.
- [8] Jacquemoud S, Baret F. Remote Sensing of Environment, 1990, 34: 75.
- [9] Haboudane D, et al. IGARSS, 2008.
- [10] Thomas J R, Oerther G F. Agron. J., 1972, 64: 11.

## MTCARI: A Kind of Vegetation Index Monitoring Vegetation Leaf Chlorophyll Content Based on Hyperspectral Remote Sensing

MENG Qing-ye, DONG Heng, QIN Qi-ming\*, WANG Jin-liang, ZHAO Jiang-hua  
Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China

**Abstract** The chlorophyll content of plant has relative correlation with photosynthetic capacity and growth levels of plant. It affects the plant canopy spectra, so the authors can use hyperspectral remote sensing to monitor chlorophyll content. By analyzing existing mature vegetation index model, the present research pointed out that the TCARI model has deficiencies, and then tried to improve the model. Then using the PROSPECT+SAIL model to simulate the canopy spectral under different levels of chlorophyll content and leaf area index (LAI), the related constant factor has been calculated. The research finally got modified transformed chlorophyll absorption ratio index (MTCARI). And then this research used optimized soil background adjust index (OSAVD) to improve the model. Using the measured data for test and verification, the model has good reliability.

**Keywords** Measurement of chlorophyll content; Vegetation index model; TCARI

(Received Mar. 2, 2012; accepted May 20, 2012)

\* Corresponding author